

// Elektrizität aus Sonnenlicht: Photovoltaik

Electricity from Sunlight: Photovoltaics



// Elektrizität aus Sonnenlicht: Photovoltaik Electricity from Sunlight: Photovoltaics

// FOCUS

// Elektrische Energie aus Sonnenlicht – risikolos und emissionsfrei in der Erzeugung, weltweit uneingeschränkt nutzbar, unerschöpflich und in einem Umfang erzeugbar, der den globalen Energiebedarf um ein Vielfaches übersteigt – eine ideale Energieform?

Die Vorzüge der photovoltaischen Stromerzeugung sind unbestritten. Doch bevor sie weltweit voll genutzt wird und eine entsprechende Rolle in der Energieversorgung übernehmen kann, sind noch einige Herausforderungen zu überwinden. Einerseits sind die Kosten des Solarstroms weiter zu senken, zum anderen besteht die Abhängigkeit vom saisonalen und tageszeitlichen

// Electrical energy from sunlight: generated without risk and emission-free, useable worldwide without limitations, inexhaustible and available to an extent that exceeds the global energy requirements many times – an ideal form of energy?

The advantages of photovoltaic electricity generation are undisputed. However, before it can be fully used throughout the world and take on a corresponding role in the provision of energy, several challenges still have to be overcome. On the one hand, the costs of solar power need to be further reduced, and on the other hand, the dependence on the seasonal and daily course of



// Netzunabhängige Dorfstromanlage mit Photovoltaik.
// Off-grid photovoltaic system in a mountain village.

Gang der Sonne und den jeweiligen Witterungsbedingungen, so dass Solarstromangebot und Stromnachfrage häufig nicht übereinstimmen. Hierfür Lösungen zu entwickeln ist eine zentrale Forschungsaufgabe des ZSW.

// Die Anwendungen der Photovoltaik (PV)

Wo Stromnetze nicht zur Verfügung stehen, ist die PV oft die einzige Möglichkeit für die Versorgung mit elektrischem Strom. Ursprünglich für die Raumfahrt entwickelt, ist sie in netzfernen Anwendungen längst unverzichtbar geworden: Die Stromversorgung von Millionen Telekommunikationseinrichtungen, Verkehrszeichen auf See und an Land, Umweltüberwachungsanlagen, Straßenleuchten oder Ferienhäusern und Berghütten ist heute bereits ein Markt im Milliarden-Euro-Bereich. Auch für die Elektrifizierung in Entwicklungsländern spielt die Photovoltaik eine wichtige Rolle. Unter den Rahmenbedingungen dieser Märkte ist die solare Stromerzeugung konkurrenzlos bzw. hoch wettbewerbsfähig gegenüber Alternativen. Durch die kontinuierliche Kostensenkung wachsen die erschließbaren Märkte für die ländliche Elektrifizierung in Entwicklungs- und Schwellenländern stetig.

Trotz dieses breiten Anwendungsspektrums ist die Bedeutung der PV gemessen am Weltenergiebedarf heute noch relativ gering. Sie wird energiewirtschaftlich nur dann zu einer bedeutenden Größe werden, wenn sie sich auch im netzgekoppelten Betrieb gegenüber anderen Energieträgern durchsetzt. Deutschland gilt hier weltweit als Vorreiter. Im Bestreben von Gesellschaft und Politik, die Abhängigkeit von Energieimporten zu verringern und einen klimafreundlichen Ersatz der fossilen Stromerzeugung ohne die Risiken der Kernenergie voranzubringen, wurde bereits 1990 das Stromeinspeisegesetz zur Förderung der Stromerzeugung aus regenerativen Energien beschlossen. Es wurde durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) im Jahr 2000 abgelöst, mit dem eine stärker an den Kosten der jeweiligen Technologien orientierte Einspeisevergütung eingeführt wurde.

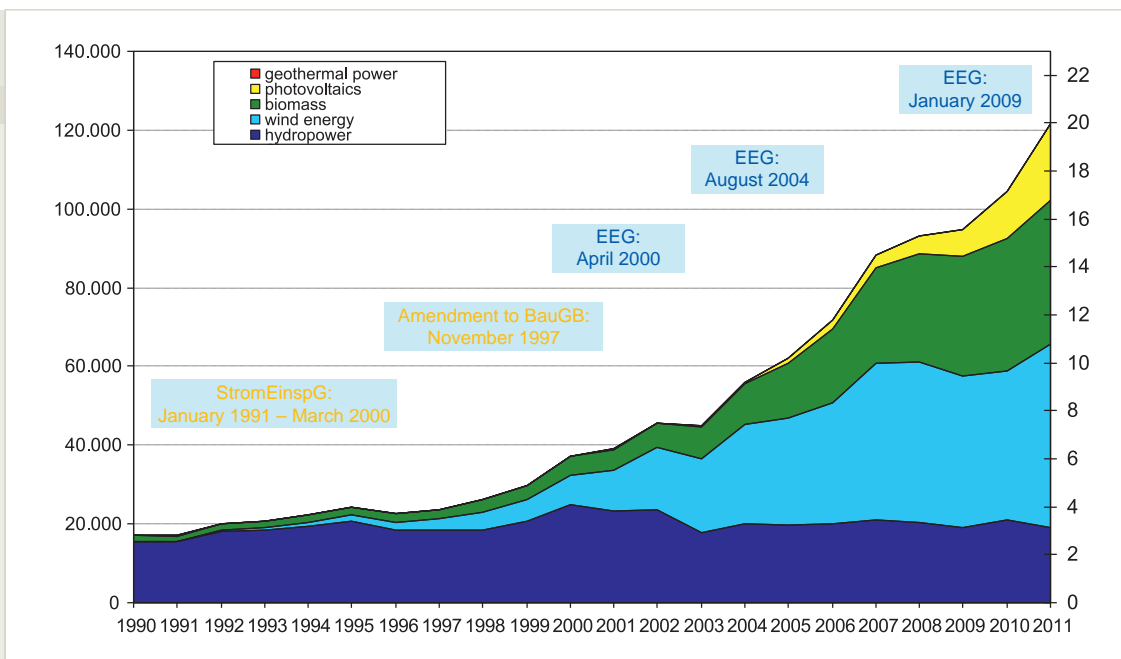
the sun and the respective weather conditions means that solar power supplies and demands frequently do not match. Developing solutions for this is one of ZSW's main research tasks.

// The application of photovoltaics (PV)

Where electricity grids are not available, PV often provides the only possibility for supplying electrical power. Originally developed for use in outer space, it has long become indispensable for off-grid applications. The provision of electricity for millions of telecommunications facilities, transport signs at sea and on land, environmental monitoring systems, street lamps, holiday homes and mountain chalets is already a multi-billion euro market. PV also plays an important role for providing electrification in developing countries. Given the underlying conditions in these markets, solar power generation is unrivalled or at least highly competitive when compared with the alternatives. As a result of the continual cost reductions, the potential markets for rural electrification in developing and emerging countries are growing constantly.

Despite this wide range of applications, the importance of PV is still relatively small when measured against the worldwide energy requirements. It will only become a significant force in the energy industry if it can also successfully compete against other energy sources in on-grid operation. Germany is considered to be a pioneer here. As part of the social and political efforts to reduce the dependence on energy imports and to drive forward the climate-friendly replacement of fossil power supplies without relying on risky nuclear energy, the Electricity Feed-in Act for Promoting the Generation of Electricity from Renewable Energies was passed in 1990. In the year 2000, it was replaced by the Renewable Energy Sources Act (EEG), which introduced a feed-in tariff that much more closely reflected the costs of the respective technologies.

// Abb. 1: Innerhalb von zwei Jahrzehnten hat sich der Beitrag erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung in Deutschland verfünffacht.
 // Fig. 1: Within two decades, the contribution made by renewables to electricity generation in Germany has increased fivefold.



Quelle: AGEE-Stat. StromEinspG = Stromeinspeisegesetz, BauGB = Baugesetzbuch, EEG = Erneuerbare-Energien-Gesetz.
 Source: AGEE-Stat. StromEinspG = Electricity Feed-in Act, BauGB = Federal Building Code, EEG = Renewable Energy Sources Act.

Wie Abb. 1 zeigt, führte die dadurch ausgelöste Wachstumsdynamik in Deutschland zu einem Anstieg des regenerativen Anteils der Stromerzeugung von 6,4 % auf 20 % im Jahr 2011. Mit dem EEG begann auch für den Einsatz der netzgekoppelten PV ein neues Zeitalter. Indem der Gesetzgeber eine kostendeckende Vergütung etablierte, wurde es ökonomisch interessant, PV-Strom vom Hausdach ins öffentliche Netz einzuspeisen. Inzwischen sind in Deutschland rund eine Million PV-Anlagen mit einer Leistung von 25.000 MW installiert, die 3,1 % zur gesamten Stromversorgung beitragen. Der deutsche Ansatz der Einspeisevergütung dient mehr als 50 anderen Ländern und Regionen als Vorbild. Weltweit waren im Jahr 2011 PV-Anlagen mit einer Nennleistung von rund 60.000 MW installiert. Der Strom aus diesen Anlagen entspricht der jährlichen Energiebereitstellung von acht großen Kernkraftwerksblöcken.

// Historische Preisentwicklungen

Die PV hat den Laborstatus sehr viel schneller verlassen als erwartet und entwickelt sich stetig zu einer energiewirtschaftlich ernst zu nehmenden Größe. In sehr kurzer Zeit ist ein neuer Industriezweig entstanden, der 2011 bereits 50 Mrd. € erwirtschaftet hat. Dabei wurden von der Rohstoffaufbereitung bis zur Anlageninstallation Hunderttausende Arbeitsplätze neu geschaffen. Diese beachtlichen Erfolge sind jedoch nur ein erster Schritt. Das Ziel ist die wettbewerbsfähige Stromerzeugung aus PV ohne jegliche Förderung. Die hierfür notwendige Kostensenkung konnte in der jüngsten Vergangenheit mit Erfolg vorangetrieben werden.

Die Kosten bzw. Preise von PV-Anlagen setzen sich zusammen aus den Kosten des PV-Moduls (der Stromerzeugungseinheit und damit Kernkomponente), den Kosten der weiteren Systemkomponenten wie Wechselrichter, Montagegestell und Verkabelung sowie den Kosten für die Planung und Montage der Anlagen. Abb. 2 zeigt die Preisentwicklung von PV-Modulen. Während zwischen 1976 und 1999 der Modulpreis stetig von 65 US\$ bzw. 50 €

As Fig. 1 shows, the growth dynamic that was triggered in Germany led to an increase in the renewable share of electricity generation from 6.4% to 20% in 2011. With the EEG, the use of on-grid PV also entered a new era: because the government introduced cost-covering remuneration, it became economically interesting to feed PV power from house roofs into the public grid. Around one million PV systems with a total output of 25,000 MW are now installed in Germany, which contribute to 3.1% of the overall electricity provision. The German use of feed-in tariffs has provided a model for more than 50 other countries and regions. In 2011, PV systems with a total rated output of around 60,000 MW were installed worldwide. The electricity from these systems corresponds to the energy provided annually by eight large-scale nuclear power stations.

// Historic price development

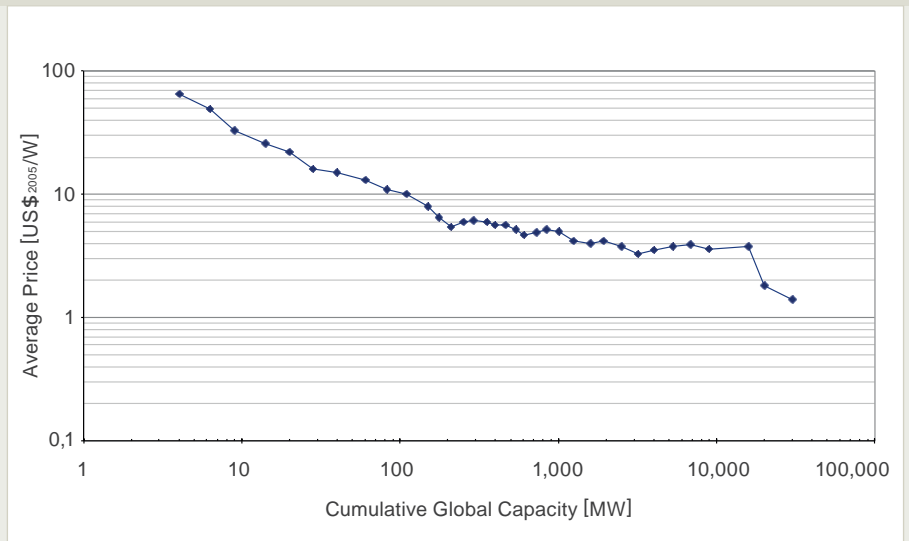
PV has left the laboratory status much more quickly than was expected and is increasingly growing into an economic force to be reckoned with in the energy industry. A new industrial sector has been created within a very short space of time that already generated a turnover of 50 billion euros in 2011. Hundreds of thousands of new jobs have been created, ranging from the raw material processing to the installation of PV systems. However, these notable successes are only the first step. The aim is to generate competitive electricity from PV that does not rely on subsidies. The necessary reduction in costs has already been successfully driven forward in the recent past.

The costs of PV systems relate to the costs of the PV modules used (the electricity generating units and thus the core components), the costs of other system components such as the inverter, mounting frame and cabling, as well as the costs for planning and installing the systems. Fig. 2 shows the price development of PV modules. Although module prices dropped steadily between 1976 and 1999 from US\$65 or €50 per rated watt to US\$4 or €3 per

// Focus

// Abb. 2: Historische Preisentwicklung: von 1976 bis 2010 hat sich der Preis von PV-Modulen aus kristallinem Silizium je Watt Nennleistung von 65 US\$ auf 1,4 US\$ reduziert. In der Darstellung (doppeltlogarithmische Lernkurve) ist der Preis inflationsbereinigt über dem kumulierten Produktionsvolumen aufgetragen.

// Fig. 2: Historic price development: From 1976 to 2010, the cost of PV modules made from crystalline silicon has reduced from US\$65 to US\$1.4 per rated watt. In the graph (double logarithmic learning curve), the inflation-adjusted price is plotted relative to the cumulated production volume.



Quelle/Source: Arvizu, D. et al., 2011: Direct Solar Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer et al. (eds)], Cambridge University Press. Fig. 3.17.

je Watt Nennkapazität auf 4 US\$ bzw. 3 € pro Watt gefallen ist, blieb der Preis in den Folgejahren zunächst trotz einer Verzehnfachung des Produktionsvolumens nahezu stabil bei 4 US\$ pro Watt (3 € pro Watt). Hauptgrund hierfür war die durch die attraktiven gesetzlich garantierten Einspeisevergütungen ausgelöste große Nachfrage nach PV-Systemen.

Dies änderte sich Ende 2008, als die weitere Entwicklung des damals weltweit größten Einzelmarktes Spanien (Absatz 2008: 2.600 MW) durch die Einführung einer absoluten Zubaubeschränkung in Höhe von 500 MW politisch massiv beschnitten wurde. Ein Nachfrageeinbruch war die Folge. Auf der Angebotsseite kam die Überwindung der Siliziumknappheit hinzu, wodurch diese Rohstoffkomponente in erheblich größerer Menge zu deutlich geringeren Preisen verfügbar war. Insbesondere nahmen aber immense neue Fertigungskapazitäten im asiatischen Raum die Produktion auf. Somit stand Anfang 2009 ein sehr großes Modulangebot einer vergleichsweise geringen Nachfrage gegenüber.

Auch in Deutschland führte die Neufassung des EEG 2009 zu einer deutlichen Absenkung der Vergütungssätze, sodass sich zunächst kaum Käufer fanden. Es folgte der in Abb. 2 gezeigte Sturz der Modulpreise auf 1,4 US\$ pro Watt bzw. 1,08 € pro Watt. Dieser Trend setzte sich auch im Jahr 2011 fort. Aktuell spiegelt diese Preisentwicklung jedoch möglicherweise die Kostensituation der Hersteller nicht mehr wider: Die Preissenkungen basieren nicht mehr auf der Realisierung von Kostenreduktionen in der Produktion, sondern sind allein dem großen Überangebot im Markt geschuldet. Für einzelne Hersteller kann dies bedeuten, dass sie gezwungen sind, unter ihren Produktionskosten zu verkaufen.

Wie Abb. 3 auf der nächsten Seite zeigt, wirken sich die deutlich reduzierten Modulpreise auch auf Gesamtsysteme aus. So ist der durchschnittliche Preis für ein installiertes PV-System mit einer Nennleistung bis 100 kW seit Anfang 2009 um 47 % gesunken, gegenüber 2006 sogar um 58 %.

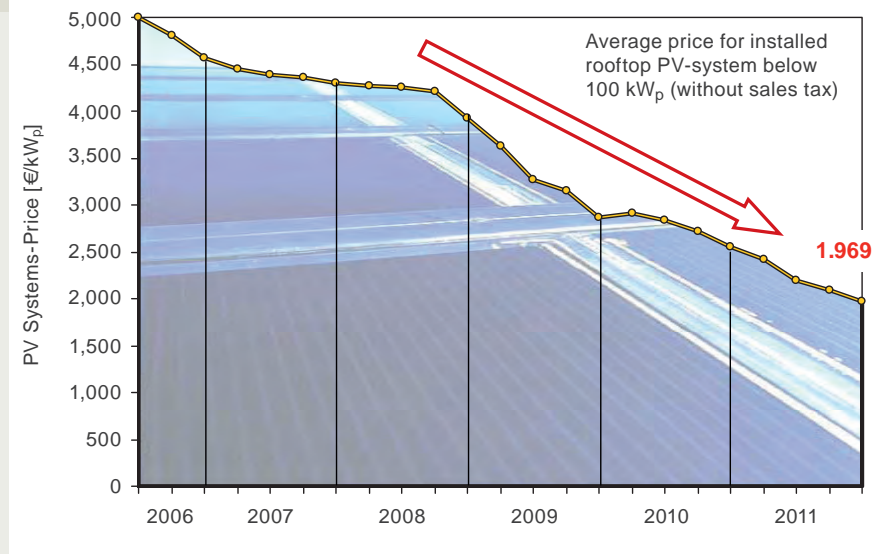
watt, during the subsequent years the prices initially remained almost stable at US\$4 per watt (€3 per watt) despite the tenfold increase in production volume. The main reason for this was the enormous demand for PV systems triggered by the attractive, statutory guaranteed feed-in tariffs.

That changed at the end of 2008 when the further expansion of what was then the world's largest single market in Spain (turnover 2008: 2,600 MW) was vastly curtailed when the government introduced an absolute annual cap on new installations amounting to 500 MW. This led to a slump in demand. On the supply side, however, the silicon shortage was overcome, which meant that this raw material component was available in considerably larger volumes at vastly lower prices. Moreover, new manufacturing capacities in the Asian region began production on a huge scale. At the beginning of 2009, the supply of modules therefore vastly outstripped the relatively small demand.

In Germany, the amendment to the EEG Act in 2009 also led to a considerable reduction in the remuneration rates, which meant that at first, it was difficult to find buyers. This in turn led to a collapse in the module prices to US\$1.4 per watt or €1.08 per watt as shown in Fig. 2. This trend also continued in 2011. However, this price development possibly no longer reflects the current cost situation of the manufacturers, since the price reductions are no longer based on the realisation of cost reductions in production but are purely a consequence of the considerable oversupply in the market. For some manufacturers, this could mean that they are forced to sell at prices lower than their production costs.

As Fig. 3 on the next page shows, the considerably reduced module prices also have an impact on the overall systems. For example, the average price for an installed PV system with a rated output of up to 100 kW has dropped by 47% since the beginning of 2009, and even by 58% relative to 2006.

// Abb. 3: Historische Preisentwicklung: der Systempreis in Deutschland installierter PV-Systeme je Kilowatt installierter Leistung.
 // Fig. 3: Historic price development: the price for PV systems installed in Germany per kilowatt of installed capacity.



Quelle: Unabhängige repräsentative Befragung von 100 Installateuren durch EUPD-Research im Auftrag des BSW-Solar.
 Source: Independent representative survey of 100 installers by EuPD Research on behalf of BSW-Solar.

Entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit von Solarstrom sind jedoch nicht die Anlagen-, sondern die Stromgestehungskosten. Hier fließen die Leistungsfähigkeit der Anlagen (Wirkungsgrad, Zuverlässigkeit, Lebensdauer usw.), Wartungskosten, die Sonneneinstrahlung am Standort und die finanzmathematischen Randbedingungen einschließlich der Renditeerwartung der Investoren ein. Für Deutschland kann hierfür die meist kostendeckende Einspeisevergütung nach dem EEG als Indikator herangezogen werden, selbst wenn sie kurzfristige Preisschwankungen am Markt nicht widerspiegelt. Wie Abb. 4 exemplarisch zeigt, haben sich die Vergütungssätze und damit in der Tendenz die Kosten von Solarstrom in Deutschland innerhalb von nur fünf Jahren ungefähr halbiert und liegen bei den Hausdachanlagen bereits auf dem Niveau der Stromtarife privater Haushalte.

Diese Entwicklung war nur durch erhebliche Kostensenkungen in der gesamten Prozesskette der Herstellung möglich. In der rasant wachsenden Industrie vollzogen unter hohem Wettbewerbsdruck sowohl die Produzenten als auch die Zulieferindustrie schnelle Technologieentwicklungen. Hierzu zählen insbesondere die Weiterentwicklung von Produktionsverfahren, teilweise in Verbindung mit einem reduzierten Materialeinsatz, die Verbesserung des „Bauelements Solarzelle“ etwa durch erhöhte Wirkungsgrade sowie der Einsatz neuer Halbleiter, die bei gegebenem Materialeinsatz eine höhere Energieernte ermöglichen. Hinzu kamen Produktstandardisierungen vor allem hinsichtlich der Systemkomponenten Verkabelung, Montagesysteme, Anschlussdosen usw. ebenso wie deutliche technologische Verbesserungen im Bereich der Wechselrichter.

Ohne den Beitrag der Wissenschaft wäre dies allerdings nicht möglich gewesen. Deutschland hat neben der durch das EEG induzierten Nachfrage nach PV-Anlagen gerade auch durch die gezielte Unterstützung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Rahmen der Forschungsförderung die Entwicklung der PV voran-

However, it is not the system costs which are decisive for the competitiveness of solar power but the costs of generating electricity. These depend on the system performance (efficiency, reliability, service life and so on), maintenance costs, solar irradiance at the site and the underlying financial and mathematical conditions including the profit expectations of the investors. For Germany, the mostly cost-covering feed-in tariff in accordance with the EEG can be drawn upon as an indicator for this purpose, even if it does not reflect short-term price fluctuations in the market. As Fig. 4 shows by way of example, in Germany the remuneration rates and, as a consequence, the costs for solar power have roughly halved within just five years, whereby rooftop systems are already at the same level as the electricity tariffs for private households.

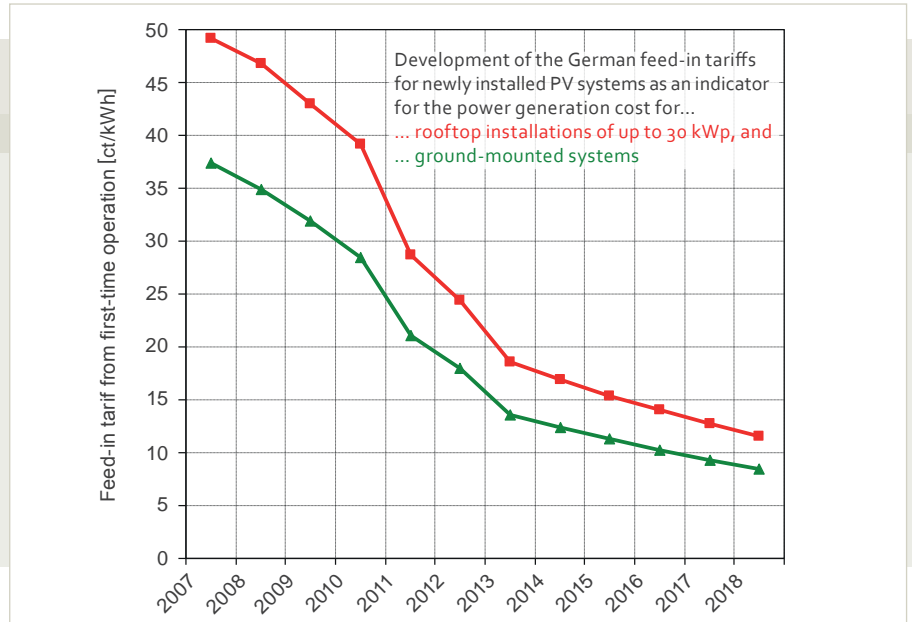
This development was only made possible as a result of considerable cost reductions throughout the entire process chain. In the rapidly developing industry, both the producers and the supply industry have carried out rapid technology developments in the face of considerable competitive pressure. In particular, these include the further development of production processes in combination with a reduced use of materials, improvements to solar cells, such as increasing the efficiency, as well as the use of new semiconductors that enable increased energy yields to be achieved for the same material consumption. In addition, there have been production standardisations, particularly in terms of the system components, cabling, mounting systems, junction boxes and so on, along with considerable technological improvements in the inverter sector.

However, without the contribution made by science, none of this would have been possible. In addition to the EEG-induced demand for PV systems, Germany has also done much to promote the development of PV through targeted support for research and development projects as part of research funding programmes. Industry-oriented solar research institutes, German manufacturers of solar cells, solar modules and system components and, in particular, the

// Focus

// Abb. 4: Die Einspeisevergütung nach dem EEG als Indikator für die Kostenentwicklung von Solarstrom (Stand 1.1.2012).

// Fig. 4: Feed-in tariff according to the EEG as an indicator for the cost development of solar power (as of 1 January 2012).



gebracht. Die industrienahen Solarforschungsinstitute und die deutschen Hersteller von Solarzellen, Solarmodulen und Systemkomponenten sowie vor allem die deutsche Zulieferindustrie, die schlüsselfertige Produktionsanlagen für Solarzellen in die ganze Welt liefert, konnten sich so eine global führende Position erarbeiten. Diese gilt es auch weiterhin im internationalen Wettbewerb zu verteidigen.

// Die Techniken der Photovoltaik

Im März 1958 starteten die USA ihren zweiten Weltraumsatelliten Vanguard 1, die ehemalige UdSSR im Juni 1958 ihren dritten Satelliten, Sputnik 3. Diese beiden Flugkörper markieren den Beginn des Einsatzes von Solarzellen im Weltraum.

Die Solarzellen beider Satelliten waren aus dünnen Scheiben hochreinen kristallinen Siliziums – Siliziumwafern – hergestellt. Das Silizium wirkt als Absorber. Licht, das auf den Siliziumwafer trifft, wird aufgenommen und setzt im Inneren des Materials negative und positive Ladungsträger frei. Diese werden in einem elektrischen Feld getrennt und fließen zur Vorder- bzw. Rückseite des Wafers. Dort werden sie auf metallischen Sammelkontakten, je einem für die positiven und die negativen Ladungen, zusammengefasst. Die Elemente „Absorber“ (im Absorber entstehendes „elektrisches Feld“) sowie „Front- und Rückseitenkontakte“ finden sich in jeder Solarzelle.

Die Absorber der meisten Solarzellen sind auch heute noch Siliziumwafer, bierdeckelgroße Scheiben aus hochreinem, ca. 50 bis 250 µm dickem Silizium. Das elektrische Feld wird durch oberflächliches Einbringen der Fremdatome Bor bzw. Phosphor erzeugt. Die Kontakte aus Silber bzw. Aluminium werden im Siebdruck aufgebracht und anschließend eingebrannt.

Nach dem Prozess der Zellfertigung werden die einzelnen Solarzellen elektrisch miteinander verschaltet und zwischen zwei Glasscheiben bzw. zwischen eine Glasscheibe und eine Rückseitenfolie einlaminiert. So entsteht das „Solarmodul“, in dem die Solarzellen für einen stabilen Betrieb über mindestens 20 Jahre gegen Regen, Hagel und UV-Strahlung geschützt sind. Solarmodule haben typischerweise eine Fläche von 0,7 bis 1,6 m², bei Bedarf werden auch kleinere oder größere Formate gefertigt.

German supply industry, which supplies turnkey production systems for solar cells throughout the world, have all managed to carve out a globally leading position. It is essential that Germany continues to defend this position in the face of international competition.

// Photovoltaic technologies

In March 1958, the USA launched their second space satellite, Vanguard 1, and in June 1958, the former USSR launched their third satellite, Sputnik 3. The two satellites marked the first time that solar cells were used in outer space.

The solar cells from both satellites were produced from thin discs of high-purity crystalline silicon – silicon wafers. The silicon acts as an absorber. Light that is incident on the silicon wafers is captured and releases negative and positive charge carriers within the material. These are separated in an electrical field and flow to the front and rear sides of the respective wafers. There they are collected by metallic bus bars – one for the positive and one for the negative charges. The absorber (or the “electrical field” within the absorber) as well as the “front and rear contacts” can be found in every solar cell.

Most solar cells still use silicon wafers as absorbers today. They come in the form of panes the size of a beer mat, made of high-purity silicon and are roughly 50 to 250 micrometres thick. The electrical field is created by applying foreign boron or phosphor atoms to the surface. The silver or aluminium contacts are screen-printed on the surface and then fired on.

Once the cells are produced, the individual solar cells are electrically connected to one another and laminated between two glass panes or between a glass pane and a rear film. This therefore creates a “solar module” in which the solar cells are protected against rain, hail and UV radiation for at least 20 years. Solar modules typically have a surface area between 0.7 and 1.6 m², but smaller or larger sizes can be produced if required.

Since solar cells were invented, scientists have experimented with replacing the silicon wafer with other absorber materials, since crystalline silicon has to be relatively thick for physical- and pro-

Seit Erfindung der Solarzellen haben Wissenschaftler damit experimentiert, den Siliziumwafer durch andere Absorbermaterialien zu ersetzen, denn kristallines Silizium muss aus physikalischen und fertigungstechnischen Gründen relativ dick sein. 180 μm sind die heutige Standarddicke, 100 μm werden langfristig angestrebt. Damit werden heute 7 kg Silizium für Solarmodule mit einer Nennleistung von 1 kW gebraucht. Wenn es gelänge, Solarzellen mit deutlich dünneren Absorbern herzustellen, wären hohe Kosteneinsparungen möglich, da die hochreinen Absorbermaterialien teuer sind.

// Dünne Schichten

Drei alternative Absorbermaterialien werden neben kristallinem Silizium für die Herstellung von Solarzellen eingesetzt: amorphes Silizium (a-Si) bzw. eine Kombination aus amorphem und mikrokristallinem Silizium (a-Si/ $\mu\text{c-Si}$), der Verbindungshalbleiter Cadmiumtellurid (CdTe) und ein Verbindungshalbleiter aus Kupfer, Indium, Gallium und Selen (abgekürzt CIS oder CIGS). Solarzellen aus den genannten drei Materialien heißen Dünnschichtsolarmodule, weil die Absorber jeweils nur wenige Mikrometer stark sind. Nur 0,2 kg der Halbleitermaterialien werden für Module mit einer Leistung von 1 kW als Absorber benötigt. Diese Absorber sind nicht wie Siliziumwafer selbsttragend, sondern sie werden auf Trägern, meist auf Glasscheiben, abgeschieden. Die Abscheidungsverfahren in Vakuumkammern sind aus der Architekturglasbeschichtung und der Fertigung von Flachbildschirmen bekannt.

Damit unterscheidet sich die Herstellung von Dünnschichtmodulen grundsätzlich von der Wafersilizium-Technologie. Nicht mehr die einzelne Zelle, sondern ein Solarmodul mit schon verschalteten Zellen wird prozessiert: Kontaktflächen, Absorber und weitere Zwischenschichten werden in integrierten Prozessen auf großen Glasscheiben abgeschieden. Abschließend werden die Schichten durch Lamination einer zweiten Glasplatte zum fertigen Solarmodul verbunden (siehe Abb. 5). Alle drei oben genannten Dünnschicht-Techniken sind zu industrieller Reife gelangt. Im Jahr 2010 wurden weltweit PV-Module mit den Absorbern a-Si, CdTe oder CIGS mit einer Gesamtleistung von 2.262 MW produziert, die einen Anteil von 13 % an der gesamten Jahresproduktion von Solarmodulen hatten (siehe Tab. 1).

Die gleichzeitige Existenz von kristalliner Silizium-Wafertechnik und drei Dünnschicht-Techniken im Wettbewerb nach Jahrzehnten der Entwicklung ist bemerkenswert. Sie spricht für das solide technische Konzept jedes dieser Ansätze und stabilisiert damit den Industriesektor als Ganzen. Die mittelfristigen Aussichten der Dünnschicht-Techniken werden von der PV-Industrie im Moment mit Blick auf die technisch-wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit recht positiv eingeschätzt (siehe auch Abb. 6).

duction-related reasons. 180 μm is the current standard thickness, but the aim is to achieve a thickness of 100 μm in the long term. 7 kg of silicon is currently required for solar modules with a rated output of 1 kW. If solar cells can be manufactured with considerably thinner absorbers, this would enable considerable cost savings to be made, since high-purity absorber materials are expensive.

// Thin films

In addition to crystalline silicon, three alternative absorber materials are used for manufacturing solar cells: amorphous silicon (a-Si) or a combination of amorphous and microcrystalline silicon (a-Si/ $\mu\text{c-Si}$), the compound semiconductor cadmium telluride (CdTe) or a compound semiconductor made of copper, indium, gallium and selenium (CIS or CIGS for short). Solar cells made from the three aforementioned materials are called thin-film solar cells because the absorbers are only a few micrometres thick. Only 0.2 kg of the semiconductor materials is required as the absorber for modules with an output of 1 kW. These absorbers are not self-supporting like silicon wafers but are deposited on substrates, which are mostly glass panes. The deposition process used in vacuum chambers is derived from architectural glass coating processes and the production of flat-screen displays.

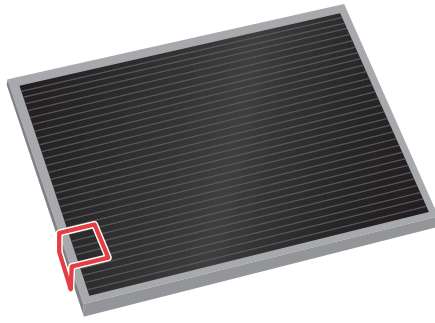
The manufacture of thin-film modules therefore differs fundamentally from the manufacture of silicon-based technology. Individual cells are no longer processed but, instead, solar modules, with already interconnected cells, whereby the contact surfaces, absorber and additional intermediate layers are deposited on large glass panes in integrated processes. The layers are then laminated together under a second glass panel to form a finished solar module (see Fig. 5). All three aforementioned thin-film technologies have reached industrial maturity. In 2010, the total global production of photovoltaic modules with a-Si, CdTe and CIGS absorbers amounted to 2,262 MW, which comprised 13% of the total annual production of solar modules (see Table 1).

The simultaneous existence of crystalline silicon wafer technology with three rival thin-film technologies after decades of development is remarkable. It speaks for the solid technical concept behind each of these approaches and thus stabilises the industrial sector as a whole. The PV industry is currently very positive about the medium-term prospects for thin-film technologies in terms of their technical and economic competitiveness (see Fig. 6).

// ZSW: 20 years of research on thin-film solar modules

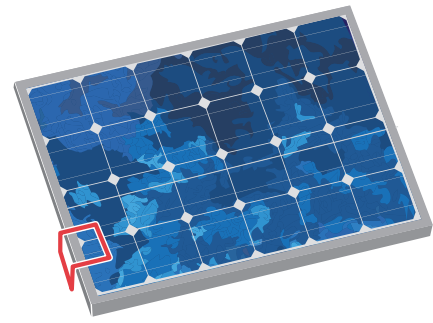
Since its foundation in 1988, the ZSW has made a major contribution to the development of thin-film PV. The research and development was focused on CIS and CIGS solar modules right from the beginning. In 1999, the technology developed at ZSW for

Thin film

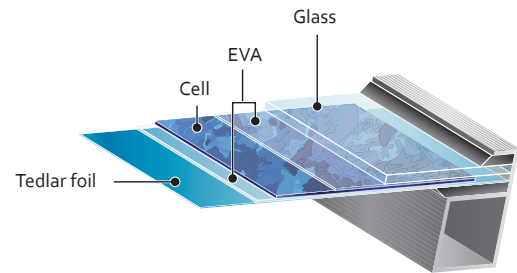
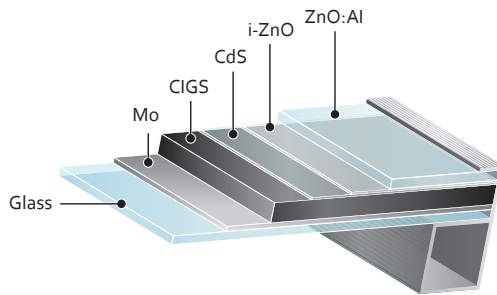


Module technologies

Crystalline silicon



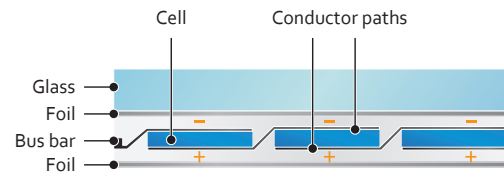
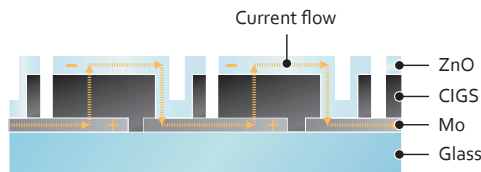
Module structure



Comparison of absorber thickness



Interconnection of cells



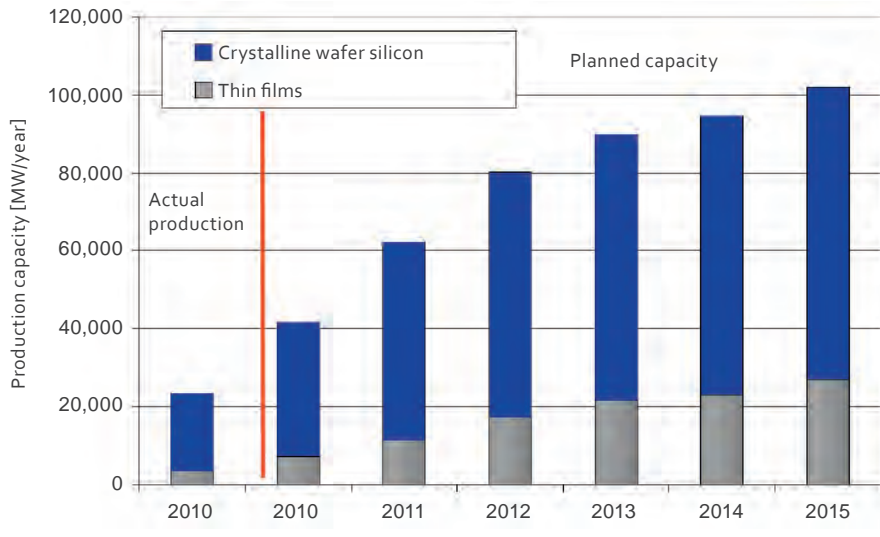
// Abb. 5: Vergleich des Aufbaus von Solarmodulen aus kristallinem Silizium und in Dünnschicht-Technologie.
 // Fig. 5: Comparison of the structure of solar modules made from crystalline silicon and using thin-film technology.

	Production 2010 ¹	Module efficiency 2010 ²	Module efficiency target 2016–2025 ³
c-Si mono	6,438 MW	14–20%	> 21%
c-Si poly	8,700 MW	12–17%	> 19%
CdTe	1,392 MW	10–12%	16%
a-Si	522 MW	7–10%	> 13%
CIGS	348 MW	12–13%	16–17%

// Tab. 1: Produktionsmengen und Wirkungsgrade industriell gefertigter Solarmodule der verschiedenen Technologien.

// Table 1: Production volumes and efficiencies of industrially produced solar modules for each of the various technologies.

Quellen/Sources: (1) Paula Mints, Principal Analyst Solar Services Program, Navigant; (2) PV Status Report 2011, A. Jäger-Waldau, JRC-Institute for Energy, European Commission; (3) A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology, Edition 2, European Commission 2011.



// Abb. 6: Jährliche Produktionskapazitäten von Dünnschicht- und Wafersilizium-Modulen. Die Zahlen für 2010–2015 sind aus den veröffentlichten Plänen zu Produktionsausweitungen abgeleitet.
 // Fig. 6: Annual production capacities of thin-film and wafer silicon modules. The figures for 2010–2015 are derived from the published production expansion plans.

Quelle/ Source: PV Status Report 2011, A. Jäger-Waldau, JRC-Institute for Energy, European Commission.

// ZSW: 20 Jahre Forschung für Dünnschichtsolarmodule

Zur Entwicklung der Dünnschicht-PV konnte das ZSW seit seiner Gründung im Jahr 1988 erheblich beitragen. Forschung und Entwicklung waren von Beginn an auf CIS- bzw. CIGS-Solarmodule fokussiert. Im Jahr 1999 wurde die am ZSW entwickelte Technik der Herstellung in Vakuumaufdampfungen an die Firma Würth Solar übertragen. Diese produziert Solarmodule seit dem Jahr 2000, zuletzt mit einer Jahreskapazität von 30 MW. Das ZSW war an der Entwicklung der Technik zur Produktionsreife kontinuierlich beteiligt. Ende 2011 hat die Manz AG in Reutlingen die Produktionslinie und das Produktions-Know-how von Würth Solar übernommen. Die Manz AG wird die CIGS-Technologie mit dem ZSW weiterentwickeln und bietet schlüsselfertige Produktionsanlagen für CIGS-Solarmodule an.

// CIGS-Solarzellen mit höchsten Wirkungsgraden

Der Weltrekord für den Wirkungsgrad einer Dünnschichtzelle wird seit 2010 vom ZSW gehalten. Er beträgt 20,3 % für eine Laborzelle (siehe Abb. 7). Ein Vergleich mit den besten Ergebnissen anderer Solarzellentechniken zeigt: Auf einem monokristallinen Siliziumwafer hat eine Forschergruppe der University of New South Wales in Australien 1998 den bis heute bestehenden Weltrekord für eine Siliziumzelle mit 25,0 % erzielt. Bei kostengünstigerem polykristallinem Silizium werden hingegen bisher 20,4 % erreicht. Damit liegt die CIGS-Technologie fast gleichauf mit der verbreitetsten und günstigsten polykristallinen Siliziumtechnologie. Die Rekordwerte im Labor lassen darauf schließen, dass auch bei kommerziell erhältlichen CIGS-Modulen noch deutliche Wirkungsgradsteigerungen möglich sind.

Für Mehrschichtzellen auf kristallinem Germanium bzw. Galliumarsenid erreichte die US-Firma Spectrolab 2009 mit Strahlungskonzentration einen Wirkungsgrad von 41,6 % (Prog. Photovoltaic: Res. Appl. 2011; 19:84–92). Dies ist der absolut höchste Wirkungsgrad, der je mit einer Solarzelle erzielt wurde. Noch ist der Einsatz von Solarzellen mit Strahlungskonzentratoren erst im Prototypstadium. Ein zukünftiger industrieller Einsatz der Technik wird aufgrund der Mehrkosten für die zusätzlich nötige Nachführung eher in den sehr sonnenreichen Standorten der Welt erfolgen.

manufacturing in vacuum deposition plants was transferred to the Würth Solar company. The company has been producing solar modules since the year 2000, most recently with an annual capacity of 30 MW. ZSW has been continually involved in the development of the technology to production readiness. At the end of 2011, Manz AG in Reutlingen took over the production line and the production know-how from Würth Solar. Manz AG, which will continue to develop the CIGS technology together with ZSW, offers turnkey production systems for CIGS solar modules.

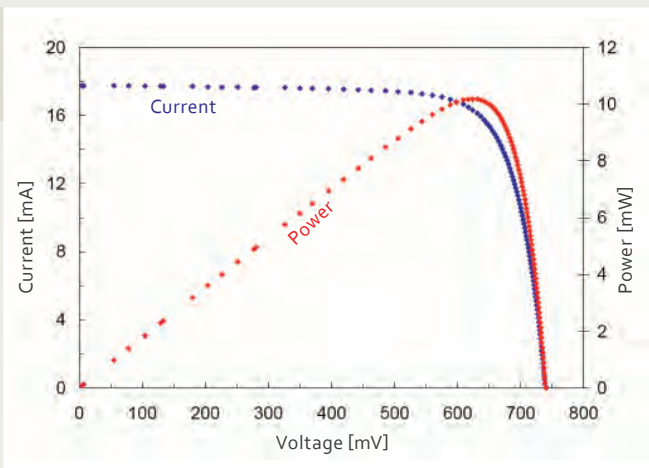
// CIGS solar cells with maximum efficiencies

The world efficiency record for thin-film cells has been held by ZSW since 2010. It amounts to 20.3% for a laboratory cell (see Fig. 7). A comparison with the best results from other solar cell technologies shows: in 1998, a research group from the University of New South Wales in Australia achieved an efficiency value of 25.0% using a monocrystalline silicon wafer, which still remains the world record for a silicon cell until this day. However, a value of 20.4% has been achieved with cheaper polycrystalline silicon. CIGS technology is therefore almost on an equal footing with the most widespread and cheapest polycrystalline silicon technology – and the record values in the laboratory indicate that considerable increases in efficiency are also still possible with commercially available CIGS modules.

In 2009, the US company Spectrolab achieved an efficiency of 41.6% with irradiation concentration using multi-junction cells made of crystalline germanium and gallium arsenide (Prog. Photovoltaic: Res. Appl. 2011; 19:84–92). This is the highest efficiency to have ever been achieved for a solar cell. The use of solar cells with irradiation concentrators is still at the prototype stage. Because of the extra costs for the additionally required tracking system, the future industrial use of the technology is more likely in very sun-rich locations in the world.

// New deposition processes, substrate materials and absorbers

ZSW is also researching alternative materials and processes for solar cells with the aim of further reducing PV costs, reducing the materials required, conserving resources and opening up new application fields. To achieve the best efficiencies, thin-film solar



// Abb. 7: Kennlinie der weltbesten CIGS-Solarzelle, hergestellt 2010 am ZSW (zugleich weltbeste Dünnschichtszelle mit 20,3 % Wirkungsgrad). Messung zertifiziert durch das Fraunhofer ISE.

// Fig. 7: Characteristic curve of the world's best CIS solar cell, which was produced at ZSW in 2010 (also the world's best thin-film solar cell with 20.3% efficiency). The measurement has been certified by Fraunhofer ISE.

// Neue Abscheidungsverfahren, Trägermaterialien und Absorber

Zur weiteren Kostenreduktion in der PV, zur Verringerung des Materialeinsatzes, zur Schonung der Ressourcen und zur Erschließung neuer Anwendungsfelder erforscht das ZSW auch alternative Materialien und Prozesse für Solarzellen. Für beste Wirkungsgrade werden Dünnschichtszellen im Vakuum bei hohen Temperaturen auf Glas abgeschieden. Vakuumkammern sind technisch aufwendig, und die Abschreibungen für die Fertigungsanlagen stellen nach den Materialkosten einen wesentlichen Anteil der gesamten Produktionskosten dar. Um die Kosten zu senken, kommen Druckverfahren in Frage, die gegenüber Aufdampfverfahren zwei wesentliche Vorteile bieten: Die Materialausbeute beim Abscheidungsprozess wird erhöht und ein Vakuum im Prozess ist nicht mehr notwendig (siehe Abb. 8).

Ein weiterer Weg zur Senkung von Fertigungskosten ist die Verwendung flexibler Träger wie dünne Stahlbleche oder Polymerfolien, die von der Rolle verarbeitet werden können. Im Technikum des ZSW wird auf einer Beschichtungsanlage für 30 cm breites Polyimidband die Prozesstechnik für die gleichzeitige Abscheidung eines

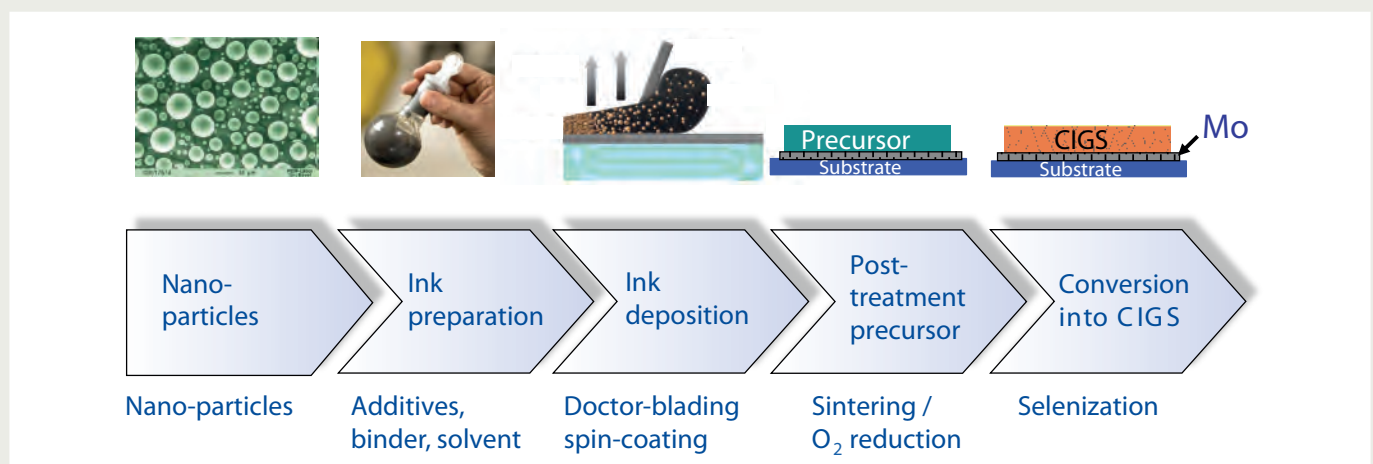
cells are deposited on glass in a vacuum at high temperatures. Vacuum chambers are technically complicated and, in addition to the material costs, the depreciation of the production plants represents a considerable proportion of the overall production costs. In order to lower the costs, an alternative is provided by printing processes that offer two major advantages compared with vapour deposition processes: the material yield is increased during the deposition process and a vacuum is no longer required in the process (see Fig. 8).

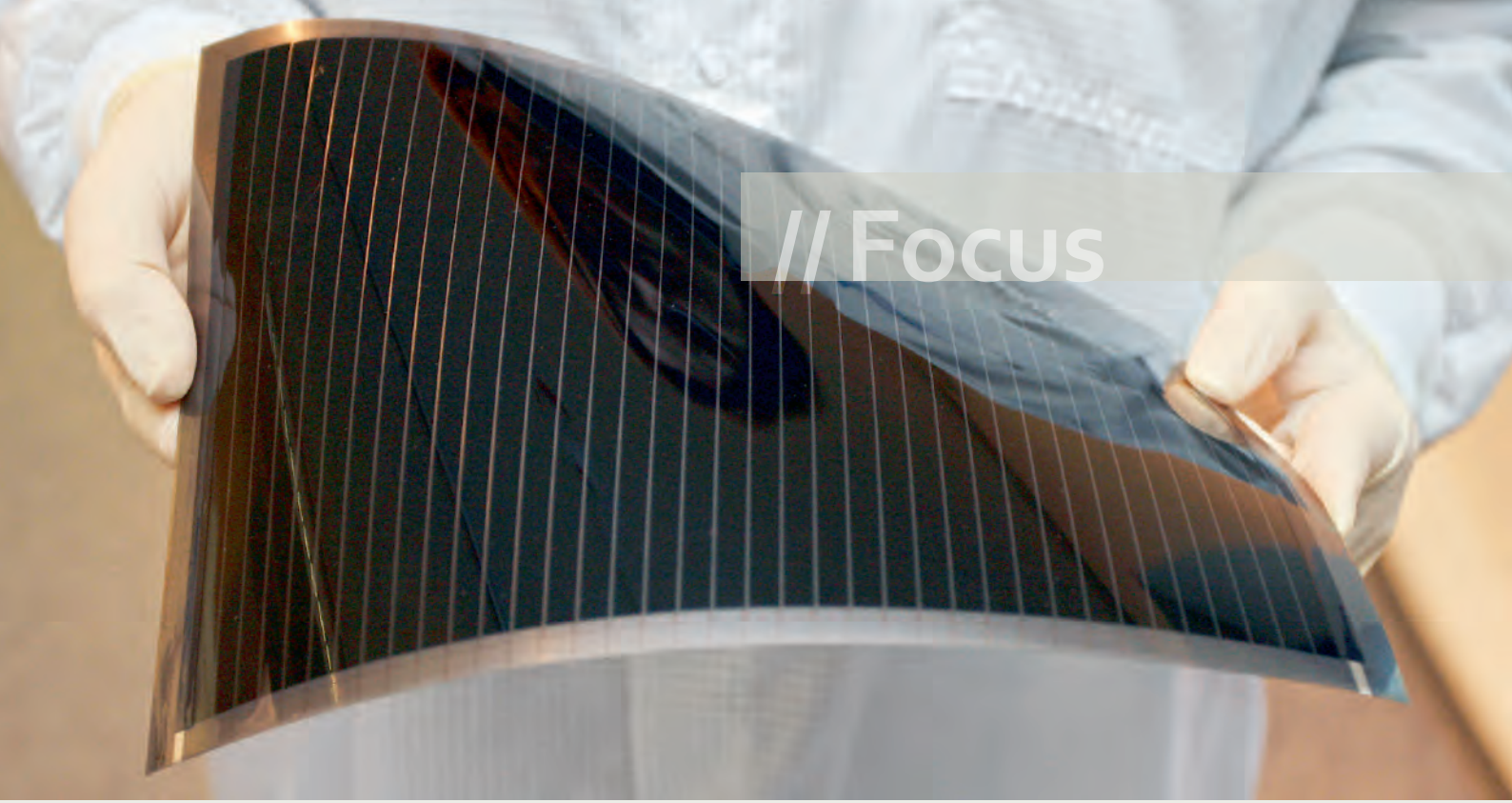
A further way to reduce production costs is to use flexible substrates such as thin steel sheeting or polymer films that can be processed from rolls. In ZSW's technical lab, the process technology for simultaneously depositing the molybdenum rear contact (by means of cathode sputtering), the absorber (simultaneous evaporation of copper, indium and gallium in a selenium atmosphere) and the front contact (cathode sputtering of zinc oxide) is being developed on a coating plant for 30 cm-wide polyimide film. Here the substrate film continually passes through the various processing stations within a single vacuum chamber. If the intermediate layer between the absorber and the front contact can also be integrated into the process, this will enable a kilometre-long strip of functioning solar cells to be produced that can then be cut and processed to form solar modules.

Thin, enamelled steel strips can also be processed using this roll-to-roll process. The best solar cells that have been produced on enamelled steel in ZSW's laboratory have an efficiency of 17.6% and the best small-scale module consisting of several individual

// Abb. 8: Prinzipbild eines Druckverfahrens für den CIGS-Absorber: Aus einer Suspension sehr kleiner Partikel der Ausgangsmaterialien wird mit Additiven eine druckbare Tinte hergestellt. Diese wird nach dem Aufbringen auf einen Träger wie etwa molybdänbeschichtetes Glas gesintert und anschließend unter Selenatmosphäre zu polykristallinem CIGS umgewandelt.

// Fig. 8: Diagram depicting the printing process used for CIGS absorbers: A suspension of nano-sized precursor materials is mixed with additives to produce a printable ink. Once this ink has been applied to a substrate, such as molybdenum-coated glass, it is sintered and then converted into polycrystalline CIGS in a selenium atmosphere.





// Focus

// Abb. 9: Flexibles Solarmodul auf Metallfolie aus dem ZSW-Labor.
// Fig. 9: Flexible solar module on metal foil from the ZSW laboratory.

Rückkontaktes aus Molybdän (durch Kathodenzerstäubung), des Absorbers (gleichzeitiges Verdampfen von Kupfer, Indium und Gallium in Selenatmosphäre) sowie des Frontkontaktes (Kathodenzerstäubung von Zinkoxid) entwickelt. Die Trägerfolie durchläuft dabei in einer einzigen Vakuumkammer kontinuierlich die verschiedenen Bearbeitungsstationen. Wenn im nächsten Schritt auch noch das Aufbringen der Zwischenschicht zwischen Absorber und Frontkontakt in den Prozess integriert ist, lässt sich ein kilometerlanges Band mit funktionsfähigen Solarzellen herstellen, das anschließend geschnitten und zu Solarmodulen verarbeitet werden kann.

Auch dünnes emailliertes Stahlband kann mit diesem Rolle-zu-Rolle-Verfahren verarbeitet werden. Die beste Solarzelle, die im ZSW-Labor auf emailliertem Stahl hergestellt wurde, hat einen Wirkungsgrad von 17,6 %, das beste integriert aus mehreren Einzelzellen verschaltete Kleinmodul erreicht schon sehr respektable 14,5 %. Die flexiblen Trägermaterialien bieten aber nicht nur Vorteile im Herstellungsprozess, sondern ermöglichen auch die Erschließung neuer Anwendungsfelder (z. B. abrollbare Photovoltaikdachbahnen und mobile Anwendungen; siehe Abb. 9).

Halbleiter aus organischen Verbindungen sind heute Standardtechnik in farbigen Smartphone-Bildschirmen. Damit können aber auch Bauelemente hergestellt werden, die Sonnenlicht in Strom wandeln. Auch hier gilt, dass Solarzellen aus organischen Halbleitern bei niedrigen Temperaturen ohne Vakuumtechnik großflächig auf verschiedenen – auch flexiblen – Trägermaterialien aufgebaut werden können. Die japanische Firma Mitsubishi Chemical erzielte im Juni 2010 den bisher höchsten Wirkungsgrad für eine organische Solarzelle mit 10,1 %. Noch werden also die Energiewandlungswirkungsgrade von polykristallinen Dünnschichtzellen nicht erreicht. Das Wissen über optimierte Bauelementstrukturen und Abscheideverfahren, die mikroskopische Struktur der verwendeten Materialien und ihre chemischen und elektronischen Eigen-

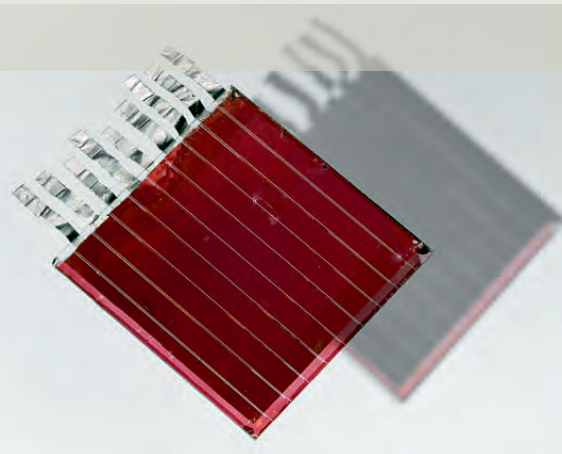
cells connected together has already achieved a respectable 14.5%. The flexible substrate materials not only offer advantages in terms of the production process but also open up new fields of application such as rollable PV roof membranes and mobile applications (see Fig. 9).

Semiconductors from organic compounds now provide the standard technology in coloured smart phone displays. However, these also enable components to be produced that convert sunlight into electricity: here, too, solar cells made of organic semiconductors can be extensively applied to various – including flexible – substrate materials at low temperatures and without vacuum technology. In June 2010, the Japanese company Mitsubishi Chemical achieved the highest efficiency to date for an organic solar cell with a value of 10.1%. Although the energy conversion efficiency achieved by polycrystalline thin-film cells has yet to be equalled, knowledge about optimised component structures and deposition processes as well as the microscopic structure of the materials used and their chemical and electronic properties is increasing rapidly. In this regard, ZSW is conducting research on the cell physics, efficiency improvements and scaling up the production processes, including the development of prototypes (see Fig. 10).

// Solar module tests as a ZSW service

Tests on the performance and stability of solar modules by independent testing facilities are essential for buyers, manufacturers and project developers.

In technical terms, the measurements are relatively complex: for physical reasons, it is not possible to “replicate” the sun – as the actual energy source – in the laboratory, since the light from laboratory lamps has a different wavelength distribution. Because, however, the efficiency of solar cells depends on the wavelength of the incident



// Abb. 10: Beispiel für ein Solarmodul mit organischem Absorber aus dem ZSW-Labor.
// Fig. 10: Example of a solar module with an organic absorber from the ZSW laboratory.



// Abb. 11: Solargeneratoren auf dem Testfeld des ZSW.
// Fig. 11: Solar generators at the ZSW testing facility.

schaften vermehrt sich aber rasch. Das ZSW erforscht hierbei verschiedene Aspekte der Zellphysik, der Wirkungsgradsteigerung und der Aufskalierung der Herstellungsprozesse bis hin zur Prototyp-Entwicklung (siehe Abb. 10).

// Solarmodultests als Dienstleistung des ZSW

Tests der Leistungsfähigkeit und der Stabilität von Solarmodulen durch unabhängige Prüfeinrichtungen sind für Käufer, Hersteller und Projektentwickler unverzichtbar.

Technisch sind die Messungen vergleichsweise aufwendig, was mehrere Gründe hat: Die Sonne als die eigentliche Energiequelle kann im Labor aus physikalischen Gründen nicht „nachgebaut“ werden, denn das Licht von Laborleuchten weist eine andere Wellenlängenverteilung auf. Weil der Wirkungsgrad einer Solarzelle aber von der Wellenlänge des auftreffenden Lichtes abhängt, müssen Umrechnungsverfahren die Brücke zwischen Labor und Realität bilden. Die Verfahren sind spezifisch für die verschiedenen Solarzellentypen. So verhalten sich etwa Solarmodule mit kristallinen Siliziumzellen anders als Dünnschichtmodule.

Nun könnte man Solarmodule natürlich im Freien vermessen. Die Wellenlänge des Lichtes ist dort aber von der Tages- und Jahreszeit, vom Wassergehalt der Atmosphäre und von der Bewölkung abhängig. Damit ist die Anzahl der Jahresstunden, an denen bei reproduzierbaren Lichtverhältnissen im Freiland gemessen werden kann, sehr klein. Deshalb schafft man reproduzierbare Messbedingungen im Labor und überprüft diese kontinuierlich anhand von Freilandmessungen (siehe Abb. 11). Weiterhin kann die Lebensdauer von Solarmodulen – mehr als 20 Jahre – nicht direkt gemessen werden. Jeder Lebensdauertest muss also unter Stressbedingungen für das Solarmodul erfolgen, die ein beschleunigtes Altern simulieren. Solche Testverfahren sind international standardisiert. Die schnelle Fortentwicklung der Modultechnik erfordert aber eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Testverfahren und der Methoden zur Interpretation der Ergebnisse. Nur so können die Risiken, die jede neue Technik für Hersteller, Nutzer und die Umwelt birgt, quantitativ erfasst und minimiert werden.

light, the conversion procedures have to bridge the gap between the laboratory and reality. The procedures are specifically designed for the various solar cell types. For example, solar modules with crystalline silicon cells behave differently to thin-film modules.

Of course, you could measure solar modules outdoors. However, the wavelength of the light outside depends on the time of day and the season, the water content of the atmosphere and the amount of clouds. This means that the number of hours in the year in which reproducible light conditions can be measured outdoors is very small. For this reason, reproducible measurement conditions are created in the laboratory and these are checked regularly using outdoor measurements. Furthermore, the service life of solar modules – which is more than 20 years – cannot be measured directly. This means that every service life test has to be conducted under stress conditions that simulate accelerated ageing. Such test procedures are internationally standardised. However, the rapid progression of module technology requires continual further development of the test procedures and methods for interpreting the results. It is only then that the risks that every new technology harbours for manufacturers, users and the environment can be quantitatively recorded and minimised.

Since 1989, ZSW has operated a test facility for solar modules and solar power systems in Widderstall near Merklingen in the Swabian Mountains. The site, which is located around 750 metres above sea level, is characterised by excellent solar irradiance conditions and cold winters with considerable amounts of snow. Here, solar power systems with inverters are operated as electric stand-alone or on-grid systems, and the energy yields of various PV technologies are recorded in direct comparison. On behalf of manufacturers and financial institutions, solar modules are continually measured as part of international comparison tests. The data on the performance behaviour or ageing effects are documented for later evaluation in databases.

In December 2011, ZSW's testing possibilities were expanded with an additional test facility near Barcelona. Here, tests on solar modules and generators can be conducted throughout the year with an irradiance that is one and a half times that in southern Germany.

Das ZSW betreibt seit 1989 ein Testfeld für Solarmodule und Solarsysteme in Widderstall bei Merklingen auf der Schwäbischen Alb. Der Standort auf ca. 750 m über dem Meeresspiegel ist durch sehr gute Sonneneinstrahlungsbedingungen und kalte, schnee-reiche Winter charakterisiert. Hier werden Solarsysteme mit Wechselrichtern im elektrischen Inselmodus oder in Netzeinbindung betrieben und die Energieerträge verschiedener Solartechniken im direkten Vergleich erfasst. Solarmodule werden im Rahmen internationaler Vergleichstests, im Auftrag von Herstellern oder Finanzinstitutionen kontinuierlich vermessen und die Daten zu Leistungsverhalten oder Alterungseffekten für die spätere Auswertung in Datenbanken dokumentiert.

Im Dezember 2011 wurden die Prüfmöglichkeiten des ZSW durch ein Testfeld bei Barcelona erweitert. Hier können ganzjährig und mit gegenüber Süddeutschland eineinhalbfach höherer Einstrahlung Untersuchungen an Solarmodulen und -systemen durchgeführt werden.

Im Institutsgebäude in Stuttgart besteht seit 2010 ein Testlabor speziell für Dünnschichtmodule. Sonnensimulatoren, Klimakammern und Anlagen zur mechanischen und elektrischen Belastung von Modulen stehen für Standardtests, kundenspezifische Prüfungen und entwicklungsbegleitende Untersuchungen zur Verfügung.

// Netzeinbindung und Speichermanagement von Solarstrom

Die Stromerzeugung von PV-Anlagen folgt zeitlich direkt dem Verlauf der Sonneneinstrahlung und nicht der Lastkurve der Stromverbraucher. Das ist kein Problem, solange der Anteil an der Stromerzeugung gering ist und weitere, in ihrer Leistung steuerbare Stromquellen im Elektrizitätsnetz zur Verfügung stehen. Mit einem zunehmenden Anteil von Solarstrom in den Verteilnetzen stellen sich aber die technisch sehr anspruchsvollen Fragen der Netzeinbindung immer dringlicher.

Neben Lastmanagement und Netzausbau sind Speicher eine wichtige Option, um Stromerzeugung und -bedarf aufeinander abzustimmen. Im Zusammenspiel mit der PV sind insbesondere Batteriespeicher eine vielversprechende, am ZSW intensiv erforschte Technologie. Die Speicherung kann den Wert des Solarstroms erhöhen, indem sie eine fluktuierende „erzeugungsdefinierte“ Energiequelle in eine abrufbare „nachfragedefinierte“ Energiequelle umwandelt. Der „Eigenverbrauch“ und damit die Speicherung von photovoltaisch erzeugtem Strom am Ort der Erzeugung wird interessant aufgrund der rapide sinkenden Stromerzeugungskosten aus Photovoltaik, bei denen Photovoltaikstrom vielerorts günstiger wird als der Bezugspreis von Haushaltsstrom. Dieser Zusammenhang wird vielfach mit dem Erreichen von „grid parity“ (Netzparität) bezeichnet. Weiterhin wurde zum 1.1.2012 mit dem System der „Marktprämie“ eine neue Form des gezielten Anreizes zur bedarfsgerechten Strom-einspeisung in das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) aufge-



A test laboratory specifically for thin-film modules has been housed in the institute's building in Stuttgart since 2010. Solar simulators, climate chambers and systems for mechanical and electrical loads are available for standard tests, customer-specific investigations and tests on solar modules during the development phase.

// Grid connection and storage management of solar power

Photovoltaic systems generate electricity in direct chronological relation to the course of solar radiation and not the load curve of the electricity consumer. This is not a problem as long as the overall share of the electricity produced by the photovoltaic systems remains small, and additional electricity sources are available in the grid whose output can be controlled. However, as the share of solar power in the distribution networks becomes larger, the considerable technical complexities relating to the grid connection are becoming an increasingly pressing issue.

In addition to load management and grid expansion, storage systems provide an important option for matching the generation of electricity with the demand. In conjunction with PV, battery storage systems in particular provide a highly promising technology that is being intensely researched at ZSW. Storage can increase the value of the solar power by converting a fluctuating, generation-defined energy source into a retrievable, demand-defined energy source. With the advent of "grid parity", the self-consumption of locally generated electricity provides economical benefit. "Grid parity" in this context is reached when cost from PV-generated energy begins to be lower than that of electricity supplied by the utilities to the customer. In addition, the "market premium" system introduced with the Renewable Energy Sources Act (EEG) on 1 January 2012 offers a new form of targeted incentives for feeding demand-oriented electricity into the grid. In a pool with other renewable energies, new marketing strategies (for example sales during high-price phases) can also provide an interesting option for photovoltaic and battery storage systems. Photovoltaic systems that feed electricity decentrally into the distribution

Power Balancing

Large scale power plants



Fossil & nuclear

Off-shore wind

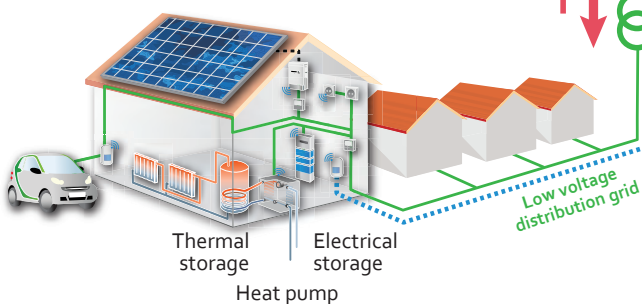
Distributed fluctuating generation



Photovoltaics

On-shore wind

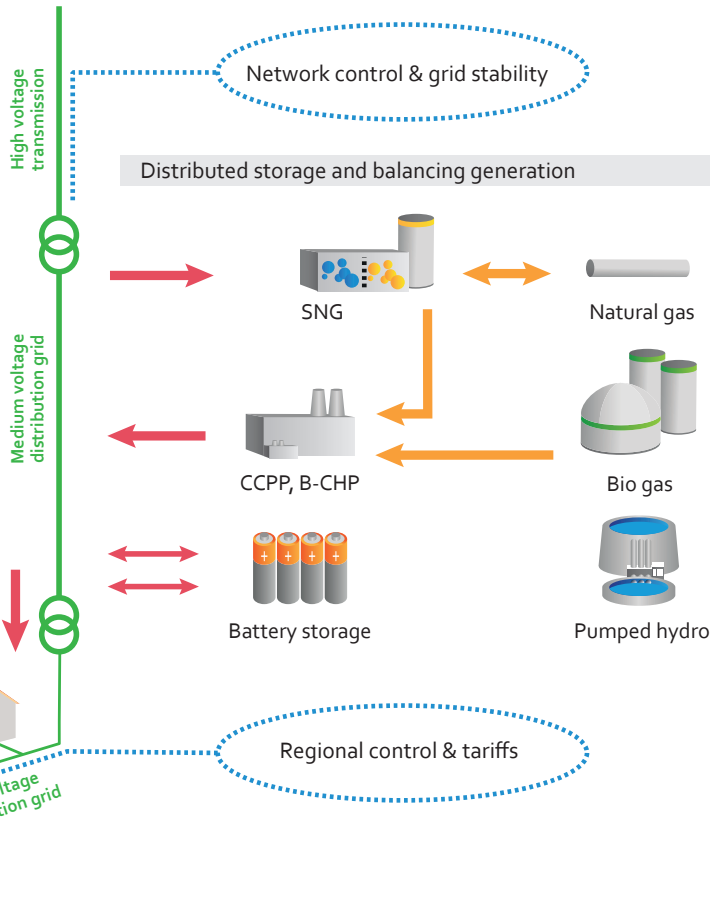
Local generation, storage and load management



Thermal storage

Electrical storage

Heat pump



// Abb. 12: Veranschaulichung der Lastflüsse und Kommunikationswege im Energiesystem zur Angleichung der zum Teil fluktuierenden Erzeugung und des zeitabhängigen Verbrauchs durch Speicherung (SNG: Substitute Natural Gas / erneuerbares Methan), Lastmanagement und schnell regelbare Stromerzeugung (balancing generation) durch Gaskraftwerke (CCPP: Combined Cycle Power Plant = GuD) oder Blockheizkraftwerke (B-CHP: Block-type Combined Heat and Power = BHKW).

// Fig. 12: Diagram depicting the load flows and communication routes in the energy system for balancing the partly fluctuating generation and time-dependent consumption of electricity by means of storage (SNG: Substitute Natural Gas / renewable methane), load management and rapid power balancing using CCPP (Combined Cycle Power Plant) and B-CHP (Block-type Combined Heat and Power) plants.

nommen. Im Pool mit anderen erneuerbaren Energien können neue Vermarktungsstrategien (z. B. Verkauf während hochpreisiger Phasen) auch für PV-Anlagen und Batteriespeicher eine interessante Option darstellen. Photovoltaische Stromerzeuger, die dezentral in Verteilnetze einspeisen und bei Netzstörungen mit ihrem eigenen Speicher einen elektrischen Inselbetrieb aufrechterhalten, können einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Stromversorgung leisten und damit Produktivität, Sicherheit und Nutzerkomfort deutlich verbessern.

Das ZSW untersucht gemeinsam mit Stromversorgern, Wechselrichter- und Batterieherstellern sowie Forschungseinrichtungen die Technik und Anwendbarkeit von verschiedenen Speicherarten im Zusammenhang mit Regelungen in den Verteilnetzen und im Übertragungsnetz. Dabei kommt der Verteilung, Erzeugung und intelligenter Steuerung (Smart Grid) eine besondere Bedeutung zu. Wie in Abb. 12 dargestellt, können dezentrale Speicher zur Netzentlastung eingesetzt werden. Verbraucherseitig werden Haushaltsgeräte und auch die Wärmeversorgung eingebunden. Besonders die auch am ZSW entwickelten Lithium-Ionen-Batterien werden als lokale Stromspeicher im Zusammenspiel mit dem Stromnetz optimiert. Die Technologien von Erzeugung, Verteilung und Speicherung werden am ZSW zusammen mit ökonomischen und systemanalytischen Aspekten fachgebiets- und standortübergreifend erforscht.

grids, and which can maintain stand-alone electrical operation in the event of grid disruptions through using their own storage systems, can make an important contribution to improving the electricity supply and thus considerably improve productivity, safety and convenience for the user.

Together with power suppliers, inverter and battery manufacturers as well as research institutions, ZSW is investigating the technology for various types of storage and their applicability in conjunction with control systems in the distribution and transmission grids. Here an important role is played by the generation, distribution and intelligent control of electricity (smart grid). As shown in Fig. 12, decentralised storage systems can be used to reduce the loads in the grid. On the load side, both household appliances and heat supplies will be incorporated. In particular, the lithium-ion batteries newly developed by ZSW will be optimised as local electricity storage systems in interaction with the electricity grid. ZSW is conducting interdisciplinary and multi-site research into the generation, distribution and storage technologies in conjunction with economic and system-analytical aspects.

// Authors

Prof. Dr. Michael Powalla
Maike Schmidt

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