



// Photovoltaik: Vielseitig. Nachhaltig. Wettbewerbsfähig.
Photovoltaics: Versatile. Sustainable. Competitive.

// Photovoltaik

Vielseitig. Nachhaltig. Wettbewerbsfähig.



// Photovoltaics

Versatile. Sustainable. Competitive.

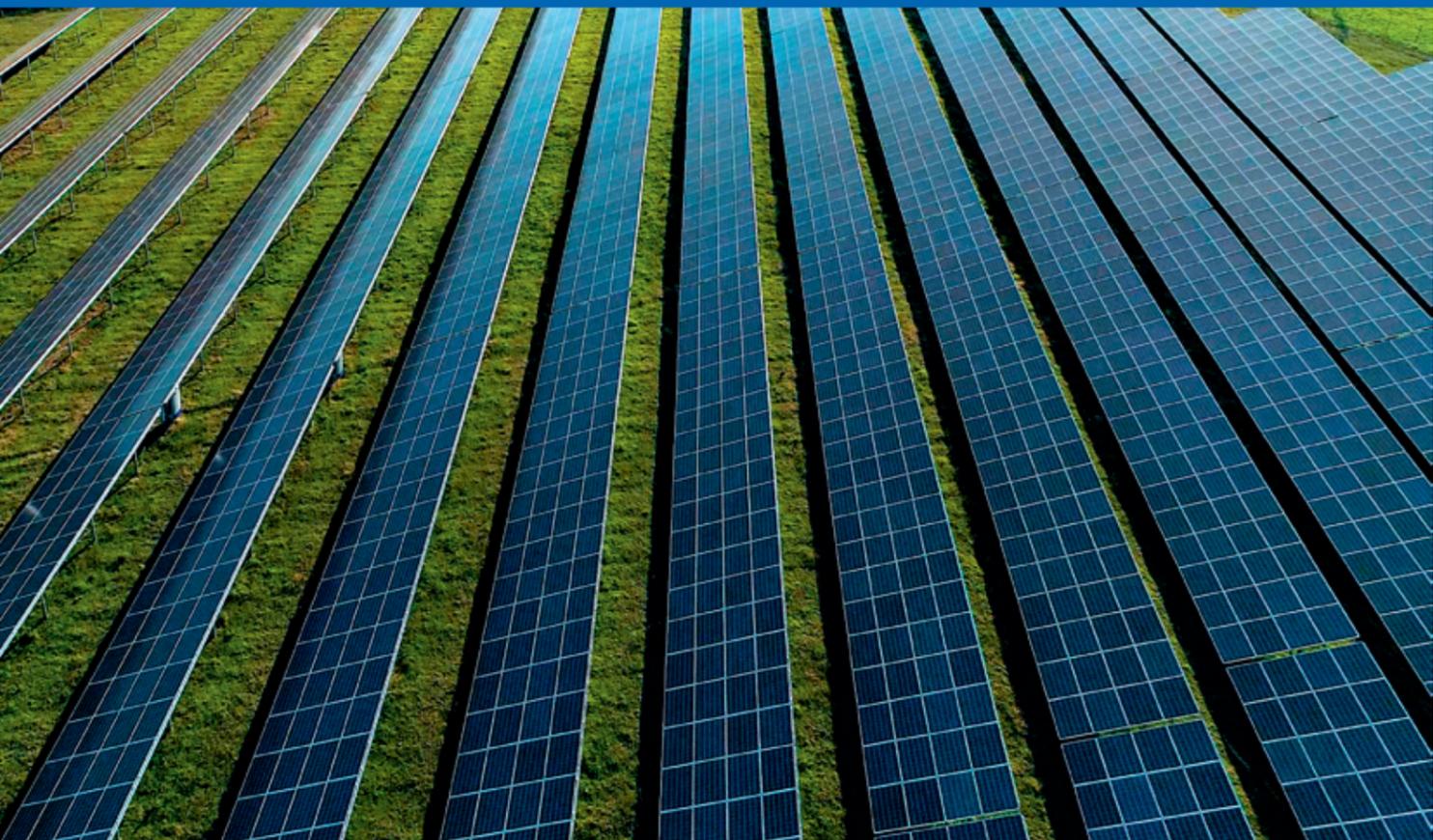
// Management Summary

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

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

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





Vorteile der Solarstromerzeugung

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

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

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

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

Advantages of solar power production

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

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

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

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

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

Marktentwicklung in Deutschland und weltweit

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

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

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

Market development in Germany and worldwide

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

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

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

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

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

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

Technologische Entwicklungspotenziale der Photovoltaik

Überblick über die Photovoltaik-Technologien

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

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

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

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

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

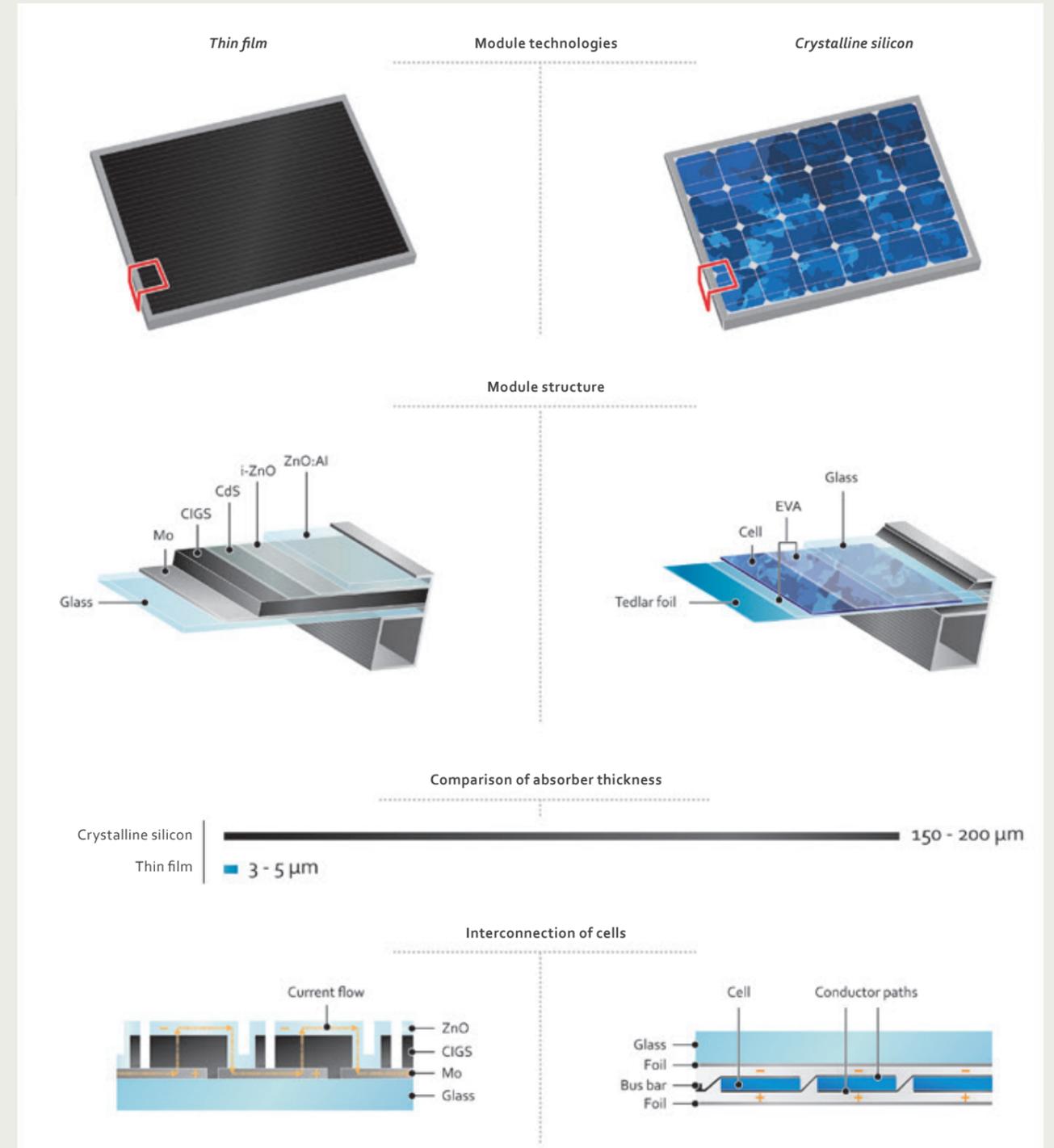
Technological development potential of photovoltaics

Overview of photovoltaic technologies

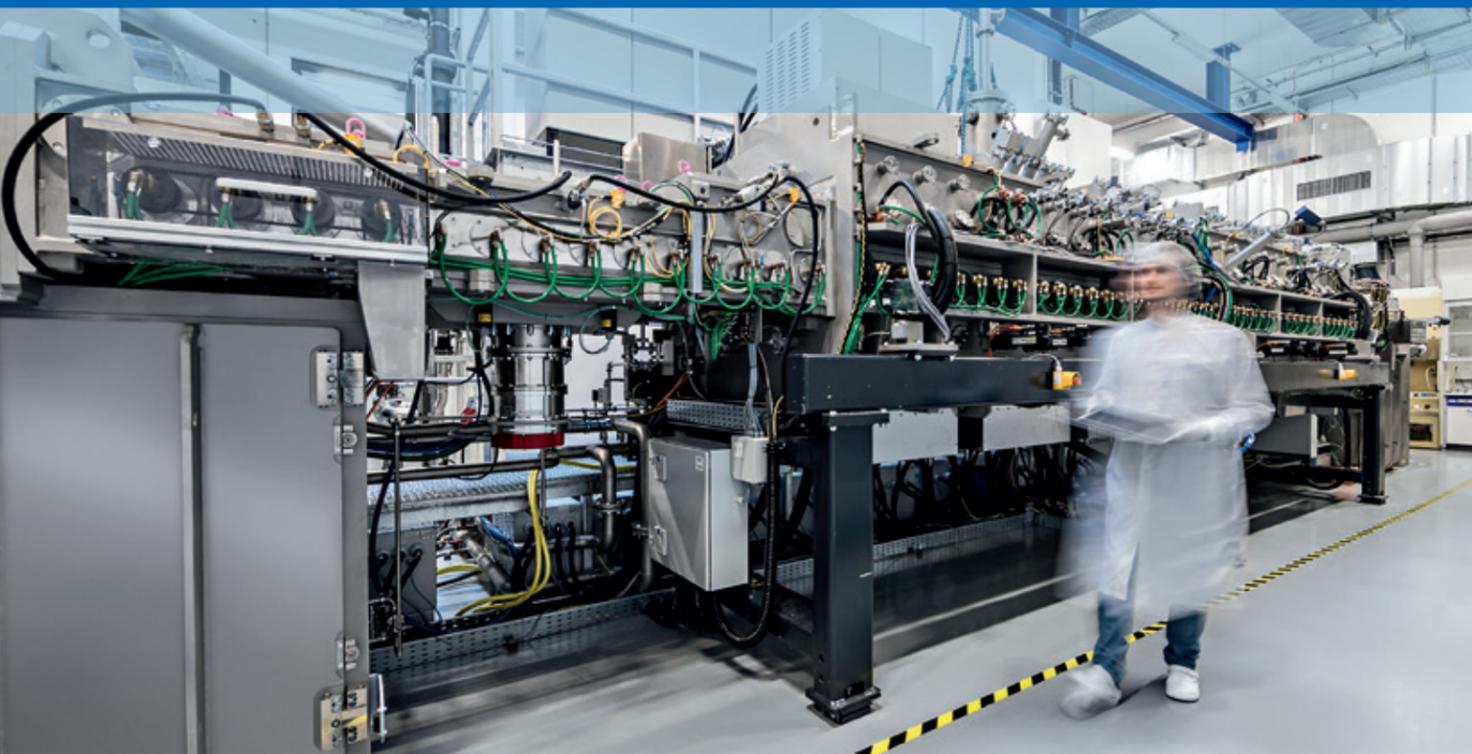
Semiconductor materials suitable for industrial applications today are silicon, gallium arsenide and compound semiconductors made of cadmium telluride (CdTe) or copper, indium, gallium and selenium (abbreviated CIGS). The most important semiconductor material is silicon, which was used for just over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

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

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



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



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

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

Wirkungsgradentwicklung

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

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

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

Development of efficiency

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

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

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

// Focus



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

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

Alternative Substrate für Dünnschichttechnologien

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

Alternative substrates for thin-film technologies

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

Technologieentwicklung für die nächste Generation

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

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

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

Technology development for the next generation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Anwendung und Wirtschaftlichkeit der Photovoltaik

Gebäudeintegrierte Photovoltaik

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

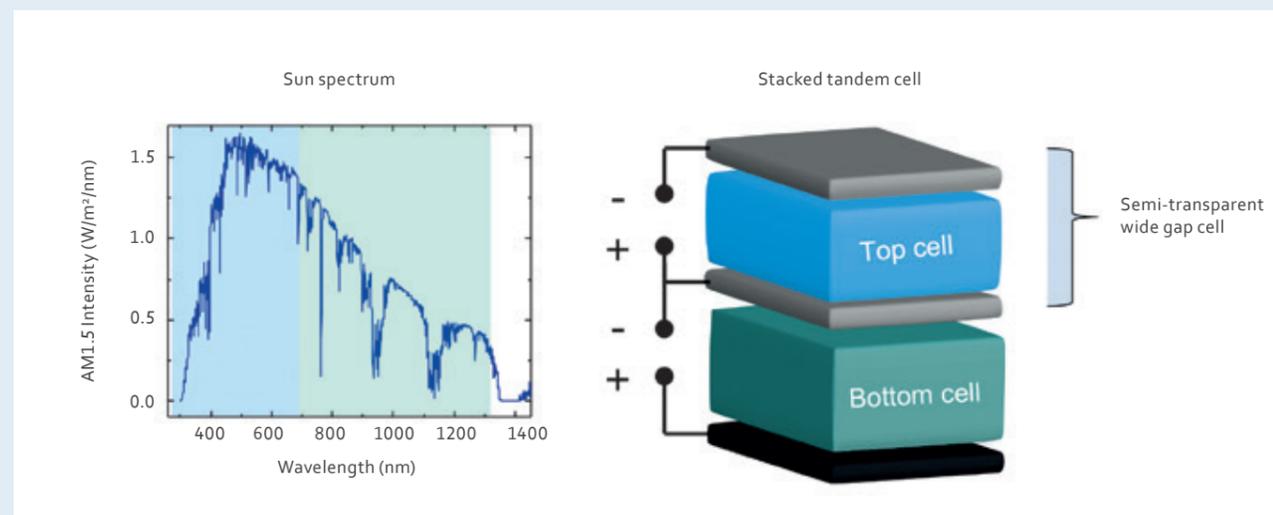
Studien zufolge beträgt in Städten die für die BIPV zusätzlich ökonomisch nutzbare Fassadenfläche im Mittel etwa zehn Prozent der wirtschaftlich nutzbaren Dachfläche in Deutschland. Bei Ge-

The application and economic efficiency of photovoltaics

Building-integrated photovoltaic systems

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

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



// Genormtes Sonnenspektrum (AM 1.5) und schematischer Aufbau einer Tandemsolarzelle. Die beiden Subzellen nutzen vor allem die entsprechend farbig markierten Bereiche des Spektrums und können damit einen höheren Gesamtwirkungsgrad erreichen. Als obere Zelle kann eine semitransparente Perowskit-Zelle (blau) ideal mit einer Silizium- oder CIGS-Basiszelle (grün) kombiniert werden.

// Standardised solar spectrum (AM 1.5) and schematic structure of a tandem solar cell. The two subcells primarily use the correspondingly coloured areas of the spectrum and can thus achieve a higher overall efficiency. For the upper cell, it is ideal to combine a semi-transparent perovskite cell (blue) with a silicon or CIGS base cell (green).

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

Wirtschaftlichkeit und Qualitätssicherung von PV-Anlagen

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

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

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

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

Efficiency and quality assurance for PV systems

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

Solarstrom im Energiesystem

Solarstrom im Zusammenspiel mit der Windenergie

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

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

Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr

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

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

Solar power in the energy system

Solar power in combination with wind energy

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

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

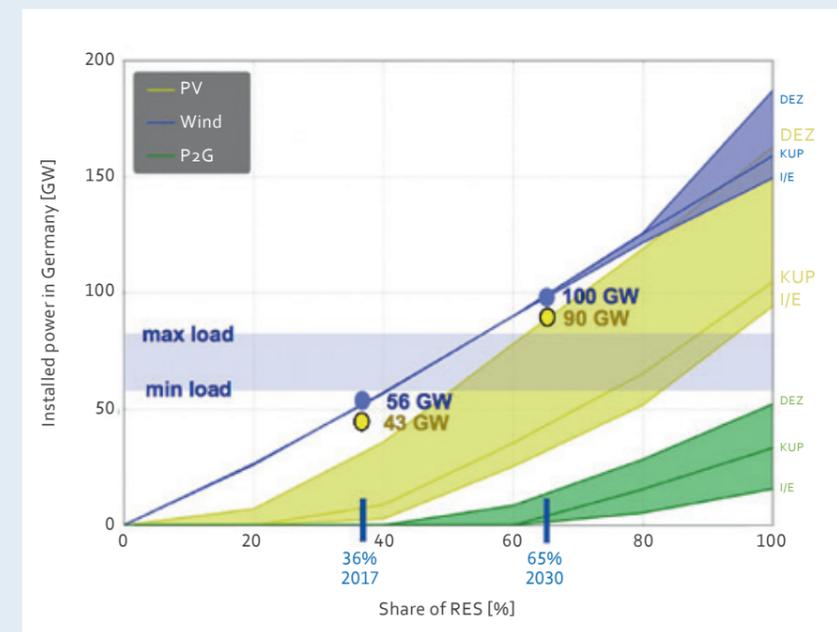
Coupling the power, heat and transport sectors

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

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

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

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



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

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

Optimierung der Netzintegration

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

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

Optimisation of grid integration

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

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

Stuttgart

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

Solar-Testfeld Widderstall

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

Ulm

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

Ulm eLaB

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

www.zsw-bw.de

info@zsw-bw.de



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