

## Photovoltaik

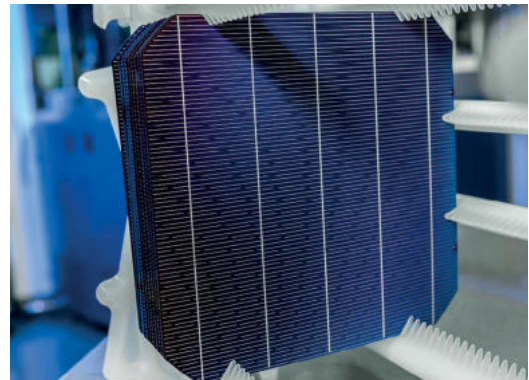
**Links: Mehrfachsolarzelle** aus III-V-Halbleitern und Silizium, die 33,3 % des Sonnenlichts in Strom wandelt.

© Fraunhofer ISE / Foto: Dirk Mahler

**Rechts:**

**PERC-Solarzelle mit 21,2%**

Bei der mit industriellen Prozessen hergestellten PERC-Solarzelle (Passivated Emitter and Rear Cell) wird der Silizium Wafer auf der Rückseite durch dielektrische Schichten passiviert. © ISFH



### Kontakte

#### DLR

Dr. Martin Vehse  
Tel.: 0441/99906-218  
martin.vehse@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Dr. Philipp Strauß  
(Systemtechnik, Netzintegration)  
Tel.: 0561/7294-144  
philipp.strauss@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Dr. Harry Wirth  
(Module und Kraftwerke)  
Tel.: 0761/4588-5858  
harry.wirth@ise.fraunhofer.de

Dr. Olivier Stalter  
(Leistungselektronik)  
Tel.: 0761/4588-5467  
olivier.stalter@ise.fraunhofer.de

Prof. Dr. Stefan Glunz  
(Grundlagen und Konzepte für höchsteffiziente Solarzellen, III-V und Konzentratorzellen)  
Tel.: 0761/4588-5191  
stefan.glunz@ise.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Ralf Preu  
(PV Produktionstechnologie)  
Tel.: 0761/4588-5260  
ralf.preu@ise.fraunhofer.de

Dr. Uli Würfel  
(Farbstoff-Solarzellen, organische und neuartige Solarzellen)  
Tel.: 0761/203-4796  
uli.wuerfel@ise.fraunhofer.de

#### HZB

Prof. Dr. Bernd Rech  
(Silizium und Perowskit Grundlagen und Technologie)  
Tel.: 030/8062-41331  
bernd.rech@helmholtz-berlin.de

Das Sonnenlicht, das auf eine Solarzelle fällt, wird zunächst in der photoaktiven Schicht absorbiert und erzeugt dort Paare von positiven und negativen Ladungsträgern. Durch die spezielle Architektur der Solarzellen werden diese Ladungsträger dann getrennt und über die Kontakte in den äußeren Stromkreis abgeführt. Typischerweise besteht die photoaktive Schicht aus einem Halbleitermaterial.

Der Beitrag der Photovoltaik (PV) zur Stromerzeugung steigt rasant an. Weltweit waren Ende 2017 rund 450 GW an PV-Modulen installiert, davon 42 GW in Deutschland. Im Jahr 2017 deckte die PV 7 % des deutschen Nettostromverbrauchs (Datenquelle: Photovoltaics Report 2018, Fraunhofer ISE). Langfristig wird die Photovoltaik weltweit eine tragende Säule für ein nachhaltiges Energieversorgungssystem bilden.

Vorteile und Bedeutung der PV im Energiesystem:

- + Die Strahlung der Sonne ist unerschöpflich und übersteigt den Energiebedarf um ein Vielfaches.
- + Die Stromerzeugung durch Photovoltaik ist risikolos, emissionsfrei und ermöglicht eine nachhaltige Energieversorgung.
- + PV ist mit Stromgestehungskosten zwischen 3,7 und 11,5 €Cent/kWh in Deutschland wettbewerbsfähig, lukrativ für Investoren und zeigt Potenzial für weitere Kostenreduktion (Datenquelle: Studie zu Stromgestehungskosten, Fraunhofer ISE, 2018).

- + PV hat in Deutschland und weltweit hohe Ausbaupotenziale.
- + PV hat von allen Stromerzeugungstechnologien die höchste Akzeptanz in der Bevölkerung.
- + Modularität der PV-Technik ermöglicht Anlagen nach den jeweiligen Bedürfnissen vor Ort und stufenlose Erweiterung nach Bedarf.
- + Deutschland nimmt weiterhin eine internationale Spitzenstellung als hochqualitativer Forschungs- und Entwicklungsstandort ein.

### Potenziale

Die Preise für PV-Module sind in den letzten 25 Jahren um ca. 96 % gesunken. In Deutschland lässt sich der PV-Strom mit kleinen Aufdachanlagen bereits für unter 12 €Cent/kWh erzeugen und liegt damit deutlich unter dem Bezugsstrompreis für private Haushalte. Der angestrebte Umbau des Energiesystems in Deutschland erfordert eine Photovoltaikinstallation bis in den dreistelligen GW-Bereich und ein jährliches Austauschvolumen von über 5 GW.

Weltweit kopieren zahlreiche Länder die erfolgreiche deutsche Markteinführung, und an vielen netzfernen Einsatzorten ersetzt der PV-Strom den Strom aus Dieselgeneratoren schon aus ökonomischen Gründen.

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Voraussetzung für eine großmaßstäbliche Aktivierung des langjährigen Marktwachstums ist eine gute Integration in das Energiesystem in Verbindung mit weiteren Kostensenkungen. Eine nachhaltig angelegte Forschung unterstützt dabei sowohl Untersuchungen zu den Grundlagen der Materialien und Prozesse als auch Weiterentwicklungen in den konkreten Komponenten (Zellen, Module, Wechselrichter) und Systemen. Zentrale Ziele sind die Steigerung der Wirkungsgrade und

der Modullebensdauer, eine Reduzierung des Materialeinsatzes und hochproduktive Herstellungsverfahren. Da eine abschließende Bewertung der unterschiedlichen Technologieansätze im Hinblick auf langfristige Entwicklungen derzeit noch nicht möglich und der technologische Wettbewerb ein wesentlicher Treiber der Kostenreduktion ist, muss die breitgefächerte Förderung verschiedener Technologien beibehalten werden:



#### Flexible Module aus emailliertem Baustahl:

Emaillierter Baustahl ist dünn und flexibel aber dennoch robust. Als Trägermaterial für effiziente Dünnschichtmodule verbindet er die Vorteile von elektrisch isolierendem aber starrem Glas mit denen einer flexiblen Metallfolie.  
© ZSW

### Grundlagenforschung

Zur Kostensenkung sind auch vollkommen neue physikalische Ansätze zu verfolgen. Exemplarisch dafür sind:

- Entwicklung von Stapelsolarzellen zur günstigeren Ausnutzung des spektral breit verteilten Sonnenlichts
- Entwicklung neuer Bauelementstrukturen von Solarzellen
- Solarzellen mit hochstrukturierten Absorbern und Nanostrukturen in der Fläche zur Verringerung von Reflexionsverlusten, zur Verbesserung der Kristallqualität oder zur Materialeinsparung
- Entwicklung des Photonenmanagements
- neue Materialsysteme und Halbleitertechnologien

### Kristalline Siliziumsolarzellen

Die Silizium-Wafer-Technologie besteht in der Prozessierung von monokristallinen oder multikristallinen Scheiben mit einer Dicke von unter 200  $\mu\text{m}$ .

- + Die kristalline Siliziumtechnologie dominiert weiterhin den deutschen und weltweiten Photovoltaik-Markt aufgrund der großen Fortschritte bei der Steigerung des Solarzellenwirkungsgrades so wie bei der Kostenreduktion in der Herstellung der Siliziumwafer, Solarzellen und Module.
- + Die Silizium-Photovoltaiktechnologie ist über lange Jahre erprobt und zeichnet sich durch eine hohe Zuverlässigkeit aus.

Trotz der enormen Fortschritte dieser Technologie gibt es noch sehr große Kostenreduktionspotenziale, die nur durch Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erschlossen werden können:

- a. Höhere Wirkungsgrade, zum Beispiel durch:
  - neuartige Solarzellenstrukturen mit geringeren optischen und elektrischen Verlusten
  - extrem dünne Beschichtungen zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften
  - Verbesserung der Materialeigenschaften von Silizium
  - Photonenmanagement

- b. Einsparung und Substitution von kostentreibenden Materialien, insbesondere
  - kostenreduzierte Herstellung von Solar-Silizium (Solar-Grade-Si) und sägefreie Wafertechnologien
  - Prozessierung dünnerer Silizium-Wafer (120  $\mu\text{m}$ ) bis hin zu ultradünnen Wafern (< 80  $\mu\text{m}$ )
  - Ersatz von Silber als Leitermaterial
- c. Entwicklung kostengünstiger hochproduktiver Techniken (thermische, nass- und plasmachemische, hochgenaue laser- und druckbasierte Verfahren)

### Dünnschichtsolarmodule

Bei Dünnschichtmodulen bestehen die photoelektrisch aktiven Schichten aus nur wenigen Mikrometer dünnen Materialien, die großflächig abgeschieden werden. Die Technologien arbeiten mit verschiedenen Absorbermaterialien wie CIS-/CIGS, CdTe und GaAs, kristallinem Silizium sowie alternativen Materialien wie Perowskiten und Kesteriten.

- + Dünnschichtmodule benötigen zur Herstellung wenig Energie und Material.
- + Bestimmte Dünnschichttechnologien können auch schwache Lichtverhältnisse gut nutzen und bringen bei hohen Temperaturen gute Leistung.
- + Aufgrund der Effizienzrekorde im Labor gilt die CIGS-Technologie als eine der Dünnschichttechnologien mit dem größten wirtschaftlichen Potenzial.

Kostensenkungen können erreicht werden durch:

- Skalierungseffekte
- optimierte, effizientere Produktionstechnologien
- Verringerung des Materialeinsatzes
- Umsetzung der hohen Laborwirkungsgrade in die Modulproduktion
- direkte Gebäudeintegration
- alternative Substrate (Polyimid- und Stahlfolien) für die Rolle-zu-Rolle-Prozessierung
- Entwicklung und Optimierung neuer Materialien wie Kesterit-Solarzellen

Prof. Dr. Rutger Schlatmann  
(Produktionstechnologie für Silizium, CIGS, Perowskit und Multijunctions)  
Tel.: 030/8062-15680  
rutger.schlatmann@helmholtz-berlin.de

### ISFH

Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel  
Tel.: 05151/999-100  
rolf.brendel@isfh.de

Prof. Dr. Jan Schmidt  
(Materialforschung)  
Tel.: 05151/999-425  
j.schmidt@isfh.de

Dr. Karsten Bothe  
(Charakterisierung & Simulation)  
Tel.: 05151/999-425  
k.bothe@isfh.de

Dr. Thorsten Dullweber  
(Solarzellen & Module)  
Tel.: 05151/999-638  
dullweber@isfh.de

### Jülich

Prof. Dr. Uwe Rau  
Tel.: 02461/61-3791  
u.rau@fz-juelich.de

### KIT

PD Dr. Alexander Colsmann  
(OPV und Perowskit PV)  
Tel.: 0721/608-48587  
alexander.colsmann@kit.edu

PD Dr. Michael Hetterich  
(Kesterite, Perowskit PV, CIGS)  
Tel.: 0721/608-43402  
michael.hetterich@kit.edu

Prof. Dr. Uli Lemmer  
Tel.: 0721/608-42530  
ulrich.lemmer@kit.edu

Dr. Ulrich Paetzold  
(Perowskit PV und Photonenmanagement)  
Tel.: 0721/608-26357  
ulrich.paetzold@kit.edu

Prof. Dr. Bryce S. Richards  
Tel.: 0721/608-26562  
bryce.richards@kit.edu

**Gedruckte Solarmodule:**  
Einfache Prozesse bei niedrigen  
Temperaturen bieten ein hohes  
Kostenreduktionspotenzial.  
© ZAE/EnCN/Kurt Fuchs



### ZAE Bayern

Prof. Dr. Christoph Brabec  
Tel.: 09131/9398-100  
christoph.brabec@zae-bayern.de

Prof. Dr. Vladimir Dyakonov  
Tel.: 0931/70564-0  
vladimir.dyakonov@zae-bayern.de

PD Dr. Hans-Joachim Egelhaaf  
(gedruckte Solarmodule)  
Tel.: 0911/56854-9350  
hans-joachim.egelhaaf@zae-bayern.de

### ZSW

Prof. Dr. Michael Powalla  
Tel.: 0711/7870-263  
michael.powalla@zsw-bw.de

### Organische und gedruckte Solarzellen

Solarzellen auf der Basis von Halbleitergemischen in Lösung können mit Hilfe von Drucktechniken auf flexiblen Substraten großflächig hergestellt werden. Aktuelle Entwicklungen mit einer deutlichen Steigerung der Wirkungsgrade und Lebensdauern zeigen, dass gedruckte Solarmodule auch jenseits von Nischenanwendungen großes Potenzial aufweisen.

- + Organische Solarzellen (OPV) lassen sich in Fassaden einbauen; semi-transparente Module können sogar in Fenster integriert werden.
- + OPV verwenden umweltfreundlicher Rohstoffe, können unproblematisch entsorgt werden und haben niedrige Energierücklaufzeiten von nur wenigen Monaten.

Für die weitere Entwicklung organischer Solarzellen werden folgende Bereiche bearbeitet:

- Evaluierung neuer aus der Flüssigphase prozessierbarer Halbleitersysteme mit verbesserter Anpassung an das Solarspektrum und optimierten Ladungstransporteigenschaften
- Weiterentwicklung selektiver Schichten zwischen Elektrode und Absorber
- Verbesserung bestehender kostengünstiger Solarzellkonzepte und organischer Tandemsolarzellen
- Angepasste Produktionstechnologien wie zum Beispiel Rolle-zu-Rolle-Prozessierung
- Verbindungstechnologie
- Verkapselung insbesondere flexibler Solarzellen
- Verbesserung der Stabilität und Lebensdauer
- Lichtmanagement

### Perowskit-Solarzellen

Die noch junge Technologie nutzt das Know-how zu OPV und deren Aufbau, ersetzt jedoch die lichtabsorbierende Schicht durch Methylammonium-Bleijodid, einem organisch-anorganischen Kristall.

- + Mit Perowskiten werden im Labor Wirkungsgrade von über 20% erzielt, wobei ähnliche und kostengünstige Herstellungsprozesse wie bei der OPV zum Einsatz kommen.

Die beiden größten Herausforderungen auf dem Weg zur Marktreife sind

- die derzeit noch viel zu geringe Langzeitstabilität (u. a. ist der Kristall wasserlöslich)
- die Giftigkeit des Bestandteils Blei, den man möglichst durch einen alternativen Stoff ersetzen sollte.

Für Lösungsvorschläge ist ein tiefer gehendes Verständnis der Wirkungsprinzipien der noch jungen Perowskit-Technologie erforderlich.

### Konzentratorsolarzellen

Bei der PV-Konzentrator-Technologie wird das Sonnenlicht mittels einer Optik gesammelt und auf eine sehr kleine Solarzellenfläche gebündelt.

- + So wird im PV-System teures Halbleitermaterial eingespart und es können die effizientesten Solarzellen (industriell gefertigte Mehrfachsolarzellen auf Basis von III-V-Halbleitern mit über 42% Wirkungsgrad) eingesetzt und die inhärenten Vorteile hoher Ladungsträgergenerationsraten genutzt werden.
- + Die PV-Konzentrator-Technologie eignet sich besonders für Kraftwerke an Standorten mit viel direkter Sonneneinstrahlung.

Zur Kostensenkung werden folgende Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

- Solarzellenstrukturen für höchste Leistungsdichten (bis 2000 Sonnen)
- kostengünstige industrielle Fertigungstechnologien der Solarzellen und der konzentrierenden Optik
- Anpassung von Konzentratoroptik und Solarzelle, innovativer Modulbau
- höhere Wirkungsgrade der Solarzellen
- Erforschung neuer Materialien

### Modultechnologie

- + Nach der elektrischen Verschaltung der Einzelsolarzellen sorgt die Verkapselung dafür, dass Solarmodule auch unter extremen Klimabedingungen langfristig betrieben werden können und ermöglicht die sichere Montage.

Forschungs- und Entwicklungsfragen sind unter anderem:

- Modultechnologien mit deutlich reduzierten Material- und Systemkosten
- Entwicklung von Hochleistungsmodulen mit hohem Flächenenertrag
- verlustarme elektrische Verschaltungsmethoden

- und optisch effiziente Einkapselung
- deutlich gesteigerte technische Lebensdauern der Module für neue PV-Technologien
- Modultechnologien für spezielle Anwendungen, insbesondere für die Gebäudeintegration

### Gebrauchsdauer und Modulprüfung

Die erwartete Langzeitstabilität der Photovoltaik-Module muss für unterschiedlichste Klimabedingungen in geeigneten Alterungstests untersucht werden:

- Analyse und Modellierung von Alterungsmechanismen und deren Wechselwirkung
- Korrelation von natürlicher Alterung, beschleunigter Alterung und Prozessmodellen für die Degradation
- Verbesserung von Prüfverfahren und deren Weiterentwicklung für neue PV-Technologien
- Modellrechnung zur Alterung und zur Schadensbildung bei PV-Modulen

### Photovoltaische Kraftwerke und Systemtechnik

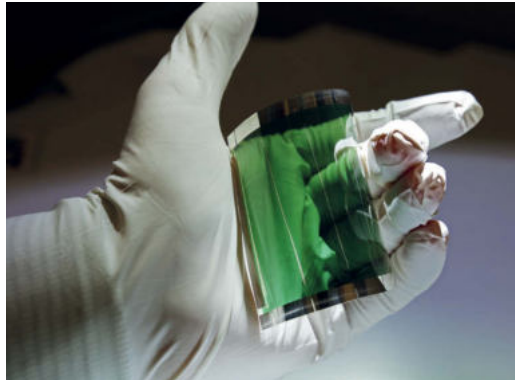
- + Photovoltaische Kraftwerke sind in Deutschland leistungsfähige und zuverlässige Stromlieferanten.
- + Sie werden sowohl in Deutschland als auch weltweit eine tragende Rolle im zukünftigen Energiemix spielen.

Breite Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen sind erforderlich:

- präzise Leistungs- und Ertragsprognosen von PV-Kraftwerken
- Steigerung der Performance Ratio (Verhältnis zwischen maximal möglichem und tatsächlich erreichten Ertrag) insbesondere für neue PV-Technologien
- Verstetigung der Stromproduktion im Tagesverlauf durch Erzeugungs-, Speicher- und Lastmanagement im Verteilnetz
- Technologieentwicklung zur Senkung der Systemkosten bei Material, Montage, Wechselrichter und allgemeine Elektroinstallation.
- Wartung und Zustandsdiagnose von Solarkraftwerken

### PV-Wechselrichter und Smart-Grid

- + Neben der Einspeisung von PV-Energie ins Netz können PV-Wechselrichter auch lokale Energiespeichersysteme steuern und zudem zur Spannungsstabilisierung im Stromnetz und zur Erhöhung der Übertragungskapazität beitragen.
- + Darüber hinaus sollen PV- und Batteriewechselrichter zunehmend netzbildend agieren, um diese Funktion der konventionellen Kraftwerke zu unterstützen, damit sie langfristig ersetzt werden können.



*Sonnenenergie aus Plastikfolien: mechanisch flexibles und semi-transparentes organisches Solarmodul, das auf gewölbten Oberflächen verwendbar ist und Licht durchlässt*  
© KIT

Forschungs- und Entwicklungsfragen sind u.a.:

- angepasste Wechselrichterlösungen zur Optimierung der Lastflüsse zwischen fluktuierenden und regelbaren Erzeugern, zeitabhängigen Verbrauchern und Speichern
- Entwicklung von kostengünstigen multifunktionalen „intelligenten“ Photovoltaik-Wechselrichtern, um lokal und regional die Lastflüsse zwischen fluktuierenden Erzeugern, zeitabhängigen Verbrauchern, Speichern und schnell regelbaren Stromerzeugern zu optimieren
- weitere Kostensenkung von Wechselrichtern sowie Steigerung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer auf das Niveau von PV-Modulen
- Entwicklung von Algorithmen und Simulationen zur Steigerung der Eigenverbrauchsquote beim Zusammenspiel von PV-Anlage, Batteriespeicher und Wärmepumpe sowie für deren netzdienlichen Betrieb
- Neben klassischen Freiflächen- und Aufdachsystemen bieten gebäudeintegrierte Anlagen ein hohes Flächenpotenzial. Um dieses Potenzial effektiv zu nutzen, bedarf es multifunktionaler Fassadenelemente sowie neuer Ansätze zur Verschaltung der Module zur Gebäudeintegration.

### Lebenszyklusanalyse und Recycling

Mit wachsenden Produktionskapazitäten für Solarzellen spielen Fragen des Recyclings, der technischen Lebensdauer und der Energierücklaufzeiten eine wichtige Rolle und sind zunehmend Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsprojekten:

- Reduktion von Material- und Energieeintrag bei der Herstellung
- Wiederverwertbarkeit der photovoltaischen Elemente und Materialien

### Energiemeteorologie

- Solarressourcen-Bewertung und spektral hochaufgelöste Solarstrahlungsdaten für die nächste Generation von PV-Technologien