

## Energie von tausend Sonnen

Mehrfach-Solarzellen mit Konzentratorsystemen nutzen breites Spektrum des Sonnenlichtes



*Ursprünglich wurden Mehrfach-Solarzellen als Energiequellen speziell für die Raumfahrt entwickelt. Ihre Leistung ist hoch, die Herstellung aufwendig. Mit ihren aufeinander abgestimmten Schichten nutzen die Zellen ein viel breiteres Spektrum des Sonnenlichtes als Siliziumzellen.*

*Für die terrestrische Nutzung werden die Mehrfach-Solarzellen mit Konzentratorsystemen kombiniert. Wie in einem Brennglas fokussieren diese einen hundert- bis tausendfach konzentrierten Lichtstrahl auf die stecknadelkopfgroßen Solarzellen. Dazu führt ein Tracker das gesamte System exakt der Sonne nach. Eine neue Rekord-Solarzelle erreicht einen Wirkungsgrad von über 44 Prozent.*

Konzentrator-Photovoltaik (CPV) eignet sich insbesondere für die Stromerzeugung in Gebieten mit hoher direkter Sonneneinstrahlung. Sie erzielt dort doppelt so hohe Wirkungsgrade wie konventionelle Module auf Basis von Silizium-Zellen. CPV wird insbesondere für große Kraftwerkparcs bis 100 Megawatt Leistung eingesetzt. Forschungseinrichtungen wie das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE und Solarfirmen wie AZUR SPACE oder Soitec arbeiten gemeinsam daran, den Wirkungsgrad von Konzentration-Solarzellen zu steigern und die Herstellungskosten zu senken. Sie entwickeln neue Fertigungsverfahren und modifizieren den Aufbau der Solarzellen. Die Aktivitäten umfassen alle Produktionsstufen: Material, Komponenten, Solarzellen, Modul- und Anlagenbau. Damit die Gesamtanlage hocheffizient arbeiten kann, müssen Hochleistungszellen, Optik, Tracker und Steuerung optimal aufeinander abgestimmt werden. Diese engen Wechselwirkungen zwischen den Anlagenkomponenten sind bei Entwicklung, Systemverbesserungen sowie bei der industriellen Produktion zu berücksichtigen.

---

Dieses Forschungsprojekt wurde gefördert vom

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

---

## Mehrfach-Solarzellen bringen Höchstleistung

Herzstück eines CPV-Kraftwerks sind die Mehrfach-Solarzellen. Sie unterscheiden sich im Aufbau und beim Herstellungsprozess grundsätzlich von den verbreiteten Silizium-Solarzellen. Die Mehrfach-Solarzellen bestehen nicht nur aus einem Halbleitermaterial. Bei ihnen werden mehrere Zellen aus unterschiedlichen Halbleitermaterialien der Gruppen III und V des Periodensystems übereinander gestapelt. Eingesetzt werden zum Beispiel Galliumindiumphosphid (GaInP), Galliumindiumarsenid (GaInAs) und Germanium (Ge). Jeder dieser Halbleiter nutzt einen anderen Wellenlängenbereich des Sonnenlichts, um Strom zu erzeugen (Abb. 1). Aus dem Zusammenwirken dieser Teilsolarzellen ergibt sich der hohe Wirkungsgrad. Die Forscher kombinieren die in ihrer Herstellung teuren Zellen mit einer preisgünstigen optischen Konzentration. „Die Verwendung dieser kostengünstigen fokussierenden Optik ermöglicht einen sparsamen Einsatz der vergleichsweise teuren Halbleitermaterialien. Je nach Konzentrationsfaktor benötigt man nur ein Fünftel bis Tausendstel des Halbleitermaterials und erhöht zudem die Effizienz der Solarzelle“, erklärt Dr. Andreas Bett, stellvertretender Leiter des Fraunhofer ISE.

Aktuell erreichen diese Solarzellen einen mittleren Wirkungsgrad von 40 % in der Produktion und bis zu 44,7 % im Labor. Die produzierten CPV-Module kommen auf einen Wirkungsgrad von 32 % und der CPV-System AC-Wirkungsgrad beträgt bis zu 28 %.

Die GaAs-basierenden Mehrfach-Solarzellen verkräften deutlich höhere Temperaturen als Si-basierte Zellen. Damit sie durch die extrem intensive Einstrahlung nicht zu stark aufheizen, wird die Wärmeenergie passiv durch eine geeignete Wärmesenke bzw. durch aktive Kühlung abgeführt.

## Halbleiterstapel nutzt das Sonnenspektrum optimal

Eine typische monolithische Dreifach-Solarzelle besteht aus etwa 30 einzelnen Schichten, die auf einem Ge-Substrat in einem einzigen Prozess einkristallin aufgewachsen werden. In Dreifachzellen wandeln drei Teilsolarzellen verschiedene Bereiche des Lichtspektrums in Strom um. Als Material für die oberste Teilsolarzelle wird GaInP und für die mittlere Teilsolarzelle GaInAs eingesetzt. Das Ge-Substrat wird während des Abscheidungsprozesses aktiviert und dient als dritte Teilsolarzelle. Die drei Zellen sind vertikal angeordnet und intern durch Tunnelioden und weitere funktionale Halbleiterschichten verschaltet. Für das geschichtete Kristallwachstum dieser von 5 bis 8  $\mu\text{m}$  (Größe entspricht Feinstaub) starken Dünnschicht-Solarzellen wird das Verfahren der metallorganischen Gasphasenepitaxie (MOVPE) eingesetzt. Der Abscheidungsprozess erfolgt auf einem Ge-Wafer mit einem Durchmesser von 100 mm. Aus diesem lassen sich 885 Zellen im Format  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  herstellen.

In III-V Mehrfach-Solarzellen werden mehrere Dioden (pn-Übergänge) mit Empfindlichkeit im blauen bis infraroten Spektralbereich übereinander gestapelt.

Um Sonnenlicht künftig noch effizienter und günstiger in Strom umwandeln zu können, soll die nächste Generation dieser Hocheffizienzzellen als Vier- oder Fünffach-Zellen dann vier oder fünf Teilsolarzellen kombinieren.

Seit 1995 werden die III-V Mehrfach-Solarzellen in der Stromversorgung von Satelliten eingesetzt. Aktuell entwickeln die Forscher von AZUR SPACE und Fraunhofer ISE Herstellungsprozesse für die Zellen der nächsten Generation. Sie verbessern diese speziell auf die Bedin-

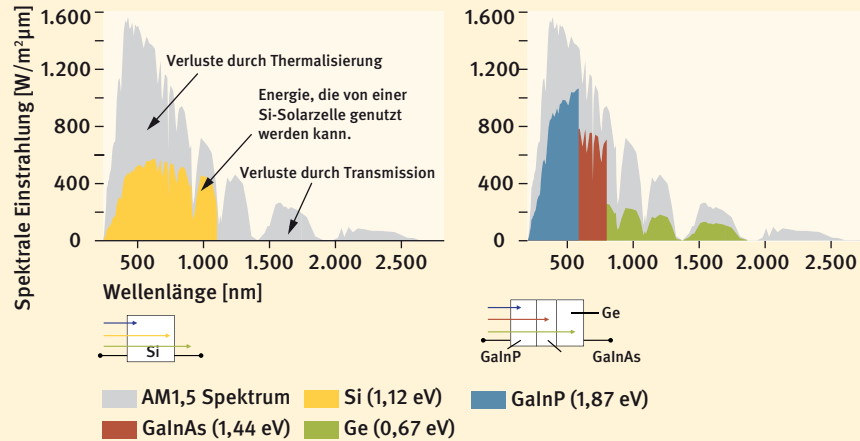


Abb. 1 Bei Mehrfach-Solarzellen ergänzen sich die Teilsolarzellen: jede ist auf einen Teilbereich des Sonnenspektrums spezialisiert. Da sie so einen deutlich größeren Anteil des Sonnenspektrums nutzen, erreichen Mehrfachzellen einen höheren Wirkungsgrad als Silizium-Zellen.

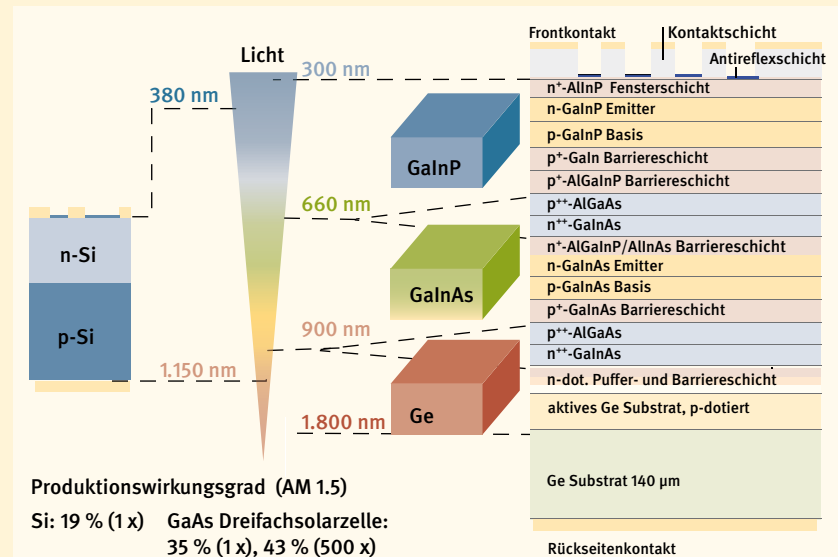


Abb. 2 Vergleich einer Silizium-Solarzelle (links) und einer Solarzelle aus III/V Halbleitern (rechts). Der Regenbogenbalken zeigt, welchen Spektralbereich die Zellen nutzen. Die Dreifachzelle besteht aus bis zu 30 Schichten.

gungen im Weltraum zugeschnittenen Mehrfachzellen weiter. Ihr Ziel ist es, dass diese noch mehr elektrische Leistung pro Fläche generieren, dünner und leichter sind und in der Erdumlaufbahn hochenergetisch geladenen Teilchen besser standhalten.

## Linse und Spiegel bündeln das Licht

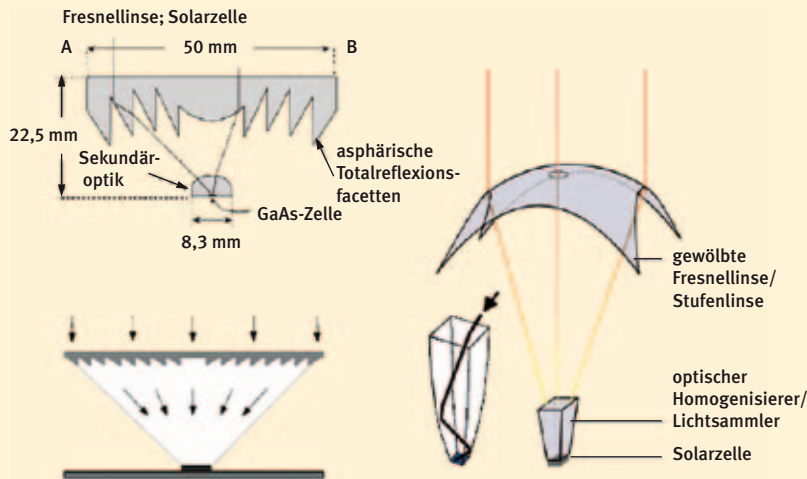
Ein Optik-System konzentriert das Sonnenlicht möglichst effizient, exakt und homogen auf den winzigen Solarzellen. Unter konzentriertem Licht steigt der Wirkungsgrad der Energieumwandlung zusätzlich an.

Hochkonzentrierende Systeme können unterschiedlich aufgebaut sein, entweder als punktfokussierende Systeme mit Linsen und gegebenenfalls zusätzlicher Sekundäroptik oder als zentrale Receiversysteme mit Spiegeloptik, ähnlich den solarthermischen Großanlagen.

Punktfokussierende Module nutzen meist wie das FLATCON®- oder CONCENTRIX™-System Fresnellinsen als Primäroptik und arbeiten mit Konzentrationsfaktoren von 350 – 500. Durch eine zusätzliche Sekundäroptik kann der Wirkungsgrad weiter gesteigert werden (um  $< 1,3\%$  abs. bei FLATCON®). Eine passive Kühlung der metallenen Wärmesenke reicht aus (Abb. 4).

Bei Receiversystemen trifft die Strahlung bis über 1.000fach konzentriert auf ein dichtgepacktes Konzentratormodul, das aktiv gekühlt werden muss.





**Abb. 3** Beispiele für optische Konzentratoren:  
links oben: Totalreflexionslinse mit Sekundärlinse direkt auf der Zelle;  
links unten: Fresnellinse;  
rechts: Fresnel-Dom Linse mit Strahlhomogenisierer/ Lichtsammler.



**Abb. 4** In PV-Konzentratorkraftwerken wird das Sonnenlicht durch Linsen oder Spiegel auf kleine III-V Mehrfachsolarzellen fokussiert. Links eine Anlage mit CONCENTRIX™-Modulen. Rechts eine Anlage mit Parabolspiegeln. Der Receiver wird gekühlt, die anfallende Wärme genutzt.

### Modulbau erfordert höchste Präzision

Die CPV-Systeme müssen dauerhaft hohen thermischen, mechanischen und elektrischen Belastungen standhalten: Energiedichten von über  $100 \text{ W/cm}^2$ , hohe Temperaturen, Temperaturschwankungen sowie Windlasten. Beim Zusammenbau der Module werden die Zellen, die optischen Konzentratoren sowie die Wärmesenken-Einheiten in automatisierten Produktionslinien exakt positioniert und dauerhaft befestigt. Für eine Anlage mit einer Leistung von 1 MW müssen mehr als 2 Millionen Einzelelemente zusammengebaut werden.

### Exakt der Sonnenbahn folgen

Während für niedrig-konzentrierende Photovoltaik (Konzentrationsfaktor unter 50) oft eine einachsige Nachführung mit einer mechanischen Genauigkeit im Grad-Bereich ausreicht, brauchen höher konzentrierende Systeme eine zweiachsige Nachführung. Die Anforderungen an die Genauigkeit und Stabilität hängen von Konzentrationsfaktor und verwendeter Optik ab. Mit einer genauen Steuerung lässt sich für ein 500-fach konzentrierendes System eine mechanische Genauigkeit von besser  $0,1^\circ$  erreichen.

Die Nachführsysteme arbeiten sparsam, die Leistungsaufnahme für den Antrieb liegt im Mittel deutlich unter  $100 \text{ W}$  – bei Systemgrößen im kW-Bereich.

## Forscher optimieren die Zellen

Im Verbundprojekt „Wirtschaftliche Fertigungsfähigkeit für III-V Konzentratordiodenzellen“ (WiFerKon) haben Ingenieure und Wissenschaftler von AZUR SPACE und Fraunhofer ISE die wichtigsten Fertigungsaspekte der Mehrfachsolarzellen, von der Strukturherstellung bis hin zum Zuverlässigkeitsnachweis, unter die Lupe genommen. Im Rahmen dieses Projektes konnte eine CPV-Zelle der 40 %-Klasse mit kostenoptimierter Herstellung entwickelt und erfolgreich in den Markt eingeführt werden. Darüber hinaus wurden die wichtigsten Entwicklungen für eine neue metamorphe Dreifachsolarzelle der nächsten Generation mit einem Zellenwirkungsgrad der 42 %-Klasse gemacht. Die Abscheideraten beim Kristallwachstum (in der sogenannten Epitaxie) wurden gesteigert. Außerdem wurden die Prozesse von bisher eingesetzten Wafern mit einem Durchmesser von  $100 \text{ mm}$  auf das  $150\text{-mm}$ -Format übertragen. Dadurch konnte die Energie- und Kosteneffizienz bei der Herstellung der CPV-Zellen wesentlich gesteigert werden. Die Zellen werden bereits in der Fertigungsanlage produziert, die im Zuge des Projektes in Betrieb genommen wurde.

Das Verbundprojekt „Entwicklung Innovativer und Kostengünstiger Technologien für Höchsteffiziente Solarzellenbaugruppen für Konzentratormodule nächster Generationen“ (InKoTeK) baut auf dem Projekt WiFerKon auf. Ziel ist es, bis 2015 die Herstellungskosten pro Watt auf Modulebene um  $40 \%$  zu senken. Ausgehend von der aktuellen Fertigung bei AZUR SPACE soll die gesamte Wertschöpfungskette vom Substrat über die Epitaxie und Zellfertigung bis zur Baugruppe optimiert werden. Die Forscher entwickeln neue Fertigungsverfahren und modifizieren die Solarzellenstruktur für Wirkungsgrade von über  $41 \%$ . Bereits im Verlauf des Projektes ist klar, dass die Projektziele übertroffen werden. Eine neue Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von  $42 \%$  wurde bereits in die Produktion überführt. Auch angesichts der bei den Fertigungsverfahren für CPV erreichten Fortschritte wird deutlich, dass das Potenzial für höhere Wirkungsgrade und niedrigere Produktionskosten noch nicht ausgeschöpft ist.

### Kraftwerke für sonnenreiche Standorte

Für den Bau von CPV-Kraftwerken sind Gebiete wie der südliche Mittelmeerraum mit hoher Direktstrahlung ( $> 1800 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ ) besonders geeignet. Der Ertrag der Anlagen wird durch die Kombination von exakter Produktion, Lichtführung, Trackersteuerung und Inverter bestimmt. Verglichen mit anderen PV-Systemen liefert CPV über den Tagesverlauf länger einen höheren Ertrag, bedingt durch die höhere Leistung der PV-Zelle und das Tracking (Abb. 4).

Größere CPV-Kraftwerke erreichen Systemwirkungsgrade von über  $25 \%$ . Bis 2013 wurden bereits über  $160 \text{ MW}$  im Sonnengürtel installiert. Besonders stark ist die Technologie in den USA. Dort arbeiten schon Kraftwerke mit über  $30 \text{ MW}$  Leistung. Derzeit wird in Südafrika ein  $44 \text{ MW}$ -Kraftwerk mit der CONCENTRIX™-Technologie von Soitec in Betrieb genommen.

An solchen Standorten werden mit Konzentratordiodenzellen niedrigere Strompreise als mit konventionellen Silizium-Modulen erreicht; das zeigen Wirtschaftlichkeitsberechnungen sowie Leistungswerte bestehender Anlagen.



## Ein Kollektor für Strom und Wärme

Zwei Technologiepfade für die Erzeugung von Strom und Wärme in sonnenreichen Gebieten sind erprobt und verfügbar: Solarthermische Kraftwerke sowie Photovoltaik-Kraftwerke können die hohe Sonneneinstrahlung effizient nutzen. Beide nutzen Spiegel und Optiken als Konzentratorsysteme.

Eine interessante „Mischform“ dieser Technologien stellt die Kombination von PV-Strom- und Wärmeerzeugung in sogenannten CPVT (Concentrator Photovoltaic and Thermal)-Systemen dar. Mit ihnen ist ein Gesamtwirkungsgrad von bis zu 70 % erreichbar, wenn die thermische Energie als Prozesswärme, für solare Kühlung oder thermische Meerwasserentsalzung genutzt werden kann.

Forscher des Fraunhofer ISE untersuchen, wie Optik und Receiver solcher CPVT-Anlagen optimal ausgelegt werden können. Sie entwickeln im Projekt KoMGEn eine neue Konzentratortechnologie, bei welcher der Konzentrationsfaktor durch Spiegeloptiken gesteigert wird. Diese lenken das Licht auf die Solarzellen in einer dicht gepackten, zentralen Empfängereinheit, die von der Optik mechanisch getrennt ist. Über diesen aktiv gekühlten zentralen Empfänger lässt sich die anfallende Wärmeenergie auskoppeln und nutzen.

### Kurze Energierückgewinnungszeit

Die Forscher erwarten, dass GaAs-basierende Mehrfachsolarzellen bis 2020 einen Wirkungsgrad von bis zu 50 % erreichen können. Die CPV ist eine aussichtsreiche Technologie zur kostengünstigen nachhaltigen Stromproduktion, die weiter sinkende Stromgestehungskosten für Regionen mit hoher direkter Sonneneinstrahlung verspricht. Bemerkenswert ist, in welcher kurzen Zeit CPV-Systeme die Energie erzeugen, die zu ihrer Herstellung eingesetzt wurde: Die Energierückgewinnungszeit beträgt beispielsweise bei einem FLATCON®-System weniger als 8 Monate.

## Projektbeteiligte

- » **Wirtschaftliche Fertigungsfähigkeit für III-V Konzentrator-Solarzellen:** Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Dr. Andreas Bett, Freiburg, [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)  
AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Dr. Gerhard Strobl, Dr. Victor Khorenko, [www.azurspace.com](http://www.azurspace.com)
- » **Entwicklung der nächsten Generation von FLATCON Konzentratormodulen**  
Soitec Solar GmbH, Freiburg, Dr. Andreas Gombert, [www.soitec.com](http://www.soitec.com)

## Links

- » [www.cpvconsortium.org](http://www.cpvconsortium.org)
- » [www.innovationsallianz-photovoltaik.de](http://www.innovationsallianz-photovoltaik.de)

## Mehr vom BINE Informationsdienst

- » Photovoltaik-Innovationen. BINE-Themeninfo II/2011
- » Solarthermische Kraftwerke. BINE-Themeninfo II/2013
- » Dieses Projektinfo gibt es auch online und in englischer Sprache unter [www.bine.info](http://www.bine.info) im Bereich Publikationen/Projektinfos.

*BINE Informationsdienst berichtet aus Projekten der Energieforschung in seinen Broschürenreihen und dem Newsletter. Diese erhalten Sie im kostenlosen Abonnement unter [www.bine.info/abo](http://www.bine.info/abo)*

## Impressum

### Projektorganisation

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)  
11055 Berlin

Projekträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Hermann Bastek  
52425 Jülich

### Förderkennzeichen

0325125, 0327567, 0327567A,  
0327662, 0325379A-G

### ISSN

0937 - 8367

### Herausgeber

FIZ Karlsruhe · Leibniz-Institut  
für Informationsinfrastruktur GmbH  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

### Autor

Gerhard Hirn

### Urheberrecht

Titelbild, Abb. 2, Abb. 4 links:  
AZUR SPACE Solar Power GmbH  
Abb. 1, Abb. 3: Fraunhofer ISE  
Abb. 4 rechts: Zenitsolar

Eine Verwendung von Text und  
Abbildungen aus dieser Publikation ist  
nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion  
gestattet. Sprechen Sie uns an.

## Kontakt · Info

Fragen zu diesem Projektinfo?  
Wir helfen Ihnen weiter:

**0228 92379-44**  
**[kontakt@bine.info](mailto:kontakt@bine.info)**

### BINE Informationsdienst

Energieforschung für die Praxis  
Ein Service von FIZ Karlsruhe

Kaiserstraße 185-197  
53113 Bonn  
[www.bine.info](http://www.bine.info)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages