

# Photovoltaik – Forschung und Verfahrensentwicklung im Zeichen der Nachhaltigkeit

Prof. Dr.  
Hans-Werner Schock  
HMI  
hans-werner.schock@hmi.de

Dr. Reiner Klenk  
HMI  
klenk@hmi.de

Dr. Ralf Preu  
Fraunhofer ISE  
ralf.preu@ise.fraunhofer.de

Dr. Johann Springer  
ZSW  
johann.springer@zsw-bw.de

Dr. Jan Schmidt  
ISFH  
j.schmidt@isfh.de

Dr. Wolfhard Beyer  
FZJ  
w.beyer@fz-juelich.de

## Einleitung

In der Solarenergie hat die Photovoltaik das höchste Potenzial für eine Energieversorgung, die die Kriterien der Nachhaltigkeit erfüllt:

- Es gibt wenig Einschränkungen bezüglich der Standortwahl.
- Photovoltaiksysteme können in bestehende bauliche Strukturen leicht integriert werden.
- Die Modularität der Photovoltaik erlaubt, sie in beliebigen Einsatzfeldern und weiten Leistungsbereichen einzusetzen.
- Direkte Emissionen während des Betriebs sind praktisch zu vernachlässigen.

Aspekte der Nachhaltigkeit müssen daher vor allem bei der Herstellung der Photovoltaikmodule und nach Ablauf der Lebenszeit berücksichtigt werden.

Diese Vorteile führen zu einer hohen Akzeptanz von Photovoltaiksystemen sowohl in der Gesell-

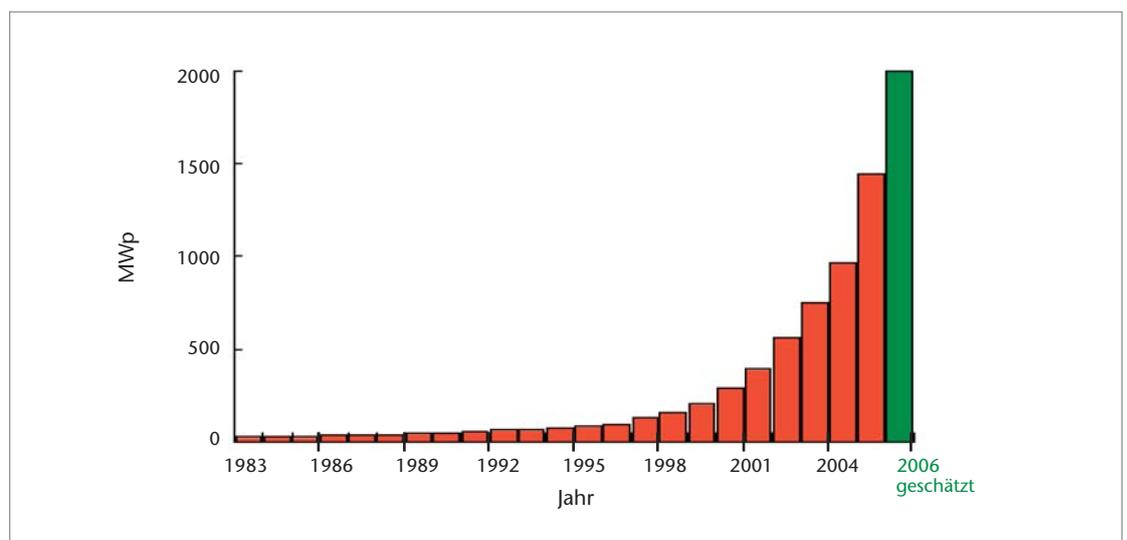
schaft bei privaten Verbrauchern als auch der Installation auf Freiflächen durch Betreibergesellschaften. Zusammen mit den Finanzierungsmöglichkeiten durch die Einspeisevergütung durch das EEG ergab sich ein außerordentlich dynamisches Wachstum des Photovoltaikmarkts in Deutschland und es wird erwartet, dass dieses Wachstum bei ähnlichen Randbedingungen auch auf andere Staaten in der EU und auch weltweit übergreift. Die Grafik in *Abb. 1* illustriert die dynamische Entwicklung des Photovoltaikmarktes. Im Jahr 2005 wurden weltweit Module mit einer Spitzenleistung von über 1,7 GW produziert, davon etwa 30% in Deutschland.

Die gesamte Spitzenleistung der in Deutschland installierten Photovoltaikanlagen erreicht 2006 über 2 GW, so dass die Photovoltaik nun etwa 1% des Elektrizitätsverbrauchs in Deutschland abdeckt.

Langfristig muss sich aber – vor allem durch Reduktion der Produktionskosten – ein selbst

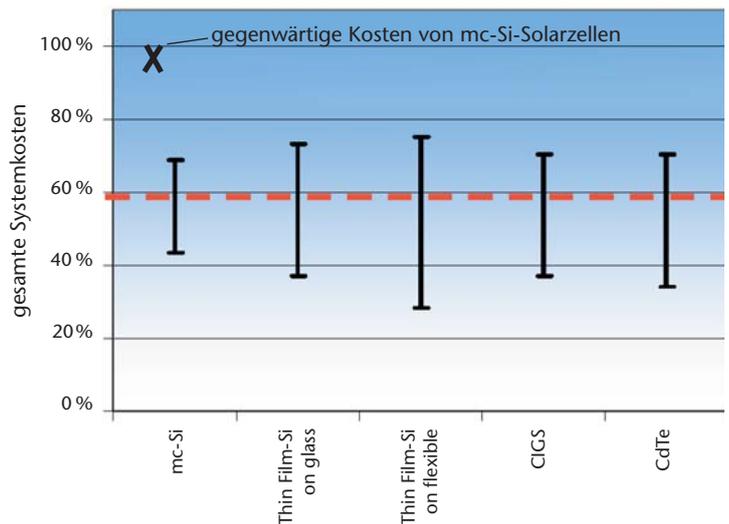
*Abbildung 1*  
Entwicklung der weltweiten Produktion von Photovoltaikmodulen. Die Leistung bezieht sich auf die Spitzenleistung MWp der Module bei AM1,5<sup>1</sup> (Solarstrahlung auf der Erde um den 50. Breitengrad); 1 kW/m<sup>2</sup>.

Quellen: P. Maycock PV News, EPIA



<sup>1</sup> Air Mass, kurz AM, auch Luftmasse, bezeichnet die Abschwächung der Strahlung durch die Atmosphäre. AM1: Solarstrahlung auf der Erde und Sonne im Zenit

tragender Markt entwickeln. Gegenwärtig werden 90% der Module aus Solarzellen auf Basis von kristallinem Silicium produziert. Die Kosten folgten lange Zeit einer Lernerfahrungskurve, die bei jeder Verdopplung der Produktion eine Kostenreduktion um 20% erlaubte. Durch die gegenwärtige Knappheit von Reinstsilicium stagnieren die Modulpreise bzw. steigen sogar an. Langfristige Kostendegression auf Werte deutlich unter 1€/W erfordert neue Technologien wie die Dünnschichttechnik. Die Marktsituation bietet aufgrund der hohen Nachfrage und der gegenwärtigen Preisstagnation jetzt die Möglichkeit, große Produktionsvolumina von Dünnschicht solarzellen am Markt zu platzieren.



## 1. Kriterien für die Nachhaltigkeit

Die Einflussfaktoren auf die Nachhaltigkeit während des gesamten Lebenszyklus der Photovoltaikmodule sind vielfältig, ihre Gewichtung und Auswirkungen sind nicht leicht zu quantifizieren. Für die Nachhaltigkeit von Entwicklungen gelten folgende Kriterien:

- kurze Energierückzahlzeiten und hoher Erntefaktor
- geringer Flächenbedarf und Integrationsmöglichkeit in bestehende Infrastrukturen
- geringe Materialkosten und ausreichende Materialverfügbarkeit
- geringe Emissionen während der Materialgewinnung, Produktion und im Betrieb
- Recyclingfähigkeit am Ende der Lebensdauer

Die bisherige Entwicklung zeigt zwar eine sehr starke Dominanz der Siliciumtechnologie auf dem gegenwärtigen Photovoltaikmarkt. Allerdings ist noch offen, mit welcher Technologie die Kostenziele für den Wettbewerb mit konventionellen Energiequellen erreicht werden können. Verschiedene Abschätzungen zeigen, dass Kosten unter 1€/W langfristig erreichbar werden, Dünnschichttechnologien sind wegen des geringeren Materialverbrauchs dabei potenziell im Vorteil. Allerdings müssen die mit diesen Technologien hergestellten Solarzellen bezüglich Wirkungsgrad und Zuverlässigkeit konkurrenzfähig sein.

Abb. 2 zeigt, dass die Kosten aus heutiger Sicht bis auf 30% der heutigen Kosten sinken können. Ausgehend vom gegenwärtigen Entwicklungsstand der Systeme mit multikristallinen Si-Solarzellen ist das Potenzial für die Reduktion der Systemkosten für alle Technologien vergleichbar, da auch die Fehlerbalken vergleichbare Längen haben.

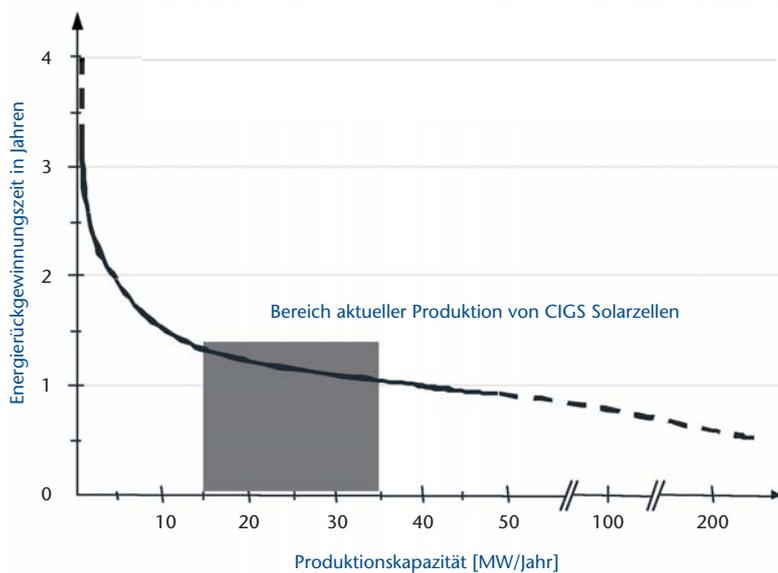
### Energierückzahlzeit und Erntefaktor

Eine der wichtigsten Anforderungen für eine nachhaltige, erneuerbare Energietechnologie ist eine kurze Energierückzahlzeit. Die für die Herstellung und den Aufbau einer PV-Anlage aufgewandte Primärenergie muss sich in möglichst kurzer Zeit wieder einspielen. Wird die Lebensdauer der Anlage mit eingerechnet, ergibt sich der Erntefaktor, d.h. das Verhältnis von erzeugter Energie zu aufgewandter Energie. Dieser sollte möglichst groß sein. Heute wird von einer durchschnittlichen Lebensdauer der PV-Module von 25 Jahren ausgegangen. Längere Lebensdauer vergrößern den Erntefaktor, erfordern aber auch die langfristige Integration des PV-Systems in entsprechende Infrastrukturen. Die Nachhaltigkeit eines PV-Systems muss daher immer im Zusammenhang mit den Anwendungen beurteilt werden.

Schon heute spielen die Photovoltaikmodule aus kristallinem Silizium die investierte Energie für die Produktion in Deutschland spätestens nach 6 Jahren wieder ein. Neuere Entwicklungen reduzieren diese Zeit auf 3 Jahre. In sonnenreichen Gegenden im Süden Europas ist dieses

Abbildung 2  
Entwicklungspotenziale verschiedener Photovoltaiktechnologien. Die Fehlerbalken geben die Variationsbreite der Kosten an.

Quelle: O. Hartley, J. Malmström, A. Milner, 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, 4-8 September 2006



**Abbildung 3**  
Energierückgewinnungszeiten von CIGS-Modulen in Abhängigkeit vom Produktionsvolumen. Abhängig vom weiteren Ausbau reduziert sich die Rückzahlzeit auf deutlich unter einem Jahr.

Quelle: M. Shibasaki, N. Warburg, J. Springer, Sustainability Evaluation of Solar Energy Systems (SENSE), FP5 ENKS-CT-2002.00639

Verhältnis noch wesentlich günstiger. Dünnschichtsolarzellen erreichen aufgrund des geringen Materialeinsatzes eine kürzere Rückzahlzeit, die auch stark mit dem Produktionsvolumen skaliert.

Abb. 3 zeigt anhand des Beispiels von Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid ( $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ) – Kurzbezeichnung CIGS-Module, dass bei zukünftiger Produktion sehr kurze Rückzahlzeiten erreicht werden können. Zusammen mit einer Zunahme der Produktionskapazität führt die Optimierung der Technologie zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit dieses Dünnschichtphotovoltaiksystems. Abhängig von Herstellungstechnologie, Anwendung (Kraftwerke auf Freiflächen, dachintegrierte Systeme, mobile Anwendungen) und Standort (Zentraleuropa, Mittelmeerraum, Sonnengürtel) verkürzt sich die Energierückzahlzeit um etwa 30%, d.h. für dachintegrierte Systeme im Mittelmeerraum auf 1,3 Jahre, für Freiflächenanlagen in derselben Region auf 1,5 Jahre. Durch die sich abzeichnende Vergrößerung der Produktionskapazitäten wird ein weiterer Rückgang der Energierückzahlzeit der dachintegrierten Systeme auf 1 Jahr bzw. auf 1,2 Jahre für Freiflächenanlagen erwartet. Mit weiteren Entwicklungen und der Erhöhung der Produktionskapazitäten von derzeit weniger als 20 MWp/a auf zukünftige 100-200 MWp/a ist noch ein großes Potenzial für die Reduktion der Energierückzahlzeit und damit noch höherer Nachhaltigkeit gegeben.

## Recycling

Obwohl Photovoltaikmodule verschleißfrei arbeiten, ist doch ihre Lebensdauer wegen der Belastungen unter unterschiedlichen Witterungsbedingungen begrenzt. Gangbare Recyclingkonzepte sind daher eine wichtige Voraussetzung für einen nachhaltigen Beitrag der Photovoltaik zu unserer Energieversorgung, insbesondere weil sie auch wertvolle wieder verwendbare Rohstoffe enthalten. Forschung und Entwicklung begleiten die Fragen des Recyclings von Produktionsabfällen und Modulen, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben.

## 2. Forschung und Entwicklung für Nachhaltigkeit

Aspekte der Nachhaltigkeit der Photovoltaik sind zentrale Forschungsthemen im Forschungsverbund Sonnenenergie. Denn die Photovoltaik braucht wegen ihres enormen Potenzials und der daraus resultierenden zukünftigen Bedeutung dieser Energiequelle einen breiten Forschungs- und Entwicklungshintergrund. Die Grafik in Abb. 2 zeigt, dass verschiedene Technologien ein großes Potenzial zur Kostenreduktion haben. Daher befasst sich die Forschung und Entwicklung mit Verbesserungen bestehender und neuer Technologien bezüglich Produktionstechniken und Wirkungsgrad der Solarzellen. Sie untersuchen auch die Fragen der Umweltkompatibilität der Herstellungsprozesse.

### 2.1 Materialeinsatz und Strukturen

#### Siliciumtechnologien

In der Siliciumtechnologie bezieht sich dies auf die Reduktion der Dicke der Wafer und die damit verbundenen Anforderungen an die weitere Prozessführung. Die Herstellung von Solarzellenstrukturen durch Prozesse und Verfahren, die nur sehr niedrige Temperaturen benötigen und z.B. Lasertechniken zur Herstellung von Kontaktstrukturen verwenden, ermöglichen ebenfalls Wirkungsgrade der Zellen und Produktionsausbeuten erheblich zu steigern. Das Ziel ist dabei „mehr Leistung mit weniger Silicium“. Da der Großteil der Kosten einer PV-Anlage flächenproportional ist, bewirkt eine Erhöhung

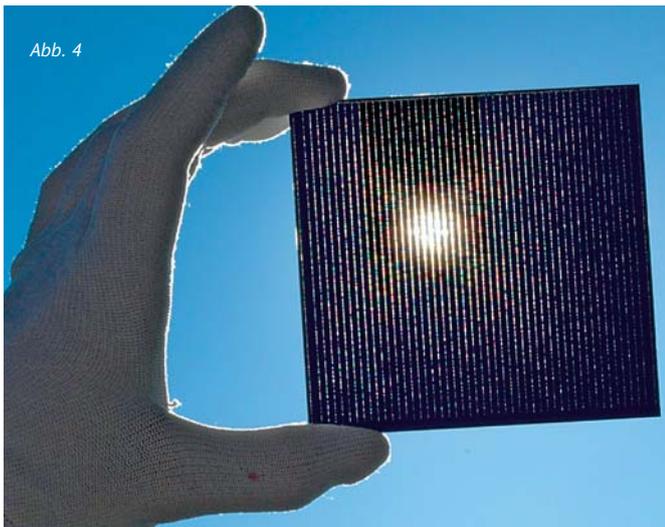


Abb. 4

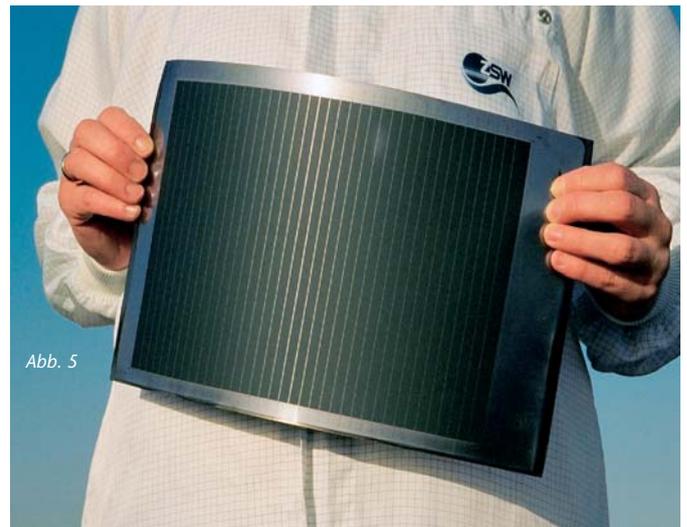


Abb. 5

des Solarzellenwirkungsgrades eine Verringerung der erforderlichen Modulfläche und kann darüber zu einer erheblichen Kostenreduktion führen.

Abb. 4 zeigt eine neuartige Solarzelle, die nur auf der Rückseite Kontakte besitzt, sodass die Vorderseite vollständig verschattungsfrei ist. Sie wird ausschließlich mit berührungslosen Verfahren hergestellt und ist daher auch für besonders dünne und daher bruchanfällige Silicium-Scheiben gut geeignet. Im Labor konnten am ISFH mit dieser Zellenart bereits sehr hohe Wirkungsgrade bis zu 22% erreicht werden.

### Dünnschichttechnologien

Weitere Entwicklungsmöglichkeiten bieten die Dünnschichttechnologien. Abb. 5 zeigt ein CIGS-Dünnschichtmodul auf Metallfolie. Laborsolarzellen aus diesem Material erreichen am HMI Wirkungsgrade über 18%.

Bei den Dünnschichtsolarzellen ist das Ziel, sehr kurze Taktzeiten bei der Modulproduktion zu erreichen und den Material- und Energieeinsatz sowie die Prozessausbeute weiter zu verbessern.

### Konzentratorsolarzellen

Photovoltaik-Module, in denen sich das Sonnenlicht mittels optischer System auf kleine, hoch-effiziente Solarzellen konzentriert, erreichen sehr hohe Wirkungsgrade bis zu 40%. Durch den geringen Einsatz von Halbleitermaterial wird mit

diesen am Fraunhofer ISE entwickelten Systemen eine sehr kurze Energierückgewinnungszeit erreicht.

### 2.2 Prozesstechniken

Nachhaltigkeit in der Prozesstechnik ist ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt. Ein Beispiel dafür ist die Reinigung der Beschichtungsanlagen bei der Deposition von amorphem oder mikrokristallinem Silicium. Der Ersatz von klimaschädlichen Gasen wie SF<sub>6</sub> (Schwefelhexafluorid) durch das weniger klimaaktive NF<sub>3</sub> (Nitrogen Trifluoride) hat zudem noch eine geringere Auswirkung auf nachfolgende Beschichtungen und erlaubt eine Gasausnutzung von nahe 100%.

Für alle Technologien gilt, dass jede Steigerung des Wirkungsgrades die Wirtschaftlichkeit proportional verbessert. Prinzipiell neue Konzepte, mit neuen, vom klassischen pn-Halbleiterübergang abweichenden Materialkombinationen, wie sie z. B. am HMI erforscht werden, versprechen weiteres Potenzial zur Kostenreduktion.

Abbildung 4

Die Vorderseite einer RISE (rear-interdigitated single-evaporated) Solarzelle.

Die Rückseite trägt beide Kontakte, daher ist die Vorderseite vollständig verschattungsfrei.

Quelle: P. Engelhart, A. Teppe, A. Merkle, R. Grischke, R. Meyer, N.-P. Harder, R. Brendel, Techn. Digest 15th PSEC, Shanghai (2005), p. 802

Abbildung 5

Dünnschichtmodul aus Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> auf Metallfolie.

Quelle: ZSW

### 3. Zusammenfassung

Das dynamische Wachstum des Photovoltaikmarkts unterstreicht die Attraktivität dieser erneuerbaren Energiequelle. Eine Produktion in großem Maßstab stellt eine große Herausforderung dar, auch wenn die Photovoltaik als eine der nachhaltigsten Energiequellen gilt. In diesem Beitrag werden die unterschiedlichen Voraussetzungen und Entwicklungsmöglichkeiten der gegenwärtigen Solarzellentechnologien analysiert und in den Entwicklungshorizont der Photovoltaik eingefügt.

Es sind noch erhebliche Forschungsanstrengungen notwendig, um die Photovoltaik zu einer in allen Anwendungsbereichen wirtschaftlichen Energiequelle zu entwickeln. Der ForschungsVerbund Sonnenenergie stellt sich dieser Herausforderung mit einem breit angelegten Forschungsprogramm, das zum einen aktuelle Entwicklungen unterstützt, zum anderen eine nachhaltige Entwicklung der Photovoltaik durch Forschungsarbeiten an neuen Konzepten gewährleistet.