

# Von der Manufaktur zu Giga-Watt-Anlagen – die Solarenergie auf dem Weg zur Großindustrie

Dr. Hubert A. Aulich  
PV Crystalox Solar PLC  
hubert.aulich@pvsilicon.com  
info@pvcystalox.com

## Zusammenfassung

In den letzten beiden Jahrzehnten sind bei der Umwandlung von Solarenergie in elektrischen Strom enorme Fortschritte erzielt worden. Motor der heutigen PV-Industrie ist die kristalline Siliziumtechnologie, die durch permanente Innovationen und den Übergang zur Massenfertigung an der Schwelle der Netzparität<sup>1</sup> steht. Im Folgenden sollen die wichtigsten Punkte dieser Erfolgsgeschichte aus technologischer und politischer Sicht zusammengefasst und weitere Meilensteine für die Zukunft aufgezeigt werden.

## 1. Einführung: Silizium und Solarstrom

Die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom ist eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts, mit der nachhaltig elektrische Energie bereitgestellt werden kann. Die materialwissenschaftlichen Grundlagen und das technologische Know-how dafür wurden bereits vor mehr als 50 Jahren entwickelt. 1947 entdeckten die jungen Wissenschaftler Bardeen, Brattin und Shockley den Transistor als regelbaren elektrischen Widerstand zunächst an einem Germaniumkristall. Es dauerte einige Zeit, bis das verbindungsreue Silizium in der für

Halbleiter notwendigen Reinheit isoliert werden konnte. Erst 1953 gelang es Siemens-Wissenschaftlern den ersten winzigen hochreinen Siliziumkristall herzustellen (Abb. 1). Aus diesem Grund trägt der Prozess noch heute den Namen „Siemens-Prozess“. Seitdem ist Silizium das Material der Halbleiterbranche und Motor unserer modernen Industriegesellschaft.

Während die Verwendung von Silizium in der Mikroelektronik einen rasanten Fortschritt verzeichnete und die Branche revolutionierte, brauchte das Material ein halbes Jahrhundert, um sich im Energiebereich durchzusetzen: Bereits 1954 hatten amerikanische Forscher die erste Silizium-Solarzelle entwickelt. Zum ersten Mal in der Geschichte der Energieerzeugung war es gelungen, einen Halbleiter - Silizium - zu benutzen, um umweltfreundlich Elektrizität zu erzeugen. Eine Revolution. Gearbeitet wurde bei geringster Umweltbeeinflussung mit dem reichlich vorhandenen Rohstoff Sand plus Sonnenkraft. Diese Entdeckung markierte den Beginn der Photovoltaik. Doch der eigentliche Aufbruch in ein neues Energiezeitalter begann erst Mitte der 90er Jahre, nachdem verschiedene klimatische, politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen diese Entwicklung förderten. Erst diese umweltpolitischen Katalysatoren sollten aus einer genialen Erfindung einen Erfolg machen und der Solarenergiebranche zu ihrer dynamischen Entwicklung verhelfen.

## 2. Firmenprofil: PV Crystalox Solar PLC

Der Siegeszug des Siliziums in der Solarbranche spiegelt sich in der Entwicklung des Unternehmens PV Crystalox Solar PLC wider als einem der

Abbildung 1  
1953: Erster hoch reiner Siliziumstab der Firma Siemens, gezüchtet durch den so genannten A-Prozess



<sup>1</sup> Netzparität bedeutet, dass der so erzeugte Strom dem Endverbraucher zu gleichen Preisen angeboten wird wie konventionell erzeugter Strom.

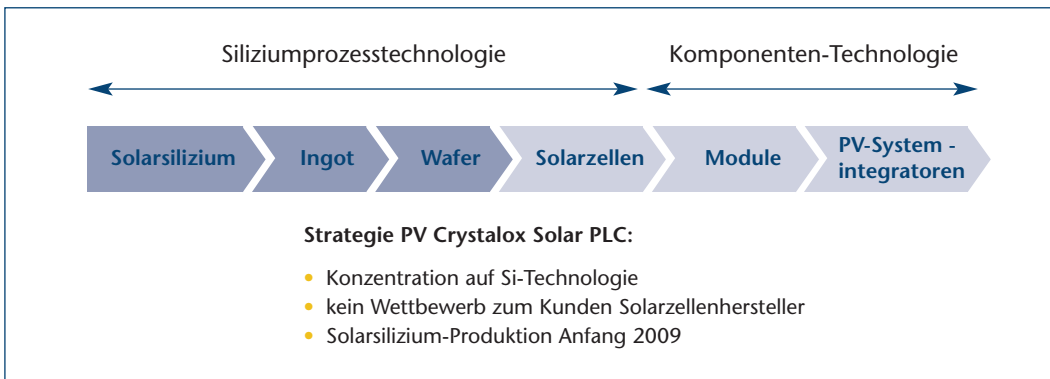


Abbildung 2  
Die Wertschöpfungs -  
kette der PV-Industrie



Abbildung 3a: Ingot-Fertigung PV Crystalox Solar, Milton Park, Oxfordshire, GB

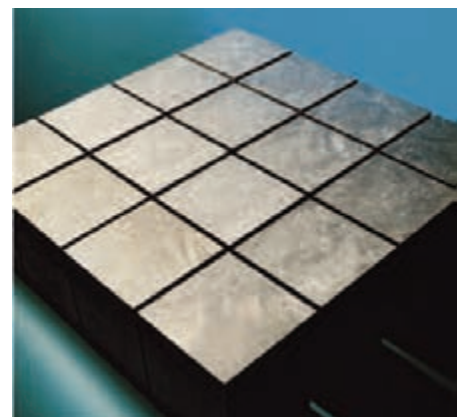


Abbildung 3b  
Fertiger Ingot der Firma PV Crystalox Solar,  
Milton Park, Oxfordshire, GB



Abbildung 4a: Fertigung von Siliziumscheiben in der PV Silicon AG, Erfurt

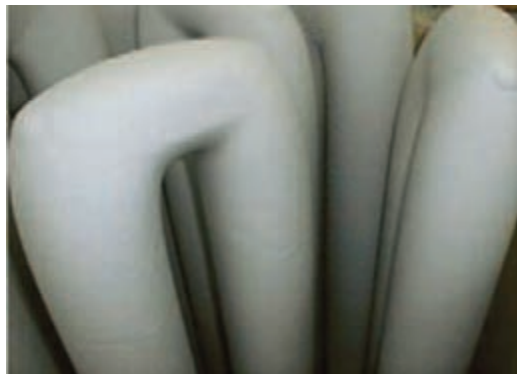


Abbildung 4b  
Siliziumwafer aus der PV Silicon AG, Erfurt

Abbildung 5a  
3D-Modell der neuen  
Solarsilizium-Anlage  
Bitterfeld



Abbildung 5b  
Siliziumstäbe, wie sie  
in Bitterfeld hergestellt  
werden sollen



heute weltweit größten Hersteller von Siliziumprodukten in Form von Ingots und Wafern.

Das Unternehmen entstand 2001 aus dem Zusammenschluss von PV Silicon (Erfurt) und PV Crystalox (Oxfordshire/GB). Es verfügt über eine Produktionskapazität von ca. 290 MW<sub>p</sub> und konnte seinen Umsatz in den vergangenen fünf Jahren von ca. 32 Mio. Euro auf ca. 242 Mio. im Jahr 2006 steigern. Hinter diesem Erfolg stehen ein international erfahrenes Management und rund 210 qualifizierte und hoch motivierte Mitarbeiter an drei Standorten – in Deutschland, Japan und Großbritannien. Im Juni 2007 ging PV Crystalox Solar PLC erfolgreich an die Londoner Börse. Das zusätzliche Kapital nutzt das Unternehmen, um eine eigene Siliziumfertigung zur Rohstoffsicherung in Bitterfeld zu etablieren und ihr internationales Geschäft weiter auszubauen.

Dabei fokussiert die PV Crystalox Solar PLC ihre Kräfte bewusst auf die ersten drei Prozessschritte

innerhalb der Wertschöpfungskette (Abb. 2), die sich alle auf die Herstellung und Verarbeitung von Silizium konzentrieren: In Oxfordshire werden Silizium-Ingots und -blöcke gefertigt (Abb. 3a, b), während in den Standorten Thüringen (Erfurt) (Abb. 4a, b) und Japan Silizium-Scheiben hergestellt werden. Ab 2009 soll die eigene Siliziumproduktion im Chemiepark Bitterfeld starten (Abb. 5a, b). Als starker Partner agiert der weltweit führende Chlorsilan-Hersteller Evonik-Degussa. Der Chemiekonzern wird das hochreine Rohmaterial fence-to-fence, also im direkten Verbund, liefern. Die Bitterfelder Anlage ist als in sich geschlossenes System konzipiert, in dem alle Materialien nach ihrer Nutzung wieder dem System zugeführt werden.

Die Kunden von PV Crystalox Solar PLC sind international führende Solarzellenhersteller. Durch intensive Zusammenarbeit mit ihnen und durch enge Kooperationen mit renommierten Forschungsinstituten gelingt es, rasch neue Produkte und marktrelevante Technologien zu entwickeln.

### 3. Schlüsselfaktoren für die Entwicklung des Solar-Energiemarkts

Nach dem ersten Enthusiasmus über die Möglichkeit, aus Sonnenenergie elektrischen Strom zu erzeugen, fanden die ersten photovoltaischen Anwendungen in den fünfziger Jahren fast ausschließlich in der Raumfahrt statt.

Mit der weltweit komplizierter werdenden Energiesituation, die sich unter anderem in den Ölkrisen der 70er Jahre zeigte, wurde mehr und mehr auch über den Einsatz von Solarzellen auf der Erde nachgedacht. Die großen Industrienationen sahen in der Solarenergie eine Alternative mit Zukunft und wollten schrittweise von Rohstofflieferungen aus politisch und militärisch instabilen Ländern unabhängig werden.

### 3.1. Signifikante technologische Weiterentwicklung

Bis weit in die 90er Jahre wurde größtenteils in kleinen Manufakturen produziert. Hier vollzogen Forscher und Entwickler die entscheidenden technologischen Weiterentwicklungen. Wichtigste Meilensteine dieses technischen Reifeprozesses:

- Reduzierung der Waferstärke von ca. 400 µm (1990) auf 200 µm (2006) bei gleichzeitiger Flächenerweiterung von 100 cm<sup>2</sup> auf 240 cm<sup>2</sup> pro Scheibe
- Erhöhung des Wirkungsgrades von 8–10 Prozent bei den multikristallinen Materialien auf 16 Prozent (erreicht im Wesentlichen durch das Aufbringen von Antireflexschichten und des Back-Surface-Field)
- Optimieren des Herstellungsprozesses durch das Überführen neuer Technologien für die Massenproduktion
- Insgesamt ist es in den vergangenen Jahren gelungen, durch technologische Weiterentwicklungen entscheidende Kostenreduzierungen zu erreichen.

### 3.2. Klimaproblematik und gestiegenes Umweltbewusstsein der Verbraucher

Parallel zu den immensen technologischen Fortschritten und den daraus resultierenden sinkenden Kosten für Solarzellen stieg das Umweltbewusstsein der Verbraucher. In den vergangenen Jahrzehnten beobachteten Klimaexperten den allmählichen Anstieg der Durchschnittstemperatur der erdnahen Atmosphäre und der Meere. UN-Klimaforscher prognostizieren bis 2100 eine weitere Erwärmung um bis zu 6,4 Grad Celsius weltweit im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter. Verheerende Folgen sind bereits sichtbar. Diese Tatsache zusammen mit dem Wissen um die begrenzten fossilen Energievorkommen führte bei den europäischen Verbrauchern zu einem signifikant höheren Interesse an erneuerbaren Energien. Dies löste einen entsprechenden Impuls auf die politischen Entscheider aus.

### 3.3. Gute Rahmenbedingungen des Gesetzgebers für Solarstrom

1990 mündeten die umwelt- und energiepolitischen Notwendigkeiten in Deutschland in das Stromeinspeisegesetz, das vom „Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien“ (EEG) im Jahr 2000 abgelöst wurde. Erstmals wurde darin die Verpflichtung der Elektrizitätsversorgungsunternehmen gesetzlich festgeschrieben, elektrische Energie aus regenerativen Umwandlungsprozessen abzunehmen und zu vergüten. Das EEG gehört zu einer ganzen Reihe gesetzlicher Maßnahmen, mit denen die Abhängigkeit von



Abbildung 6  
Triebkräfte für den Solarstrommarkt

fossilen Energieträgern wie Erdöl, Erdgas oder Kohle und auch von Energieimporten aus Nicht-EU-Staaten verringert werden soll. Gegenwärtig wurde das deutsche EEG von knapp 50 Staaten der Erde in seinen Grundzügen übernommen. Lange Zeit war Japan mit seinen Unterstützungsprogrammen für die Solarindustrie führend. Diese Förderungen dort sind nun aber ausgelaufen, der japanische Markt zeigt deshalb nur noch ein verhaltenes Wachstum. Deutschland hat mit seinen derzeitigen Gesetzen, Förderprogrammen und Einspeiseregulungen gute Voraussetzungen für den langfristigen Ausbau der Solarstromerzeugung geschaffen.

### 3.4. Von zentraler zu dezentraler Stromversorgung

Zudem lässt sich der Beginn eines Paradigmenwechsels im Hinblick auf die Art der Stromerzeugung feststellen. Der Trend geht heute weg von riesigen Giga-Watt-starken Elektrizitätserzeugungsanlagen hin zu kleinen dezentralen Anlagen. Das lässt sich gut mit der Struktur des Internets vergleichen: Millionen von kleinen vernetzten Informationsträgern bilden ein weltweites Netz. Nach diesem Vorbild wird es zukünftig Millionen von kleinen und unabhängigen Energieerzeugern geben. Damit entfallen Leistungsverluste durch lange Transportwege des elektrischen Stromes durch das Netz. Für den Verbraucher sinkt das Risiko, etwa bei einer Havarie von einer unterbrochenen Stromversorgung betroffen zu sein.

## 4. Aussichten für die Solarenergiebranche

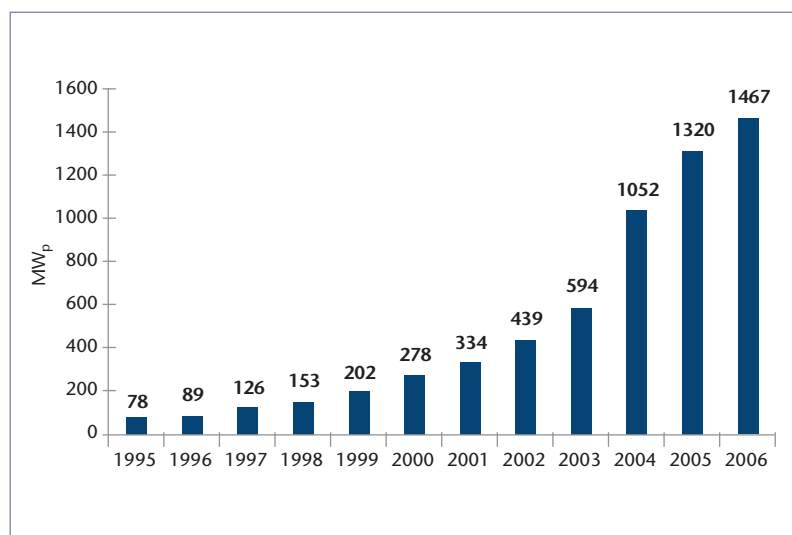
Die genannten Faktoren führten in den vergangenen Jahren zu einem dynamischen Wachstum der Solarbranche. Tendenz weiter steigend. Die Bedeutung der Photovoltaik für die weltweite solare Stromversorgung nimmt kontinuierlich zu. So wuchs der Photovoltaik-Weltmarkt von 1983 bis 1994 jährlich um 19 Prozent. Dieses stete Wachstum hat sich seit 1995 signifikant beschleunigt (*Abb. 7*).

Die kumulative Leistung der weltweit installierten Anlagen lag Ende 2006 bei 6,6 GW<sub>p</sub> und soll nach einer Prognose der EPIA (European Photovoltaik Industry Association) auf fast 21 GW<sub>p</sub> in 2010 anwachsen.

Die Grafik in *Abbildung 8* zeigt, dass die Schätzung des Anteils der Photovoltaik am weltweiten Energieverbrauch in der Vergangenheit viel zu konservativ war. Im Jahr 2000 hatte eine Gruppe von Wissenschaftlern und Branchenkennern in der EPIA Roadmap (ein Zukunftsszenario für die Entwicklung der Photovoltaik-Branche) für 2007 eine weltweite Leistungssteigerung von 27 Prozent, gemessen in Terrawattstunden, vorausgesagt. Tatsächlich wurden bis 2007 sogar 33 Prozent erreicht. Es ist davon auszugehen, dass dieser Trend anhält, vorausgesetzt die günstigen gesetzlichen und politischen Rahmenbedingungen bleiben bestehen und weitere Länder gehen einen ähnlichen energiepolitischen Weg wie Deutschland mit.

Abbildung 7  
Globaler jährlicher  
Lieferumfang von  
PV-Modulen

Quelle: EPIA –  
Greenpeace 2007



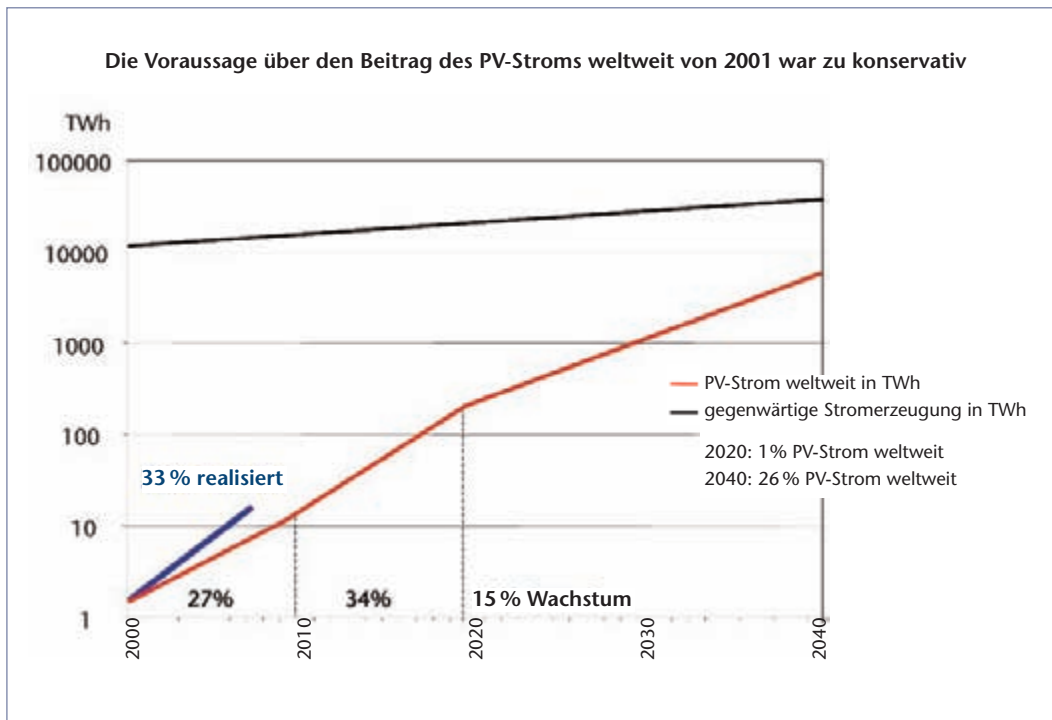


Abbildung 8  
Roadmap der  
European Photovoltaic  
Industry Association  
(EPIA)

Quelle: Solar  
Generation and  
IEA-PVPS

Ein viel diskutiertes Thema ist in diesem Zusammenhang immer wieder die Frage nach der ausreichenden Verfügbarkeit von Silizium. Wird es überhaupt möglich sein, genügend Silizium herzustellen, um die prognostizierten Wachstumsraten realisieren zu können? Im Jahr 2000, wurden 4.500 Tonnen Silizium jährlich hergestellt. Heute sind es rund 33.000 Tonnen. Es ist davon auszugehen, dass es 2030 1.200.000 Tonnen sein werden. Nach unseren Prognosen

wird dabei der spezifische Anteil an Silizium sinken, der nötig ist, um ein Watt zu erzeugen. Schätzungsweise wird sich im Jahr 2030 der Wert auf ein Fünftel verringert haben (Abb. 9). Gebraucht werden dennoch genügend Produktionskapazitäten für Silizium und die Bereitschaft, Investitionen zu tätigen. Der große Vorteil: Sand als Rohstoff kommt fast überall auf der Welt vor und steht nahezu unbegrenzt zur Verfügung.

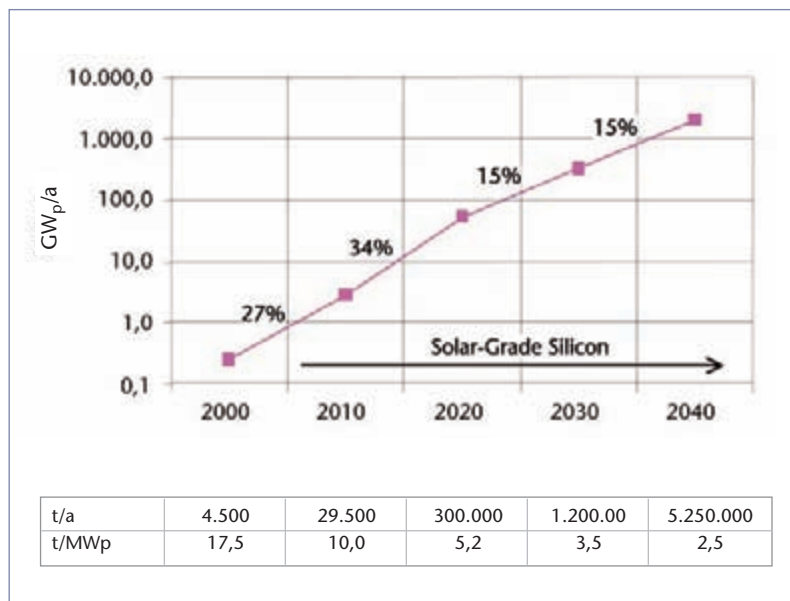


Abbildung 9  
Installierte PV-Modul-  
kapazität und  
Siliziumverbrauch

## 5. Wichtige Schritte in Richtung Wettbewerbsfähigkeit

Vorrangiges Ziel für die kommenden Jahre ist das Erreichen der Netzparität von Solarstrom bis 2015. Als Netzparität wird der Zustand bezeichnet, bei dem photovoltaischer Strom zu gleichen Preisen beim Endkunden angeboten wird wie Strom aus konventionellen Quellen.

Um die Wettbewerbsfähigkeit von solarem Strom gegenüber herkömmlich erzeugter Elektrizität zu erreichen, müssen auf jeder Stufe der Wertschöpfungskette – von der Siliziumherstellung bis zur Implementierung der Systeme – Kosten reduziert werden. Das gelingt durch technologische Innovationen und einer großindustriellen Fertigung, mit der die variablen und fixen Produktkosten (Abb. 10) gesenkt werden.

### 5.1. Silizium

Um teure Rohstoffkosten zu senken, muss der für die Erzeugung von einem  $W_p$  notwendige Siliziumanteil von heute  $10g/W_p$  auf  $5,5 g/W_p$  im Jahr 2015 reduziert werden. Diese Materialeinsparung soll über geringere Sägeverluste bei der Scheibenherstellung und die Steigerung des Wirkungsgrades erreicht werden. Kostenverursacher bei der Solarsiliziumproduktion sind

derzeit hauptsächlich Chlorsilan und Strom zum Erhitzen der Siliziumdünnstäbe.

### 5.2. Ingots

Bei der Herstellung von Ingots entfällt der „Löwenanteil“ der Kosten auf die Tiegel, die benötigten Gase und ebenfalls Strom. Ziel ist es, in den nächsten Jahren die Herstellungskosten auf rund 60 % des heutigen Wertes zu senken.

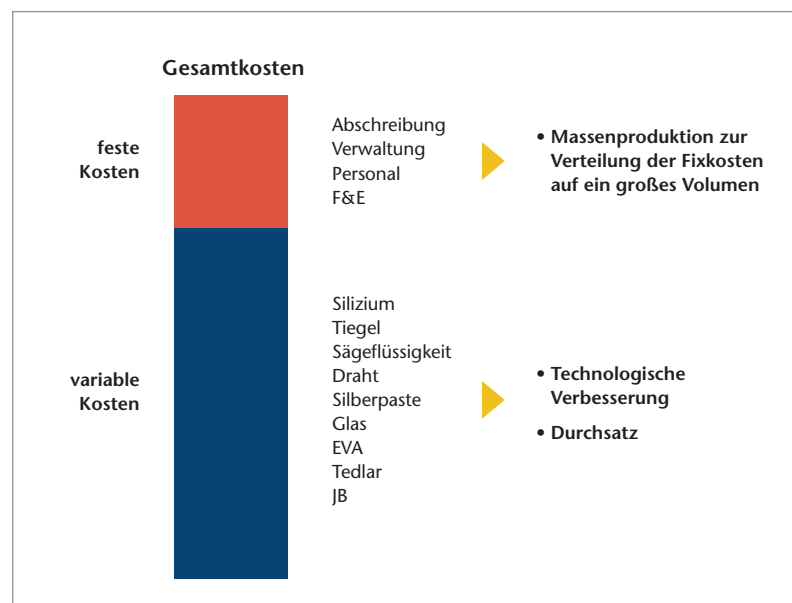
### 5.3. Wafer

Größter Kostenfaktor beim Zersägen der Blöcke zu hauchdünnen Scheiben, ist eine benötigte Flüssigkeit (Slurry), welche die einzelnen Sägedrähte umspült. Die in ihr befindlichen Siliziumkarbidteilchen bewirken den eigentlichen Sägeprozess. Zu den Aufwendungen für den Sägeprozess kommen die Draht- und Abschreibungskosten. Eine Kosteneinsparung von mehr als 30 Prozent ist realistisch, wenn es gelingt, die Slurry kostengünstiger zu recyceln und mit dünneren Drähten zu arbeiten.

### 5.4. Solarzelle

Bei der Herstellung der Solarzelle entfallen die Hauptkosten auf Silber- oder Aluminiumpasten für das Aufbringen der elektrischen Kontakte, Materialien für die Diffusion (pn-Übergang), das Aufbringen der Antireflexschicht und die Abschreibung der teuren Anlagen. Ziel ist, die

Abbildung 10  
Motivation für eine Massenproduktion



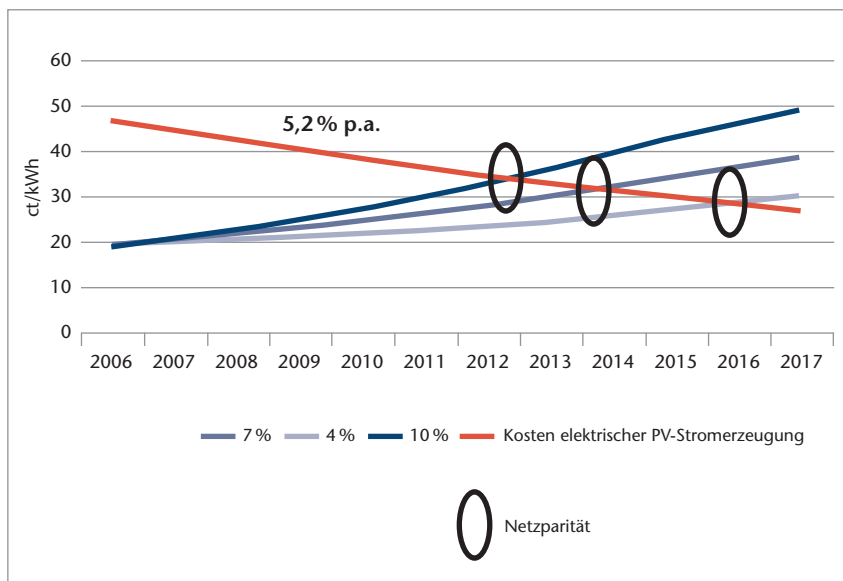


Abbildung 11  
PV-Herstellungskosten  
versus Elektrizitäts -  
preisentwicklung in  
Deutschland

Quelle: PV Crystalox  
Solar

Kosten bei diesen Prozessschritten auf unter 60 Prozent des heutigen Wertes zu senken.

### 5.5. Modul

Bei der Konstruktion des Moduls fallen hauptsächlich die Kosten für direkte Materialien wie Glas und Kunststoff ins Gewicht, Lohnkosten und die Abschreibung der Anlagen. Hier müssen Einsparungen von rund einem Drittel gelingen, aus unserer Sicht ist eine Reduzierung auf weniger als 70 Prozent möglich.

### 5.6. System

Auch im Systembereich müssen Kostensenkungen erreicht werden. Wir sind der Meinung, dass diese auf ca. 60 Prozent sinken können. Dafür sind im Wesentlichen die Hersteller von Wechselrichter und Systemintegration gefragt.

### 5.7. Gesamtkosten für installierte Systeme

Schlussendlich müssen auch die derzeitigen Gesamtkosten für die Installation einer Solarstromanlage von derzeit 4,9 €/W<sub>p</sub> (100 Prozent) bis 2015 auf ungefähr 3 €/W<sub>p</sub> (61 Prozent) sinken.

## 6. Erreichen der Netzparität in Deutschland

Entscheidend für das weitere Wachstum des PV-Marktes sind weitere Preissenkungen für die zu installierenden Systeme. Die Anwender benötigen einen finanziellen Anreiz, um in Photovoltaik-Module zu investieren. Dafür muss es gelingen, eine jährliche Kostenersparnis von kumuliert 5,2 Prozent zu realisieren und die gesetzlichen Rahmenbedingungen wie die Einspeisevergütung zu erhalten. In den vergangenen Jahren sind die Preise für konventionellen Strom in der Bundesrepublik kontinuierlich gestiegen – durchschnittlich zwischen vier und zehn Prozent pro Jahr. Bei einem Preisanstieg von jährlich 10 Prozent würde die Netzparität von solarem Strom in Deutschland bereits 2012 erreicht sein (Abb. 11). Mit dem Erreichen der Netzparität öffnet sich für die PV-Industrie ein gewaltiger Markt, in dem der Solarstrom zunehmend Anteile gewinnen wird.

Aus unserer Sicht ist es realistisch, im Jahre 2020 bereits ein Prozent des weltweiten Strombedarfs aus Solarenergie gewinnen zu können (Abb. 12). Langfristige Prognosen, wie z. B. die vom Wissenschaftlichen Beirat Globale Umweltveränderungen (WBGU) der Bundesregierung aus dem Jahr 2003, zeigen die Entwicklung der Solarstromerzeugung zur dominierenden Technologie im Energiebereich.

Abbildung 12  
Langfristige  
Entwicklung der PV-  
Solarstromerzeugung  
weltweit

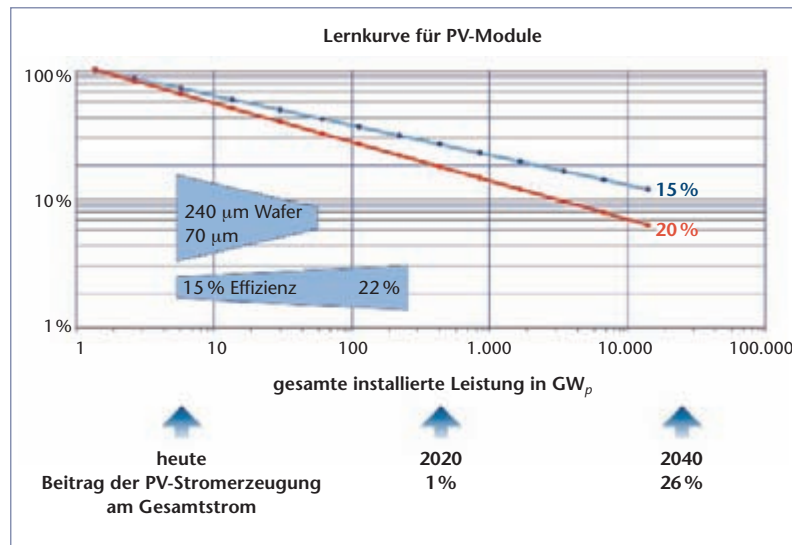
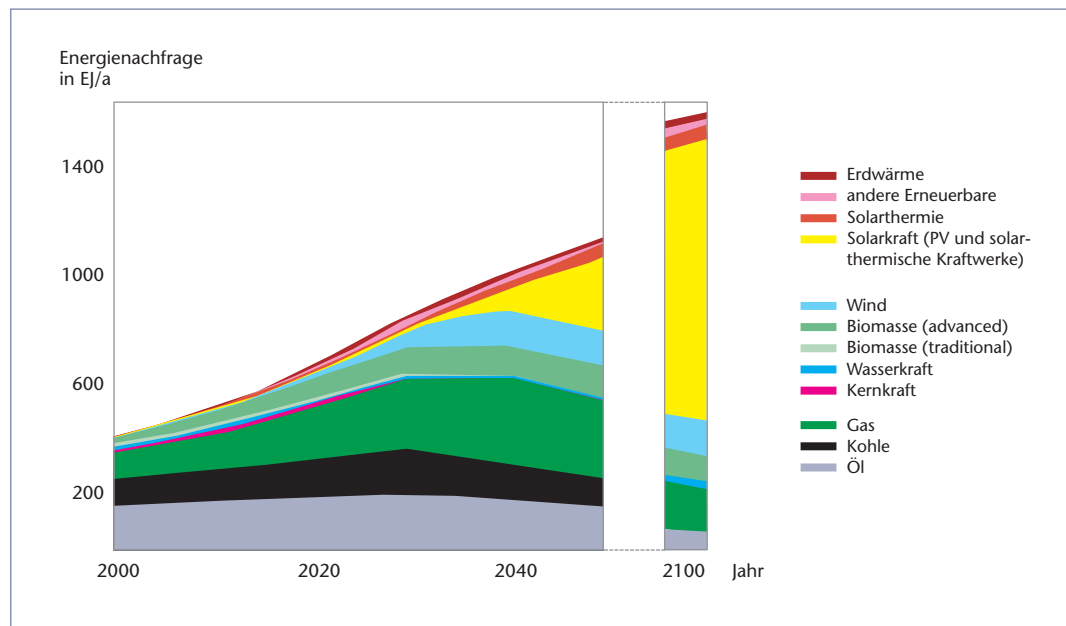


Abbildung 13  
Solarenergie (PV und  
Thermie) wird die  
tragende Säule der  
Energieversorgung  
in diesem Jahrhundert  
sein

Quelle: WBGU, 2003



## Schlussfolgerung

Um das Ziel – die Netzparität in den nächsten fünf bis sieben Jahren – zu erreichen, lauten die zentralen Aufgaben:

- Überführung aller Prozessschritte der Wertschöpfungskette in eine Massenproduktion zur Kostensenkungen in allen Bereichen der Herstellung von PV-Modulen
- Technologische Optimierung des gesamten Systems (ultradünne Scheiben, Steigerung des Wirkungsgrades, Lebensdauer der Module auf 30 Jahre steigern)
- kontinuierliche Forschung und Entwicklung verbunden mit einem raschen Transfer der Ergebnisse in die Produktion
- weltweit günstige und verlässliche Rahmenbedingungen der Gesetzgeber für die Installation von PV-Systemen