

Kristalline Silicium-Solarzellen

Dr. Gerhard Willeke

Fraunhofer ISE¹

gerhard.willeke@ise.fraunhofer.de

Dr. Armin Räuber

Projektgesellschaft Solare Energiesysteme PSE GmbH
raeuber@pse.de

Marktentwicklung

Der weltweite Photovoltaikmarkt hat sich in den letzten 20 Jahren mehr als ver Hundertfacht (Abb. 1), und immer war die kristalline Silicium-Technologie marktbeherrschend. Während anfangs nur monokristalline Si-Wafer eingesetzt wurden, hat das blockgegossene multikristalline Silicium mit einem Marktanteil von 50 % im Jahre 2002 das einkristalline Silicium (40 % in 2002) überflügelt. Hier hat sich eine Material-technologie, die nur auf die Photovoltaik abgestimmt ist, allmählich nach vorne geschoben. Das amorphe Silicium sowie das Band- bzw. das

Rohrsilicium (EFG)² der Firma RWE Schott Solar sind ebenfalls sehr wichtige Forschungserfolge, die aber mit je etwa 5 % Marktanteil derzeit eine geringere Rolle im Photovoltaik-Weltmarkt spielen. In diesem Beitrag konzentrieren sich die Autoren daher auf die Kerntechnologien der waferbasierten Solarzellen aus einkristallinem und blockgegossenem Silicium.

Die Entwicklung des weltweiten Marktes wurde in den letzten 10 Jahren durch gezielte Markteinführungsprogramme vor allem in Japan, Deutschland und den USA voran getrieben (Abb. 2) [1]. Die Initialzündung dazu gab das deutsche Tausend-Dächer-Programm Anfang der 90er Jahre, welches allerdings keine konsequente Fortsetzung erfuhr. Diese Idee einer Markteinführung wurde Ende 1993 von den Japanern mit ihrem Residential Roof Program in größerem Maßstab aufgegriffen und konsequent umgesetzt. Bis Ende 2002 wurden dort über 140.000 Systeme mit einer Gesamtleistung von 650 MW installiert.

Die USA haben 1997 ein Eine-Millionen-Dächer-Programm angekündigt. Dieses Programm ist aber bisher eine Absichtserklärung geblieben, da das Federal Government für den Endverbraucher keinerlei Fördermittel bereitstellte. Die in den letzten Jahren beobachtete Marktausweitung in den USA beruht auf ehrgeizigen Förderprogrammen weniger Bundesstaaten, aber auch auf dem Wunsch vieler Bürger nach einer Notstromversorgung, angestoßen durch hohe Strompreise in der Spitzenlastzeit und durch spektakuläre Netz-Zusammenbrüche.

Die deutsche Politik hat spät aber mit einer doppelten Markteinführungsstrategie reagiert: Im Jahr 1999 wurde das Hundert-Tausend-Dächer-Programm mit zinsgünstigen Krediten aufgelegt. Zusammen mit der ein Jahr später eingeführten Gewährleistung einer Stromeinpreisvergütung im Rahmen des Erneuerbare-

Abbildung 1
Stammbaum des Photovoltaik-Weltmarktes: Marktanteile der verschiedenen Technologien

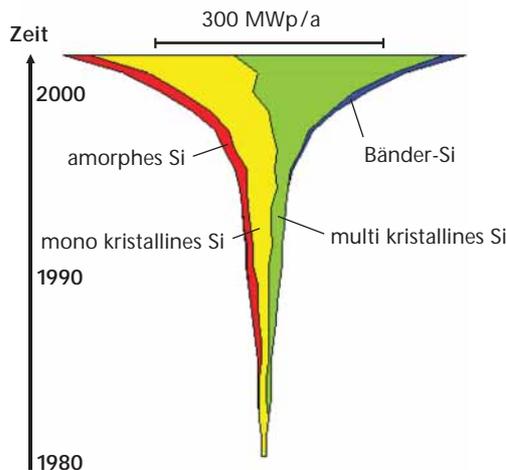
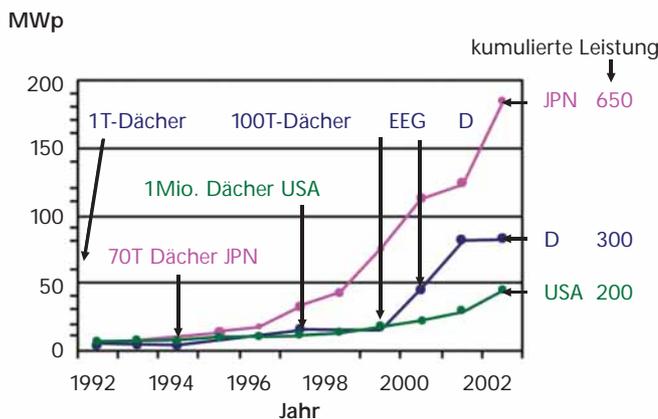


Abbildung 2
Entwicklung der jährlich installierten PV-Systemspitzenleistung in den drei führenden Nationen [2] und kumulierte Leistung in MW pro Land



¹Fraunhofer ISE, Zweigstelle in 45884 Gelsenkirchen, Auf der Reihe 2

² Edge Defined Film-fed Growth

Energien-Gesetzes (EEG) hat dies zu einer kräftig steigenden Nachfrage geführt. Bis Ende 2002 wurden in Deutschland insgesamt 300 MW an Photovoltaik-Systemleistung installiert. Trotz dieser Anstrengungen hat die japanische Industrie aufgrund des konsequenten Ausbaues eines Binnenmarktes den Vorsprung von etwa drei Jahren beim Ausbau der industriellen Fertigung halten können.

Durch die Stimulierung des deutschen Binnenmarktes haben in den letzten Jahren auch die deutschen Zell- und Modulhersteller ihre Fertigungskapazitäten ausgebaut. Zu den Zellproduzenten auf Basis von Silicium-Wafern gehören die Firmen RWE Schott Solar in Alzenau mit 25 MW gefertigten Zellen in 2002, Shell Solar in Gelsenkirchen mit 9 MW, ErSol in Erfurt mit 9 MW, Q-Cells in Thalheim bei Bitterfeld mit ebenfalls 9 MW, Sunways in Konstanz mit 5 MW [2] und Deutsche Cell in Freiberg mit 1 MW. Die drei größten deutschen Modulhersteller in 2002 waren die SolarFabrik (Freiburg, 7,2 MW), Solon (Berlin, 6 MW) und Shell Solar (München, 5 MW) [2], wobei der Standort in München mittlerweile geschlossen wurde. Insgesamt wurden im Jahr 2002 knapp 40 MW an kristallinen Silicium-Modulen in Deutschland gefertigt.

[MW _p]	Produktion				Installation
	Wafer	Zellen	Module	Inverter	Systeme
JPN		245	260		184
D	87	60	42	165	83
USA		121	78		44
Summe		426	380		311

Bei der Fertigung von System-Komponenten und bei der System-Installation steht die deutsche Industrie im internationalen Vergleich sehr gut da. Wie Abb. 3 zeigt, ist Deutschland stark in der Inverter- und Wafer-Produktion. Auch auf dem Gebiet des Anlagenbaus haben sich deutsche Unternehmen eine starke Position erarbeitet und vertreiben weltweit Geräte und Fertigungstechnologie. Aber bei den Solarmodulen ist unsere Außenhandelsbilanz noch deutlich negativ. Im letzten Jahr wurde die Hälfte der installierten Module importiert. Dies wird sich bei den Ausbauplänen und -maßnahmen der deutschen Industrie in den nächsten Jahren aber absehbar ändern.

Forschungsmittel und Programm

Von Anfang an haben besonders die USA, Japan und Deutschland die Photovoltaik-Forschung intensiv gefördert, und dies hat stark zu der industriellen Vormachtstellung dieser Länder beigetragen. Inzwischen bildet Deutschland bei den öffentlichen Photovoltaik-Forschungsmitteln im Vergleich mit den USA und Japan leider das Schlusslicht (Abb. 4). Die Forschungsförderung hat sich in Deutschland den letzten 10 Jahren kontinuierlich verringert, so dass die Schere im internationalen Vergleich immer weiter aufgeht. Hält diese Entwicklung an, wird leichtfertig die gute technologische Position aufs Spiel gesetzt. Denn die deutsche Photovoltaik-Forschung hat sich international einen guten Ruf erworben.

Ein Rückblick auf die deutsche Forschungslandschaft der letzten 20 Jahre ist recht aufschlussreich. Eine in diesem Zusammenhang wichtige Informationsquelle sind die Statusberichte des Bundesministeriums BMFT bzw. BMBF [3]. Hier erkennen wir Mitte der 80er Jahre eine starke direkte Förderung der damals beteiligten Industriefirmen wie Wacker, Siemens, AEG Telefunken und Bayer. Wir sehen erste Verbundprojekte zwischen dem Fraunhofer ISE und Industriepartnern wie Siemens Solar (heute in Shell Solar aufgegangen) und der Telefunken electronic (heute in RWE Schott Solar aufgegangen). Die Universität Erlangen hat damals schon Pionierarbeit geleistet auf dem Gebiet des Technologie-Transfers aus der Universität in die Industrie durch die Lizenzierung der sogenannten MIS-Solarzelle (Metal Insulator Semiconductor) an die Firma NUKEM.

Im Wettbewerb mit der Universität Erlangen hat

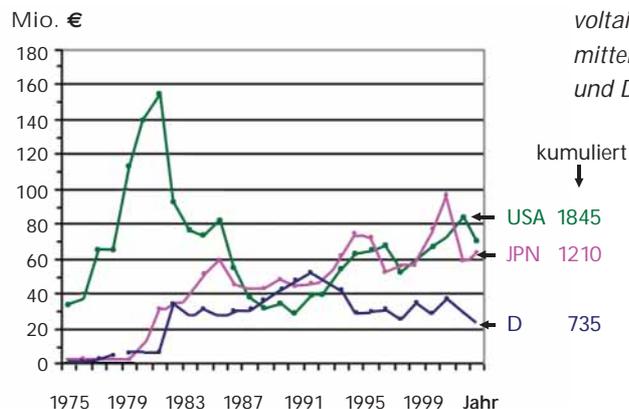


Abbildung 3
Vergleich der in 2002 hergestellten PV-Systemkomponenten und installierten Systeme in Deutschland, Japan und USA [2]

Abbildung 4
Vergleich der Entwicklung der jährlichen öffentlichen Photovoltaik-Forschungsmittel der USA, Japan und Deutschland

auch die Universität Konstanz an der MIS-Solarzelle geforscht. Diese MIS-Technologie, eine Alternative zum üblicherweise diffundierten Emmitter, hat sich aber in der industriellen Fertigung bislang nicht durchgesetzt.

Etwa 10 Jahre später, also Mitte der 90er Jahre, hat sich das Bild deutlich gewandelt. Die Firma Wacker ist aus der Blockgussentwicklung ausgestiegen, die sie Ende der 60er Jahre in einer Pionierleistung begonnen hatte [5]. Diese Technik wurde von der Firma Bayer Solar erfolgreich weitergeführt und befindet sich mittlerweile in den Händen der Deutschen Solar in Freiberg.

1953	Erste SZ aus krist. Si, d=1mm, p auf n, Emmitter Wrap-Around, $\eta = 6\%$
1956	10%-Si-Solarzelle
1958	Erster solarbetriebener Satellit
1962	n auf p, Frontfingergrid, $\eta = 13\%$
1968	Back Surface Field BFS
1968	Blockgussexperimente für Infraroptik
1974	Flachere (0.25 μm) Emmitter, Zufallspyramidenfronttextur, $\eta = 17.5\%$
1975	Siebdruckkontakte
1976	Oxid-Oberflächenpassivierung

Abbildung 5
Meilensteine der Technologieentwicklung der kristallinen Si-Solarzelle: die ersten 25 Jahre

Anfang der 90er Jahre wurde ein großes Verbundprojekt (DIXSI) unter Beteiligung vieler Universitäten und Forschungsinstitute gestartet mit dem Ziel, ein besseres Verständnis des Einflusses von Defekten in einkristallinem und multikristallinem Silicium auf die Herstellung von Solarzellen zu gewinnen. Dieses Projekt ist als sehr erfolgreich einzustufen und wurde von den kooperierenden Industriefirmen Bayer, Siemens, Wacker und Freiburger Elektronikwerkstoffe besonders gelobt. Die dabei erarbeiteten neuen Messverfahren zur Sichtbarmachung von Verlustmechanismen und eine Verbesserung von Solarzellenprozessen führten direkt zu einer Ausbeute- und Wirkungsgradsteigerung in der industriellen Fertigung.

Im Bereich Solarzellen- und Modultechnik wurde an der Universität Konstanz die sogenannte POWER-Zelle, eine mechanisch texturierte semitransparente kristalline Si-Solarzelle entwickelt, die inzwischen bei der Firma Sunways in Konstanz in Produktion gegangen ist. Auch erstes Recycling von Solarmodulen wurde bei

der Flachglas Solartechnik in Köln untersucht; eine Aktivität, die jetzt von der Deutschen Solar in Freiberg erfolgreich weitergeführt wird.

Meilensteine und Stand der Technologieentwicklung

Die kristalline Silicium-Solarzelle feiert im Jahr 2003 ihren 50. Geburtstag. Wenn man zurückgeht in der Geschichte der kristallinen Si-Solarzelle so erkennt man, dass alle wesentlichen Technologieschritte wie Oberflächen-Texturierung und -Passivierung, Siebdruck-Metallisierung und das so genannte Back Surface Field (BSF), also eine starke p⁺-Dotierung auf der Zellrückseite, bereits vor 1978 im Labor realisiert wurden, also in den ersten 25 Jahren der Entwicklungsgeschichte (Abb. 5). Der beste Laborzellenwirkungsgrad aus dieser Periode, mit 17,5 % auf kleinen Flächen, kann heute – etwa 30 Jahre später – nach viel Forschung und Entwicklung auf großen Flächen in der industriellen Fertigung erzielt werden.

Auch das Blockgussverfahren zur Herstellung multikristallinen Siliciums wurde schon Ende der 60er Jahre bei der Firma Wacker entwickelt. Damals arbeitete man an einem Gießverfahren für Silicium zur Herstellung von Bauelementen für die Infraroptik [5]. Daraus entstand in den 80er Jahren das sogenannte SILSO-Verfahren für die Photovoltaik. Wacker stellte damals 430 x 430 mm² große Blöcke her und sägte Scheiben, die dann bei der AEG in Wedel zu 10 cm x 10 cm großen Solarzellen mit 12 % Wirkungsgrad verarbeitet wurden. Am Fraunhofer ISE wurden jüngst solche alten Silicium-Scheiben aus der Schublade gezogen und daraus Zellen mit einem Wirkungsgrad von 15 % gefertigt [7]. Daran erkennt man, welche großen Fortschritte bei der Prozesstechnologie gemacht wurden. Heute versteht man viel besser, wie man das Material behandeln muss, um die größtmögliche Solarzellenleistung herauszuholen.

In der zweiten Hälfte der Entwicklung, also in den letzten 25 Jahren, wurden Fortschritte bei den ein- und multikristallinen Silicium-Solarmodulen erzielt, die in den Abb. 6 und 7 verdeutlicht sind: Die ersten einkristallinen Siliciumsolarzellen

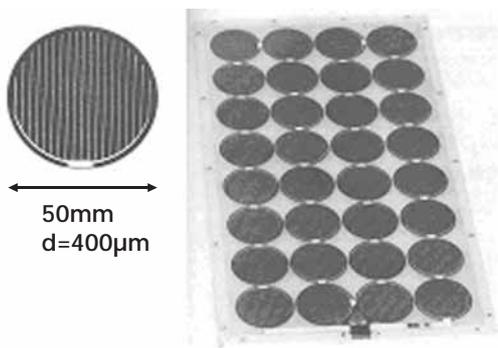
kamen aus der Raumfahrt und hatten einen Durchmesser von 50 mm. Die aus ihnen gefertigten Module hatten einen Modulwirkungsgrad von 8% [5]. Heutige Module haben 125 cm x 125 cm quasiquadratische Zellen mit einem Modulwirkungsgrad im Bereich von 11 bis 15%, wobei der durchschnittliche Wirkungsgrad bei 13–14% liegt. Die Wafer sind in dieser Zeit dünner geworden, und zwar von 400 auf ca. 300 µm und an einer vollquadratischen Technologie von 150 cm x 150 cm wird bereits gearbeitet. Das erfordert die Herstellung von einkristallinen Czochralski³-Kristallen mit einem Durchmesser von 220 mm.

Die ersten multikristallinen Silicium-Minimodule bei AEG-Telefunken mit 10 cm x 10 cm großen, damals noch sehr feinkristallinen Zellen hatten

einen Modulwirkungsgrad von knapp 6% [6]. Heutige Module mit standardmäßig 125 cm x 125 cm großen Zellen liegen im Bereich 10–14% Modulwirkungsgrad, mit typischerweise knapp 13%. Auch bei den multikristallinen Solarzellen wurde die Waferdicke im Laufe der Zeit auf 300 µm reduziert, und eine Zellgröße von 150 mm x 150 mm beginnt sich derzeit bereits als Industriestandard durchzusetzen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die kristalline Si-Solarzelle feiert dieses Jahr ihren 50. Geburtstag. In den ersten 25 Jahren wurden die Grundlagen für die heutige Wafer-technologie und die heutige Zellstruktur gelegt



50mm
d=400µm

$P_{max} = 8,5 \text{ Wp}$, $\eta = 7,9\%$

Raumfahrtsolarzellen für die Terrestrik
AEG-Telefunken, 1978



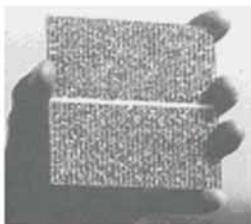
125 mm
d=300 µm

modernes Modul,
 $P_{max} = 160 \text{ Wp}$
 $\eta_m = 12,1\%$

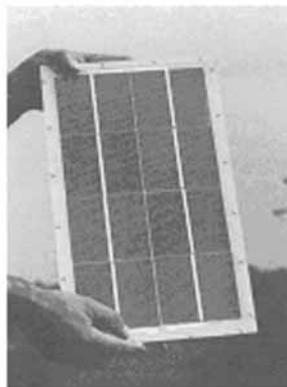
Shell Solar, 2003

Produktbereich:
 $85 < P_{max} [\text{Wp}] < 180$
 $11\% < \eta = 15\%$

Abbildung 6
Einkristalline Silicium-Solarmodule vor 25 Jahren (links) und heute (rechts) [5]

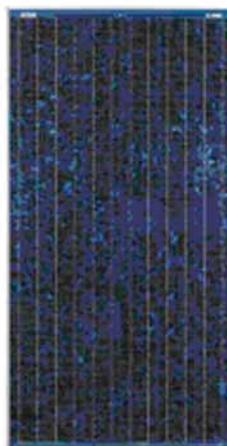


d=400µm
Si-Solarzelle



$P_{max} = 6,2 \text{ Wp}$, $\eta = 5,7\%$

Experimentalmodul
AEG-Telefunken, 1978



125 mm
d=300 µm

modernes Modul,
 $P_{max} = 160 \text{ Wp}$
 $\eta_m = 12,7\%$

BP Solar, 2003

Produktbereich:
 $85 < P_{max} [\text{Wp}] < 180$
 $11\% < \eta = 15\%$

Abbildung 7
Blockguss-Siliciumsolarzelle und Module vor 25 Jahren (links) und heute (rechts) [5]

³ Mit Czochralski bezeichnet man ein spezielles Kristallzüchtungsverfahren.

und ein aus heutiger Sicht kleiner aber wirtschaftlicher Markt im Weltraum gefunden. In den folgenden 25 Jahren bis heute wurde der Einstieg in die Massenfertigung geschafft und ein mehrere hundertmal größerer terrestrischer Markt eröffnet. Die Zellstruktur ist dabei im Wesentlichen gleich geblieben. Die Siliciumscheiben wurden mit der Zeit geringfügig dünner, dafür aber wesentlich größer und bringen heute oft schon 15 cm x 15 cm. Die derzeit industriell gefertigten Solarzellen und Module sind aufgrund von Material- und insbesondere Prozessverbesserungen im Vergleich zu 1978 nun wesentlich effizienter, nämlich um durchschnittlich 5 % absolut bei durchschnittlichen Modulwirkungsgraden von etwa 13 % mit Spitzenwerten von 15 %.

Innerhalb der nächsten 25 Jahre werden wir voraussichtlich ein weiteres Marktwachstum um einem Faktor von 100–1000 sehen, und die Photovoltaik wird dann einen signifikanten Beitrag zur weltweiten Stromerzeugung leisten. Für diesen überschaubaren Zeitraum wird die kristalline Si-Technologie ihre Vormachtstellung wohl behalten. Die technologische Entwicklung wird sich auf die Erhöhung des Wirkungsgrads und die Erarbeitung von kostengünstigen Fertigungsverfahren konzentrieren. Die Wafergröße wird sicher noch etwas weiterwachsen auf 20 cm x 20 cm, wobei die Scheiben im dann folgenden Schritt wesentlich dünner werden, möglicherweise unter 100 µm. Die Modulwirkungsgrade in der industriellen Massenfertigung werden kontinuierlich weiter steigen, insbesondere beim einkristallinen Silicium, auf durchschnittliche 18 % mit Spitzenwerten um 20 %. Die Steigerung der Modulwirkungsgrade wird dann allerdings langsam in eine Sättigung gehen, wobei die Solarzellen bei gleichbleibenden Wirkungsgraden wohl immer dünner werden. Dass dies möglich ist, zeigen bereits heutige Laborergebnisse.

Eine auf PV abgestimmte Materialherstellung wird sich mehr und mehr durchsetzen, wobei schon im nächsten Jahrzehnt eine rohstoffmäßige Entkoppelung von der Mikroelektronik realisiert werden wird.

5. Literatur

- [1] A. Räuber, W. Warmuth und W. Wettling, Die PV-Szene heute – Markt, Industrie, Technologie, 17. Symposium Photovoltaische Solarenergie, 13.–15. März 2002, Kloster Banz, Staffelstein: OTTI Energie-Kolleg, 2002
- [2] Trends in Photovoltaic Applications, Report IEA-PVPS T1-12:2003, International Energy Agency, August 2003, www.iea-pvps.org
- [3] Statusreport 1987 Photovoltaik, Projektleitung Biologie, Ökologie, Energie (PBE) des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT), Kernforschungsanlage KFA Jülich
- [4] Statusreport 1996 Photovoltaik. Projektträger Biologie, Energie, Ökologie (BEO) des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF)
- [5] D. Helms, The Wacker Ingot Casting Process, Chapter 2 in C.P. Khattak and K.V. Ravi, Silicon Processing for Photovoltaics II, Elsevier, 1987
- [6] H. Gochermann, W. Pschunder, G. Wahl, Experimentalstudie zur Entwicklungsdefinition von terrestrischen Solarzellen-Generatoren, BMFT Forschungsbericht T79-143, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik, Kernforschungszentrum Eggenstein, Dezember 1979
- [7] R. Schindler, persönliche Mitteilung, 2003