

DIE PV-SZENE HEUTE – TECHNOLOGIE, INDUSTRIE, MARKT¹

Armin Räuber

PSE Projektgesellschaft Solare Energiesysteme mbH,
Christaweg 40; D-79114 Freiburg
Tel. +49 761 479 14 17; Fax +49 761 479 14 44
Email: raeuber@pse.de

Wolfram Wettling

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme
Oltmannsstraße 5; D-79100 Freiburg
Tel. +49 761 290430; Fax +49 761 4588 250
Email: wettl@ise.fhg.de oder wettling@t-online.de

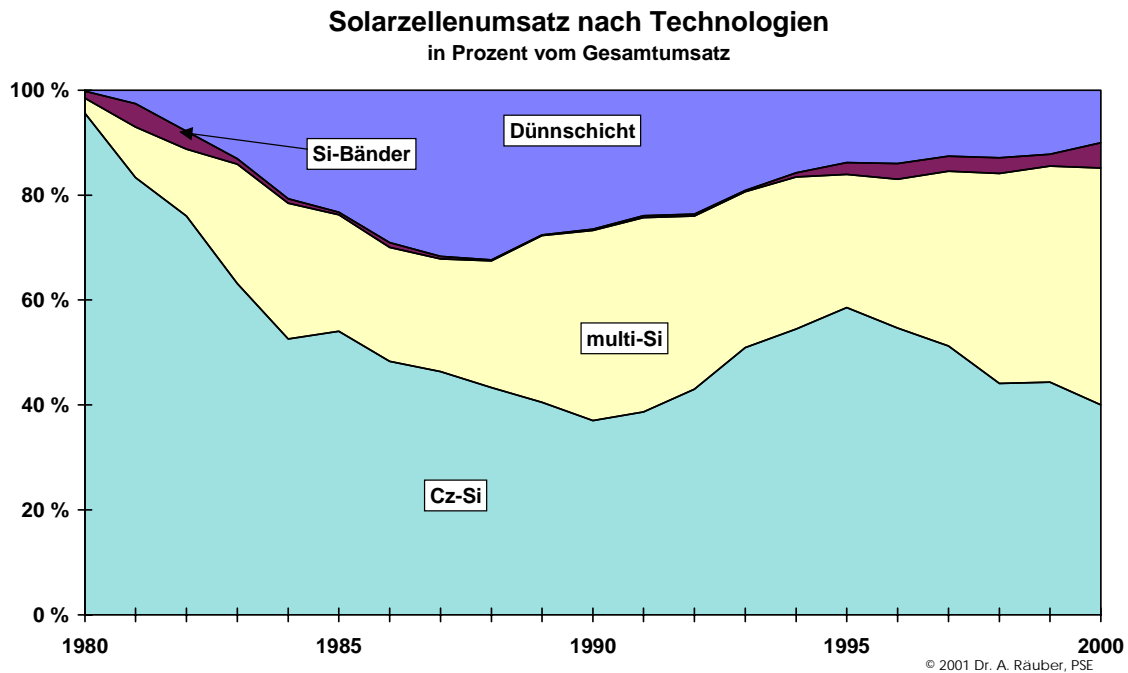
1 Zusammenfassung

Diese Übersicht hat sich zur Aufgabe gesetzt, wichtige Ergebnisse und Tendenzen in der PV-Technologie- und -Marktentwicklung zusammenzufassen und zu bewerten. Das kann natürlich nur in sehr knapper Form und in einer engen Auswahl geschehen. Berichtet wird über neue Ergebnisse aus F&E, soweit sie für die Fertigung relevant sind. Es wird hier hauptsächlich auf die Ergebnisse des letzten Jahres eingegangen. Außerdem wird wie stets die internationale Industrieszene beleuchtet, die ja immer noch durch große Umstrukturierungen und Strategiewechsel gekennzeichnet ist.

2 Einleitung

Die Photovoltaik befindet sich zu Beginn des neuen Jahrhunderts in einer sehr wichtigen und positiven Phase ihrer Entwicklung. Zurückblickend auf zwei Jahrzehnte kontinuierlichen Wachstums im zweistelligen Prozentbereich sind die Aussichten auf weiteres Wachstum der PV-Produktion so gut wie nie zuvor. Die Notwendigkeit eines verstärkten Ausbaus der erneuerbaren Energieträger wird von Politik, Öffentlichkeit und Wirtschaft mehr und mehr akzeptiert. Dass der Photovoltaik dabei eine wichtige Rolle zukommen wird, gehört zu den Einsichten, denen kaum noch widersprochen wird. Diese zunehmende Akzeptanz der

¹ Dies ist eine bezüglich Diagramme aktualisierte Fassung des Manuskriptes des Vortrags auf dem 16. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 14.-16.03.01. Quelle der Daten: Mittelung über vier verschiedene Datenquellen; nur in wenigen Fällen eigene Recherche.



Photovoltaik hat den Optimismus, der in der "Szene" immer vorhanden war, weiter gestärkt und zu vielfältigen neuen Aktivitäten geführt, über die im folgenden berichtet wird.

3 Kristallines Silicium

Solarzellen aus kristallinem Silicium haben nach wie vor einen Anteil von über 80 % am Weltmarkt, und dies wird sich, wenn überhaupt, nur mittel- bis langfristig ändern. Ihr Innovations- und Kostenreduktions-Potential ist noch lange nicht ausgeschöpft.

An den Modulkosten hat weiterhin die Silicium-Scheibe einen beträchtlichen Anteil. Ihre Verbilligung ist daher eine große Herausforderung. Daneben sind die Fertigungstechnologie für Solarzellen und Module Gegenstand intensiver Entwicklungsarbeiten.

Silicium-Ausgangsmaterial: Ausgangs-Silicium (Feedstock) ist ein die ganze Photovoltaik-Szene seit Jahren beschäftigendes Thema. Man hat jahrelang von den Abfällen der Halbleiterindustrie ganz gut gelebt, wird aber inzwischen von Verknappungen und drastischen Preiserhöhung heimgesucht.

Seit Jahren gibt es Bemühungen, eine vom Halbleitermarkt unabhängige Versorgung mit Silicium aufzubauen, alle technischen Ansätze sind aber daran gescheitert, dass sich keine Firma bisher bereit gefunden hat, in eine größere Produktion zu investieren.

Hoffnungen kann man einmal darein setzen, dass die konventionellen Polysilicium-Hersteller wie die Wacker-Chemie doch vereinfachte Verfahren einsetzen, um der PV-Industrie eine

bezüglich Preis und Qualität akzeptable Silicium-Versorgung zu gewährleisten, zum anderen gibt es einige Versuche, alternative Verfahren zur Silicium-Darstellung zu entwickeln. Neben den schon länger bekannten Aktivitäten bei Kawasaki Steel und Bayer gibt es Entwicklungen bei ELKEM in Zusammenarbeit mit AstroPower, in einem gemeinsamen EU-Projekt von ECN und der norwegischen SINTEF, und in einem Projekt in USA (Crystal Systems). Alle diese Untersuchungen sind langfristig angelegt und geben der Industrie kaum Hoffnung, das Versorgungsproblem bald zu lösen.

Silicium-Scheibenherstellung: Von den kristallinen Silicium-Scheiben, die zur Fertigung von Solarzellen dienen, sind etwa die Hälfte aus einkristallinem Czochralski-Silicium (Cz-Si), der andere Teil aus multikristallinem Material (mc-Si), das durch Erstarren einer Schmelze in einem Tiegel hergestellt wird. Einkristallines Material erlaubt die Herstellung etwas besserer, Solarzellen, ist aber deutlich teurer als mc-Si.

Die Kapazitäten der Scheibenhersteller sind derzeit vollständig ausgelastet, und alle haben deutliche Kapazitätserhöhungen angekündigt. Verlässliche Zahlen zu den Kapazitäten sind schwer erhältlich, da immer noch der überwiegende Teil der Scheiben in in-house Produktion bei den Solarzellenfirmen hergestellt wird.

Um teures Ausgangsmaterial einzusparen, wird schon seit Jahren versucht, dünnere Scheiben in die Solarzellen-Prozesse einzuführen. Massive Schwierigkeiten beim Handling der Scheiben haben dazu geführt, dass die Entwicklung in viel kleineren Schritten vonstatten geht, als vor einigen Jahren abgeschätzt wurde. Es bleibt aber nach wie vor das Ziel der Si-Solarzellentechnologie, auf Scheiben mit einer Dicke unter 150 µm zu fertigen.

Eine Sonderentwicklung bleibt die Herstellung von Folien-Materialien, bei denen das Sägen von Scheiben aus einem Block vermieden wird. Bekanntlich nutzt die Firma ASE ein eigenes Folienmaterial, das EFG-Si, das in den USA entwickelt wurde. In einem sehr ambitionierten Forschungsvorhaben versucht man nun, anstatt der bisher verwendeten 8-eckigen Rohre mit 80 cm Umfang Rundrohre mit einem Durchmesser bis zu 1 m herzustellen. Die Wandstärke der Rohre soll mit etwa 100 µm so dünn sein, dass die Krümmung der Scheiben durch Biegen begradigt werden kann. Erste Ergebnisse sind sehr vielversprechend.

In den USA bemühen sich zwei weitere Firmen ebenfalls um die Herstellung von Bänder-Silicium: Evergreen Solar und Ebara Solar. Evergreen Solar liefert schon Solarzellen und Module auf der Basis des neuen Materials aus.

Die Firma Bayer hat die Weiterentwicklung des Folienmaterials RGS eingestellt und die Technologie an das Forschungsinstitut ECN in Holland transferiert. Dort sollen die Arbeiten mit Blick auf eine fertigungsnahe Entwicklung weitergeführt werden.

Solarzellen-Technologie: Siliciumscheiben werden durch Technologien zu Solarzellen prozessiert, die seit vielen Jahren etabliert sind. Dennoch gibt es intensive Bemühungen sowohl bei der Industrie wie in Forschungsinstituten, diese Technologien zu verbessern. Die Motivation für diese Arbeiten sind:

- Anpassung der Technologie an verändertes Si-Material (z.B. mit höherer oder niedrigerer Diffusionslänge oder dünnere Scheiben)
- Erhöhung des Wirkungsgrades durch neue Technologieschritte oder neues Zellen-design.

Die Spitzenwirkungsgrade von Si-Solarzellen im Labor liegen seit einigen Jahren bei etwa 24 %, aber nur schrittweise können die komplexen Prozess-Technologien in eine industrielle Fertigung einbezogen werden. Es gibt inzwischen einen Konsens darüber, dass 18 bis 20 % durchaus ein reelles Ziel für die Großfertigung sind.

Aus diesem sehr umfangreichen Arbeitsgebiet sollen nur einige Highlights des vergangenen Jahres erwähnt werden.

- Die Degradation des Wirkungsgrads hocheffizienter Solarzellen aus Cz-Si unter Beleuchtung ist weitgehend verstanden und kann durch eine geeignete Wahl des Ausgangsmaterials vermieden werden.
- Für hocheffiziente Solarzellenstrukturen sind sehr feine Metallkontakte erforderlich. Es werden verschiedene Möglichkeiten erprobt, dies ohne Photolithographie zu erreichen:
- Bei der Oeco-Zelle des ISFH, Hameln, werden mit Gräben texturierte Zellen durch Schrägbedampfung an den Seitenwänden der Gräben metallisiert. Diese Zellen zeigen auf großer Fläche einen Wirkungsgrad von 20%.
- Feine Kontaktpunkte auf der Rückseite von hocheffizienten Zellen, die mit SiO₂ oder SiN passiviert sind, können durch Laserablation geöffnet werden. Auch hier wurden schon Wirkungsgrade von 20% erreicht.
- Es gibt ein zunehmendes Interesse an Solarzellen mit einseitiger Kontaktierung, d.h. mit Emitter- und Basiskontakten auf der Rückseite. Von dieser Kontaktstruktur verspricht man sich bedeutende Vereinfachungen bei der Verschaltung der Zellen im Modul. Zur Erreichung der Einseitenkontaktierung werden verschiedene Konzepte verfolgt.

Diese knappe Auflistung soll noch einmal unterstreichen, dass auf dem Gebiet der Scheiben-basierten Si-Solarzelle noch sehr intensiv und kreativ gearbeitet wird. Die Umsetzung vom Labor in die Fertigung geht langsam und in kleinen Schritten aber stetig voran.

Kristalline Silicium-Dünnschicht-Solarzellen: Es gibt seit längerer Zeit Bestrebungen, Silicium-Solarzellen in Form dünner Schichten auf kostengünstigem Substrat herzustellen. Die technische Machbarkeit ist vielfach nachgewiesen worden, und bemerkenswert gute Wirkungsgrade konnten in Schichten hoher Qualität demonstriert werden. Die weitere Entwicklung konzentriert sich auf die Bereitstellung kostengünstiger Materialien und auf die Entwicklung von Anlagen für die schnelle Abscheidung großflächiger Silicium-Schichten.

4 Amorphes Silicium

Die Technologie des amorphen Siliciums ist gegenüber den anderen Dünnschichten derzeit in einer eher defensiven Situation. Eine Reihe von Firmen hat beträchtliche Fertigungskapazitäten aufgebaut, die bisher aber weder von der Qualität der Produkte noch von den Fertigungskosten voll zufriedenstellend waren.

Viel Hoffnung setzt man derzeit auf den Einsatz mikro- bzw. nanokristallinen Siliciums, das man mit ähnlichen Verfahren herstellt wie das amorphe Silicium. Man hofft, mit diesen Materialien höhere Wirkungsgrade und bessere Stabilität zu erreichen. Für beträchtlichen Auftrieb hat die Ankündigung der Firma Kaneka gesorgt, die Fertigung einer Hybridzelle mit $\mu\text{-Si}$ mit Wirkungsgraden bis 10 % aufzunehmen.

5 Dünnschicht-Solarzellen aus Verbindungshalbleitern

CdTe: Für die Cadmiumtellurid-Technologie werden in der Industrie zwei sehr verschiedene Verfahren eingesetzt: Die Kurzweg-Sublimation (CSS, close-space sublimation) und die elektrochemische Abscheidung. Beide liefern Module mit Wirkungsgraden von 9 bis 10%. Für beide Verfahren existieren Pilotproduktionen, und es wurden für die nahe Zukunft große Fertigungskapazitäten angekündigt.

In Deutschland hat die Firma ANTEK Solar mit der Pilotfertigung begonnen. In den USA sind zwei Firmen aktiv. BP Solar hat in Fairfield, CA, eine Pilotfertigung nach dem elektrochemischen Verfahren, die Firma First Solar nimmt in Kürze eine Fertigung nach dem CSS-Verfahren in Betrieb, die auf eine sehr große Kapazität von 100 MWp/J ausgelegt ist.

Die CdTe Modulfertigung der Firma Matsushita, die hauptsächlich für Kleinmodule eingesetzt wird, wird wegen der Cd-Problematik wohl nicht auf Leistungsmodule ausgeweitet.

CIS: Auch für die Herstellung von Kupfer Indium Diselenid (CIS)- Schichten gibt es zwei konkurrierende Verfahren: Das Aufdampfverfahren mit Ko-Verdampfung der Ausgangsstoffe und das Selinisierungs-Verfahren mit Sputtern der Metalle und nachträglicher Reaktion im Selendampf oder H_2Se -Atmosphäre. Das Wirkungsgradpotential der CIS-Solarzellen ist sehr hoch (auf kleiner Fläche wurden 18% erreicht), Module der Fertigung bei der Firma Siemens Solar Industries (SSI) erreichten bis zu 11%. Siemens Solar liefert inzwischen Module verschiedener Größe.

Die Firma Würth hat in Marbach eine Pilotfertigung in Zusammenarbeit mit dem ZSW nach dessen Ko-Verdampfungsverfahren aufgebaut, die demnächst Module ausliefern wird.

Außerdem gibt es Aktivitäten in den USA bei der Firma EPV und in Japan bei den Firmen Showa Shell und Matsushita, wo ebenfalls Pilotfertigungen in Vorbereitung sind.

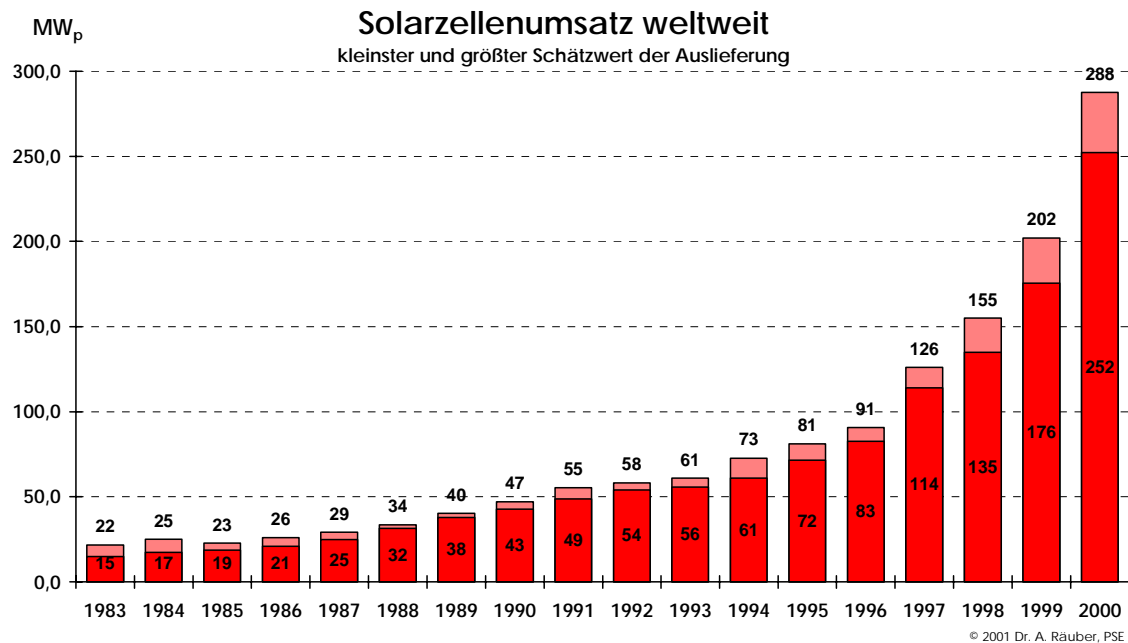
6 Die Farbstoff-Solarzelle

Die Farbstoff-sensibilisierte Solarzelle (Graetzel-Zelle) ist für Kleinstzellen im Consumer-Bereich schon in ersten Produktionen, größere Module sind aber immer noch im Laborstadium. In Deutschland wird vor allem bei INAP in Gelsenkirchen an dieser Entwicklung gearbeitet. Kürzlich berichtete die Firma Toshiba, dass es ihr gelungen sei, mit festgelegtem Elektrolyten (Gel) eine Zelle zu fertigen. Der erreichte Wirkungsgrad von unter 2 % ist aber noch enttäuschend.

7 Der PV-Markt

Weltweite Entwicklungen: Die positive Entwicklung des Photovoltaik-Marktes setzt sich unvermindert fort. Auch im Jahre 2000 dürfte der Anstieg wiederum mehr als 20 % betragen haben. Die Umsätze der Zell- und Modulhersteller dürften sich der Marke von 1 Milliarde \$/Jahr nähern, ein zugegebenermaßen immer noch kleiner Geschäftsumfang verglichen mit anderen Technologien des Neuen Marktes. Die Marktausweitung machte Kapazitäts-Engpässe besonders in Europa deutlich.

Zu wichtigen Antriebskräften des Marktes haben sich die japanischen und deutschen Markteinführungs-Programme entwickelt, die die Industrie an die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit getrieben haben. Interessanterweise erlebt der eher zögerliche Markt in den USA derzeit



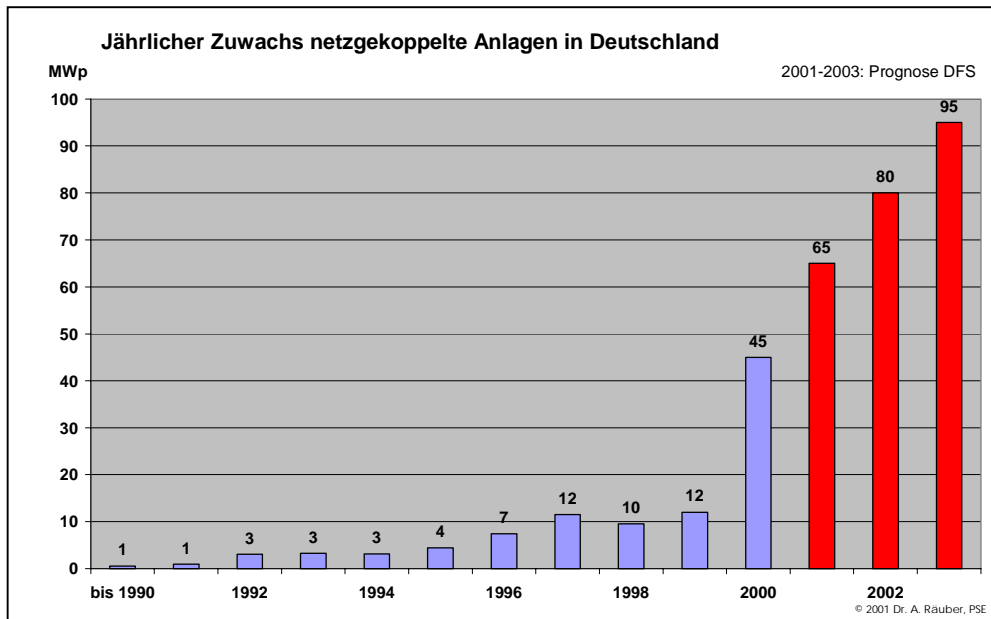
plötzlich eine größere Aufmerksamkeit, verursacht durch die Versorgungs-Engpässe für Strom im amerikanischen Westen.

In Japan hat die Ankündigung der Regierung, das Förderprogramm für netzgekoppelte Hausinstallationen im Jahre 2002 auslaufen zu lassen, "da das Ziel der Wirtschaftlichkeit erreicht ist", einen Schock ausgelöst. Diese Begründung beruht natürlich auf einer völligen Verkennung der Tatsachen, zumal die Modulpreise aufgrund des großen Bedarfs in naher Zukunft eher steigen als fallen werden.

Sollte sich die Beendigung des japanischen Programms bewahrheiten, so ist mit einem deutlichen Druck der japanischen Industrie auf den Weltmarkt zu rechnen, mit drastischen Auswirkungen auf die Stabilität unserer Industrie.

Es ist kaum damit zu rechnen, dass im japanischen Förderprogramm ein solcher Bruch einsetzt, dazu ist das Engagement der Industrie viel zu stark. Es würde auch der kürzlich von der Regierung verkündeten starken Ausrichtung auf Erneuerbare Energien widersprechen. In einer Verlautbarung heißt es: "In order to meet the demand for environmental protection and to secure the stable supply of energy, more efficient and effective support programs for new energy introduction will be discussed".

Das japanische "Dächer"-Programm "Introduction and Promotion of Residential PV Systems" wird in 2001 sogar ganz drastisch von 14,5 Milliarden Yen (305 Millionen DM) auf 23,56 Milliarden Yen (495 Millionen DM) erhöht, da im Jahr 2000 die Mittel schon Mitte des Jahres ausgeschöpft waren. Von einer Beendigung des Programms ist jedenfalls nichts zu spüren.



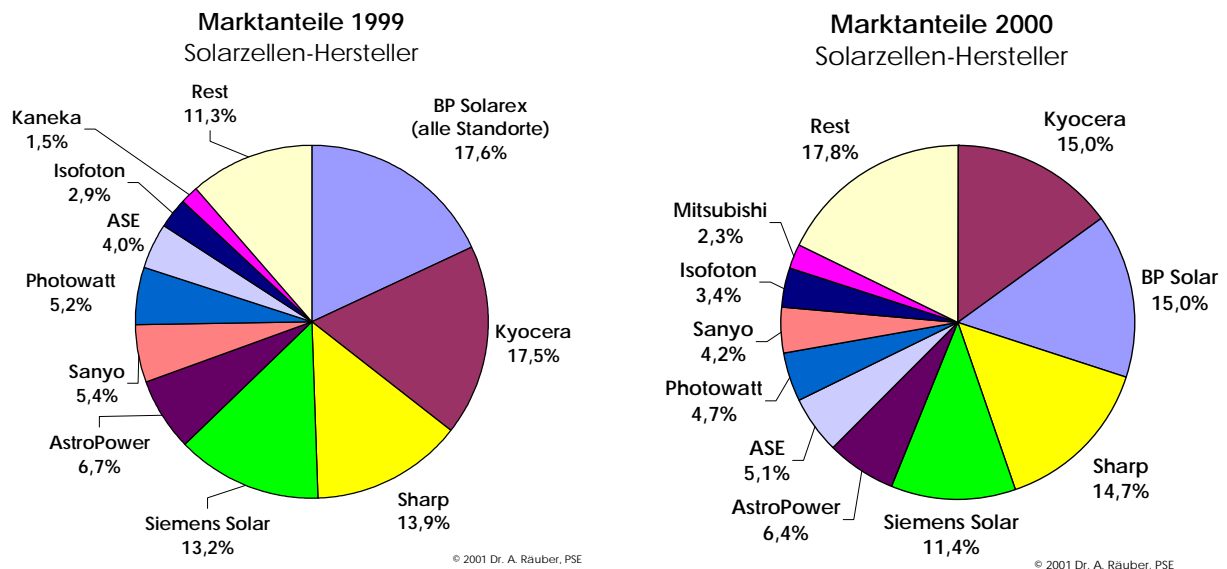
Entwicklungen in Deutschland: Deutschland erlebt durch die intensiven Förderprogramme eine beträchtliche Ausweitung der Umsätze. Da die hiesige Industrie den Bedarf auch nicht annähernd decken kann, ist das Land zu einem bedeutenden Importeur geworden.

Die starke Import-Abhängigkeit bei den Zellen und Modulen ist nicht allzu bedenklich. In Deutschland tummeln sich wirklich alle Hersteller der Welt, und dieser Konkurrenzkampf führt zu einer doch sehr kostengünstigen Versorgung. Die sehr arbeitsintensiven Bereiche der Komponenten- und Systemtechnik und der Installation bleiben im Lande und haben einen sehr positiven Arbeitsmarkt-Effekt.

8 Die Photovoltaik-Industrie

Natürlich ist die PV-Industrie von einem Boom, wie ihn andere Branchen, z.B. die Mobiltelefon-Industrie, erleben, noch meilenweit entfernt. Dazu ist sie noch eine Größenordnung zu klein und leidet nach wie vor an bekannten Strukturschwächen wie unzureichende Gewinne der Firmen, zu langsame Umsetzung von Innovationen vom Labor in die Fertigung und ein zu weit aufgefächertes Spektrum konkurrierender Technologien. Doch hat die Photovoltaik mit diesen Schwächen leben gelernt und sie lebt in der sicheren Erwartung, dass diese Probleme gelöst werden, wenn der Markt in die nächste Größenordnung hinein wächst, was innerhalb des kommenden Jahrzehnts geschehen wird.

Die großen Spieler in der Industrie sind mit unvermindertem Expansionsdrang weiterhin dabei, es haben sich jedoch einige bemerkenswerte Entwicklungen ergeben, die weiter unten aufgeführt sind. Verschiebungen der Marktanteile der Firmen werden deutlich beim Vergleich der folgenden Diagramme.



Folgendes ist bemerkenswert:

- Das Zusammenwachsen von BP Solar und Solarex zu BP Solarex (heute wieder in BP Solar umbenannt) hat diese Firma an die Spitze des Umsatzes gebracht.
- Sharp hat seinen Umsatz beträchtlich ausgeweitet.
- Die vier größten Hersteller stehen für etwa 60% des Gesamtumsatzes.
- Trotz großer Anstrengungen der Verfolger konnten diese ihre Marktanteile kaum verbessern.

Ganz bemerkenswert waren im letzten Jahr die vielfachen Umschichtungen in den Besitzverhältnissen und die vielen Neugründungen. Die wichtigsten seien hier aufgeführt:

- Die neue sehr komplexe BP Solar als Verschmelzung zweier Firmen wurde schon genannt.
- Der Bayer-Konzern beschloss, seine PV-Aktivitäten aufzugeben. Dies hatte drei Konsequenzen: 1. Die Scheibenfertigung wurde an die Firma SolarWorld AG verkauft und von dieser in die Firma Deutsche Solar GmbH überführt, weiterhin mit Standort in Freiberg. Eine kräftige Ausweitung der Produktion wird angekündigt. 2. Die Entwicklung der RGS-Folie wurde an ein Konsortium unter der Leitung von ECN in den Niederlanden abgegeben. 3. Für die Entwicklung des Solar-Siliciums sucht man einen Partner, dem man die weitere Entwicklung abtreten kann.

- Die Firma Canon, die zu den wichtigsten Förderern der Technologie des a-Si gehört, steigt aus der Technologie aus und verkauft ihre Anteile an USSC an den belgischen Konzern Bekaerts, der den Bau einer 25 MW_p-Fabrik für a-Si-Module ankündigt.
- Die Firma ErSol geht in die Hände der Firma Umweltkontor AG über.
- Der Energieversorger MVV steigt massiv bei der amerikanischen Firma EPV ein, einem Anlagenbauer für a-Si- und für CIS-Technologie.

Besonders in Deutschland ist im letzten Jahr beträchtliches neues Kapital in den Photovoltaik-Bereich geflossen. Dies wird auch in naher Zukunft noch zu einer Reihe von Neugründungen oder Besitzwechseln führen. Höchstwahrscheinlich wären beträchtliche Investitionsmittel für die konventionelle Si-Solarzellen-Technologie vorhanden, die Investoren sind jedoch damit konfrontiert, dass man keine Fabrik "von der Stange" kaufen kann. Die Verfahrensentwicklung und der Anlagenbau sind "verschlafen" worden, hauptsächlich dadurch bedingt, dass jede Solarzellenfirma weitgehend auf Eigenentwicklungen gesetzt hat.

Anlagenhersteller finden zunehmendes Interesse, nachdem man sie jahrelang nur ausgenutzt hat. In Japan sind, bedingt durch die immensen Kapazitätsausweitungen, beträchtliche Fortschritte in der Anlagentechnik gemacht worden, westliche Firmen kommen aber an diese Technik nicht heran. Damit kann natürlich die japanische Industrie ihren jetzt schon großen Fortschritt weiter ausbauen.

9 Ausblick

Die nächsten Jahre werden für die Photovoltaik durch weiteres gesundes Wachstum gekennzeichnet sein, das zum großen Teil von den Förderprogrammen für netzgekoppelte Anlagen in Europa und Japan angetrieben wird. Es ist mit weiteren Kapazitätsausweitungen und Änderungen der Besitzverhältnisse bei den Solarzellen- und Modulherstellern zu rechnen. Kristallines Silicium wird weiterhin das führende Material für die Solarzellenfertigung sein. Für die a-Si-Technologie wird es darauf ankommen, einen festen Platz auf dem Weltmarkt für Power-Anwendungen zu erobern. Die Technologien für CIS und CdTe werden auf den Prüfstand der Markteinführung kommen.

Abschließende Bemerkungen

Dieser Bericht beruht zu einem großen Teil auf Daten, die im Rahmen eines vom BMWi/BEO geförderten Vorhabens (FKZ 0329727) erarbeitet wurden. Die Verantwortung für die dargestellten Ergebnisse und Schlussfolgerungen tragen allein die Autoren. Wir bedanken uns herzlich bei Herrn Werner Warmuth für die große Hilfe bei der Sammlung von Daten und bei der Herstellung der Diagramme.