

Energierücklaufzeit Ein Kriterium für die Wirtschaftlichkeit der Photovoltaik

Neue Technologien führen zu deren drastischer Verkürzung

Von Hubert Aulich, Friedrich-Wilhelm Schulze, Benedikt Strake

Unter **Energierücklaufzeit** versteht man die Zeitspanne, in der eine photovoltaische Energieerzeugungsanlage die Energiemenge liefert, die zu ihrer Herstellung aufgewendet werden muß. Von Einfluß sind ferner die Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer des Moduls. Die Energierücklaufzeiten heute industriell hergestellter Solarmodule liegen zwischen zwei und drei Jahren. Durch den Einsatz neuer Produktionstechniken, die bereits im halbtechnischen Maßstab erprobt werden, sind Energierücklaufzeiten von wenigen Monaten zu erzielen. Die Autoren analysieren den Energieaufwand zur Herstellung eines Solarmoduls aus kristallinem Silizium, produziert auf konventionelle Weise und nach neuen Verfahren. Ergebnis: Die Energierücklaufzeiten lassen sich erheblich verkürzen.

Die photovoltaische Energieerzeugung mit Solarzellen aus kristallinem Silizium besitzt im Vergleich zu anderen neuen Energietechnologien (z.B. Windenergie, Biogas etc.) das wohl größte Potential, in Zukunft einen beträchtlichen Beitrag zur Energieversorgung zu leisten. Voraussetzung dazu ist neben einer Kostensenkung von heute 20 DM/Wp auf nur wenige DM/Wp auch eine Verkürzung der Energierücklaufzeit. In der Vergangenheit wurden Energierücklaufzeiten zwischen 10 und 20 Jahren angegeben [1]. In den letzten fünf Jahren führten neue Entwicklungen zur Erstellung photovoltaischer Anlagen auf allen Gebieten – Siliziumdarstellung, Scheibenherstellung, Zellen- und Modulfertigung – zu einer deutlichen Verkürzung der Energierücklaufzeit.

Berechnungsgrundlagen

Zum Betrieb einer photovoltaischen Energieerzeugungsanlage muß praktisch keine Energie aufgewendet werden, denn den „Betriebsstoff“ Photonen liefert die Sonne. Damit entscheiden lediglich die Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer des Moduls sowie der zu seiner Herstellung erforderliche Energieaufwand über die Energierücklaufzeit der Anlage.

Der Wirkungsgrad des Solarmoduls wird mit 10 % angesetzt, ein Wert, wie er bereits heute in der Serienfertigung erreicht wird. Die eingestrahlte Sonnenenergie beträgt in der Rechnung 2200 kWh/Jahr·m², was den Verhältnissen in Äquatornähe entspricht. In Mitteleuropa mit einer Sonneneinstrahlung von etwa 1000 kWh/Jahr·m² würden sich die angegebenen Energierücklaufzeiten verdoppeln. – Die zu erwartende Lebensdauer eines Solarmoduls beträgt etwa 20 Jahre.

Der Energieaufwand zur Herstellung des Solarmoduls umfaßt folgende Aufwendungen: Gewinnung und Transport der Rohstoffe und der benötigten Chemikalien, Herstellung und Weiterver-

arbeitung des Siliziums, Herstellung der Konstruktionselemente des Moduls, Bau und Unterhalt der eingesetzten Fertigungsmaschinen.

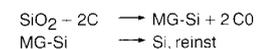
Für die Modellrechnung wurde eine relativ kleine Fabrikationsstätte gewählt, in der 2000 t polykristallines Silizium im Jahr hergestellt, in flächenhafte

Siliziumdarstellung

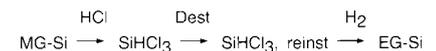
Erster Schritt zur Herstellung eines Solarmoduls aus kristallinem Silizium ist die Darstellung eines geeigneten Grundmaterials, aus dem sich Solarzellen mit hohem Wirkungsgrad herstellen lassen. Heute wird für die Herstellung kristalliner Solarzellen ausschließlich hochreines „elektronisches Silizium“ (EG-Si) eingesetzt, ein Material, das nach dem Siemens C-Prozeß gewonnen und zur Herstellung elektronischer Bauelemente verwendet wird. Da dieses EG-Si für den Einsatz in der Photovoltaik viel zu teuer ist (~ 200 DM/kg), wird seit mehreren Jahren an der Entwicklung eines kostengünstigen „Solar-

siliziums“ (SG-Si) gearbeitet (20 bis 50 DM/kg), dessen Verunreinigungspegel und elektronische Eigenschaften zwar nicht genau festgelegt sind, aus dem sich jedoch Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von über 10 % herstellen lassen. Bei allen nachfolgend untersuchten Si-Herstellungsverfahren wird als Ausgangsmaterial Quarz (SiO₂) eingesetzt, das in der Erdkruste in nahezu unbegrenzter Menge vorhanden ist. Tabelle 1 gibt eine Zusammenfassung der wichtigsten Reaktionen, mit denen die Überführung von SiO₂ in Silizium für Solarzellen gelingt.

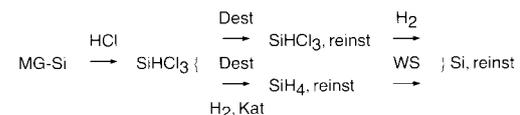
1. Herstellung von metallurgischem (MG)-Si und Refinement von MG-Si



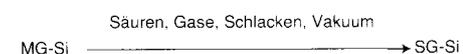
1.1. Siemens C-Prozeß



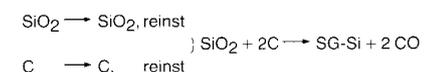
1.2



1.3 Refinement von MG-Si im festen und flüssigen Zustand



2. Refinement der Rohstoffe und carbothermische Reduktion (ACR-Prozeß)



Dr. Hubert Aulich, Dr. Friedrich-Wilhelm Schulze und Dr. Benedikt Strake sind Mitarbeiter der Forschungslaboratorien der Siemens AG, Otto-Hahn-Ring 6, 8000 München 83.

Tab. 1. Verfahren zur Herstellung von hochreinem Silizium

Raffination von metallurgischem Silizium über die Gasphase Siemens C-Prozeß

Grundstoff dieses Prozesses (Tab. 1) ist metallurgisches Silizium (MG-Si), das in großen Lichtbogenöfen aus Quarz und Kohlenstoff (Kohle, Petrolkoks, Holz, Holzkohle etc.) in großen Mengen (ca. 500.000 t/Jahr) hergestellt wird. Dieses unreine Material wird in eine gasförmige Siliziumverbindung – SiHCl_3 – überführt, die durch mehrfache Destillation von allen Verunreinigungen befreit wird. Das gereinigte Gas wird anschließend an widerstandsbeheizten dünnen Stäben aus reinstem Silizium bei etwa 1000°C mit Wasserstoff zu Silizium reduziert (Tab. 1, Nr. 1.1) [2].

In seiner ursprünglichen Form weist dieser Prozeß einen sehr hohen Energieverbrauch auf (Tab. 2), der aus dem hohen Verbrauch an metallurgischem Silizium (3,7 kg pro kg Reinstsilizium), der mehrfachen SiHCl_3 -Destillation und dem wenig effektiven Abscheideprozeß resultiert.

Prozeß (vgl. Tab. 1)	1.1	1.2	1.3	2
SiO_2	1	1	1	16
Reduktionsmittel	29	11	15	16
Reduktion	46	17	25	16
Raffination	250	80	30	13
Abscheidung	90	30	—	—
Σ	416	139*	71	61
%	100	33	17	14

* Die aufgeführten Zahlenwerte differieren von Werten in einer vorhergehenden Veröffentlichung zum gleichen Thema [9]. Diese Zahlenwerte ergeben sich auf Grund neuer Informationen [10].

Tab. 2. Energieaufwand in kWh für die Produktion von 1 kg hochreinem Silizium

Weiterentwicklung des Siemens C-Prozesses

Gegenüber dem Siemens C-Prozeß in seiner oben beschriebenen, ursprünglichen Form sind bei heutigen technischen Anlagen Verbesserungen vor allem auf den beiden folgenden Gebieten zu erkennen:

1. Durch die Rückführung von gasförmigen Si-Verbindungen wird erheblich weniger metallurgisches Silizium verbraucht (1,3 kg pro kg Reinstsilizium).
2. Die Einführung des Wirbelbettreaktors (Tab. 1, 1.2) führt zu verbesserten Abscheidebedingungen und aufgrund der kompakten Bauform des Reaktors zu einem geringeren Wärmeverlust bei der SiHCl_3 -Zersetzung. Durch diese und weitere Entwicklungen ist der Energieaufwand gegenüber dem ursprünglichen Prozeß um zwei Drittel gesunken (Tab. 2) [3], [10]. Zu ähnlichen Ergebnissen führt die thermische Zersetzung von SiH_4 im Wirbelbettreaktor (Tab. 1, 1.2).

Energetisch ungünstig bleibt jedoch die Raffination über die Gasphase. Die

im folgenden beschriebenen Prozesse vermeiden diesen Verfahrensschritt und sind deshalb zur Darstellung von Solarsilizium geeigneter.

Raffination von metallurgischem Silizium in fester und flüssiger Form

Die Raffination von metallurgischem Silizium nach hydro- und pyrometallurgischen Verfahren (Tab. 1, 1.3) in Anlagen mit hohen Durchsätzen besitzt ein hohes Potential zur Senkung des Energieverbrauchs. Der Abschätzung liegt folgende Prozeßsequenz zugrunde [4]: Zerkleinerung und Säurelaugung von MG-Si, Einschmelzen des vorgereinigten Si gefolgt von Schlackenraffination, Vakuumraffination und als letztem Schritt die gerichtete Erstarrung. Gegenüber dem ursprünglichen Siemens C-Prozeß ergibt sich eine Senkung des Energieverbrauchs um 83 %.

Advanced Carbothermic Reduction (ACR)-Prozeß

Statt des Endproduktes Silizium können auch die Ausgangsstoffe raffiniert, also rein dargestellt werden (Tab. 1, 2). Dieser in der Metallurgie üblichere Weg zur Darstellung sauerstoffaffiner Metalle wird beim ACR-Prozeß beschritten: Die Ausgangsstoffe Quarz und Kohlenstoff werden raffiniert und dann unter hochreinen Bedingungen zu Silizium umgesetzt [5] (Abb. 1).

Aus Quarzsand und verschiedenen Zuschlagstoffen werden zunächst Glasfasern hergestellt, die man mit Säure behandelt. Die Verunreinigungen ge-

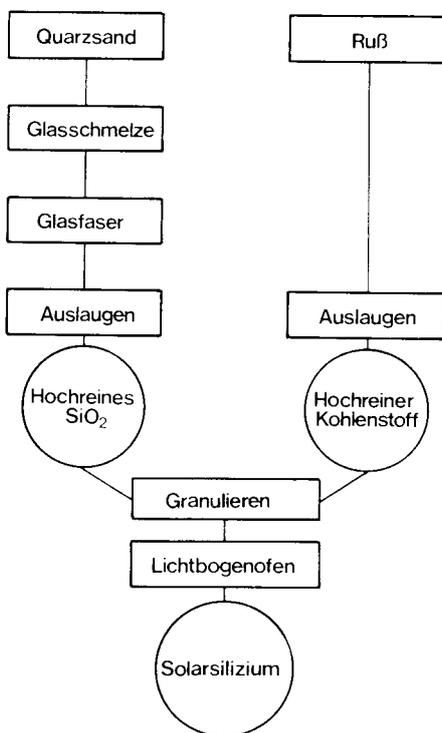


Abb. 1. ACR-Prozeß zur Gewinnung von Solarsilizium

hen in Lösung und hochreines SiO_2 bleibt zurück. Als Reduktionsmittel wird Ruß eingesetzt, der ebenfalls mit Säuren gereinigt wird. Das im Lichtbogenofen gewonnene Silizium (Abb. 2) enthält noch überschüssigen Kohlenstoff, der durch eine abschließende gerichtete Erstarrung abgetrennt wird. Der Energieaufwand ist siebenmal niedriger als beim ursprünglichen Siemens C-Prozeß (Tab. 2).

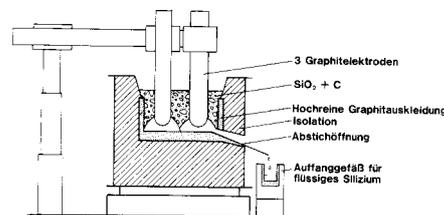


Abb. 2. 550-kVA-Elektro-Niederschaltofen zur Gewinnung von Solarsilizium

Flächensilizium

Im Anschluß an die Si-Herstellung muß das polykristalline Material in eine flächenhafte Form überführt werden, die zur Herstellung von hocheffizienten Solarzellen mit hoher Ausbeute geeignet ist. Nach dem derzeitigen Stand der Technik werden dazu meist Si-Stäbe mit rundem oder quadratischem Querschnitt hergestellt, die anschließend zu Scheiben zersägt werden. Bei modernen Verfahren werden direkt Bänder oder Scheiben in der erforderlichen Dicke hergestellt, so daß das Sägen entfällt.

Czochralski-Ziehen

Das heute am weitesten verbreitete Verfahren zur Herstellung von Siliziumstäben ist das Czochralski-Ziehen (Abb. 3). In eine Siliziumschmelze wird ein einkristalliner Silizium-Impfkristall getaucht, an dem Silizium aus der Schmelze kristallisiert. Durch langsames Herausziehen des dabei entstehenden Stabes erhält man bei geeigneter Prozeßführung einen zylindrischen Einkristall, der anschließend mit Innenschliffen in dünne Scheiben zersägt wird.

Die übliche Ziehgeschwindigkeit beträgt etwa 1 mm/min, so daß die Schmelze sehr lange auf $T \sim 1450^\circ\text{C}$ gehalten werden muß; die frei strahlende Schmelzoberfläche führt zu hohen Energieverlusten. Eine Erhöhung des Durchsatzes ist nur über eine Vergrößerung des Stabdurchmessers möglich, was heute unter den Bedingungen einer industriellen Produktion nur bis zu Stabdurchmessern von etwa 6 Zoll beherrschbar ist. – Der eingesetzte Quarztiegel kann nur einmal verwendet werden; seine Herstellung ist mit einem hohen Energieaufwand verbunden ($\sim 40 \text{ kWh/m}^2 \text{ Si-Fläche}$). Auch die verwendeten Widerstandsheizer aus hochreinem Graphit haben nur begrenzte Lebensdauer und verschlechtern die Energiebilanz dieses Verfahrens.

Im Tiegel bleibt eine gewisse Menge Silizium zurück. Desweiteren können vom gezogenen Stab Anfang- und Endstück nicht weiterverarbeitet werden, so daß nur etwa 75 % der ursprünglich eingesetzten Siliziummenge zum Sägen gelangen. Beim Sägen der Stäbe zu etwa 450 µm dicken Siliziumscheiben gehen rund 50 % des Materials verloren, da das Sägeblatt eine gewisse Stärke aufweisen muß. Tabelle 3 zeigt, daß niedrige Produktivität, geringe Siliziumausbeute und hoher Verbrauch an Verschleißmaterial beim Czochralski-Ziehen einen hohen Energieaufwand verursachen.

Prozeß	Cz	Block-Gießen	EFG	S-Web	Einheit
Flächengeschwindigkeit	5*	50*	5	1000	10 ⁻³ m ² /min
Materialverlust	60	60	▷0	▷0	%
Energieaufwand:					
- Schmelzen u. Erstarren	150	25	35	7	kWh/m ² Si
- Sägen	5	5	▷0	▷0	kWh/m ² Si

* Sägezeit nicht berücksichtigt

Tab. 3. Kenndaten verschiedener Prozesse zur Herstellung von Siliziumscheiber

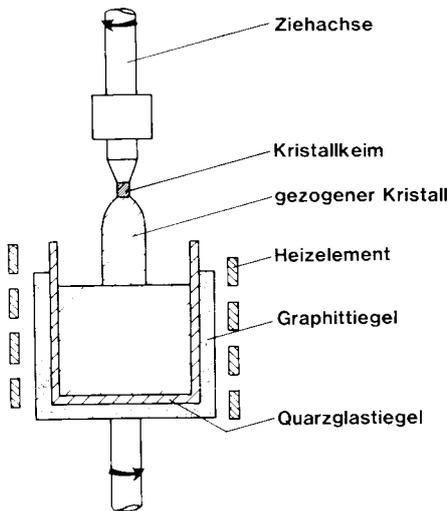


Abb. 3. Czochralski-Ziehen von Si-Einkristallen

Blockgießen

Bei diesem Verfahren wird Silizium aufgeschmolzen, das im Tiegel langsam gerichtet (von unten nach oben) erstarrt oder, günstiger, in Formen gegossen, um in diesen gerichtet zu erstarren. Die polykristallinen Blöcke werden anschließend zu Scheiben zersägt [6]. Die Produktivität der Anlagen ist sehr viel höher als die der Czochralski-Maschinen, da Schmelzen und Erstarren in getrennten Gefäßen ablaufen können und die Querschnittsfläche der Blöcke die der Czochralski-Stäbe weit übertrifft (40 x 40 cm). Die Schmelztiegel aus hochreinem Graphit können mehrfach verwendet werden. Entsprechend dem höheren Durchsatz und dem geringeren Verbrauch an Verschleißmaterial ermöglichen die Blockgieß-Verfahren eine beträchtliche Senkung des Energieaufwandes gegenüber dem Czochralski-Verfahren (Tab. 3). Das Sägen der Blöcke ist jedoch mit einem ähnlichen Materialverlust verbunden und damit energetisch ungünstig.

Mit der Blockgießtechnik und den folgenden Verfahren zur Scheibenherstellung erhält man direkt rechteckige Scheiben, die die Modulfläche besser ausfüllen als die runden Scheiben aus den Czochralski-Stäben. Die Zellen aus diesem polykristallinen Material weisen jedoch einen schlechteren Wirkungsgrad auf als Zellen aus einkristallinem

Material. Bei der Berechnung des Modulwirkungsgrades kompensieren sich die beiden gegenläufigen Effekte.

Edge-defined-film-fed growth (EFG)-Verfahren

Die EFG-Technik ist ein im Pilotstadium bereits eingeführtes Verfahren, bei dem Silizium direkt in eine flächenhafte Form gebracht wird [7]. Silizium wird in einem weitgehend abgedeckten Quarztiegel eingeschmolzen. In die Schmelze wird eine Graphitdüse getaucht, in der das Silizium durch Kapillarkräfte hochsteigt. An der Oberseite der Düse kann ein Band oder ein dünnwandiges, vieleckiges Rohr aus erstarrtem Silizium abgezogen werden, das anschließend zu rechteckigen Scheiben zerteilt wird.

Der Durchsatz ist bei dieser Technik gering, da die Erstarrungsfläche, über die die Erstarrungswärme abgeführt werden muß, klein ist. Dementsprechend hoch ist der Energieaufwand für das Warmhalten der Schmelze, so daß sich trotz der besseren Siliziumausbeute kein niedrigerer Energieaufwand als beim Blockgießen ergibt (Tab. 3).

Horizontal Supported-Web (HSW)-Verfahren

Eine wesentliche Vergrößerung der Erstarrungsfläche und damit eine Erhöhung der Flächengeschwindigkeit im Vergleich zur EFG-Technik ist eines der besonderen Merkmale des HSW-Ver-

fahrens [8]. Ein Graphitnetz wird unter einem flachen Winkel über die Oberfläche einer Siliziumschmelze geführt. In den Maschen des Netzes erstarrt Silizium; weiteres Silizium wächst auf, solange Kontakt zur Schmelze besteht (Abb. 4). Aufgrund der hohen Produktivität des Verfahrens (angestrebter Wert 1 m²/min) ergibt sich ein sehr niedriger Energieverbrauch, dessen größter Anteil auf die Energie zum Einschmelzen des Siliziums entfällt, die den theoretischen Minimalaufwand darstellt (Tab. 3).

Zellenfertigung

Der Energieaufwand bei der Zellenfertigung ist mit 26 kWh/m² Si-Fläche bei konventionellen Verfahren im Vergleich zu den anderen Fertigungsschritten klein (siehe „Diskussion“). In unserer Modellrechnung wurden berücksichtigt: Verbrauch von Chemikalien, Eindiffusion von Phosphor bei rund 900 °C sowie Materialeinsatz zum Aufbringen der metallischen Kontakte.

Beim Einsatz von Solarsilizium und bei Einführung der Bandziehverfahren schlägt sich eine Senkung des Energieverbrauchs im Bereich der Zellenfertigung deutlich in der Gesamtbilanz nieder. Neue, energiesparende Techniken, wie die nicht massenseparierte Ionenimplantation sowie die Verwendung von Dotier- und Antireflexlacken, stehen vor der Einführung in die industrielle Praxis.

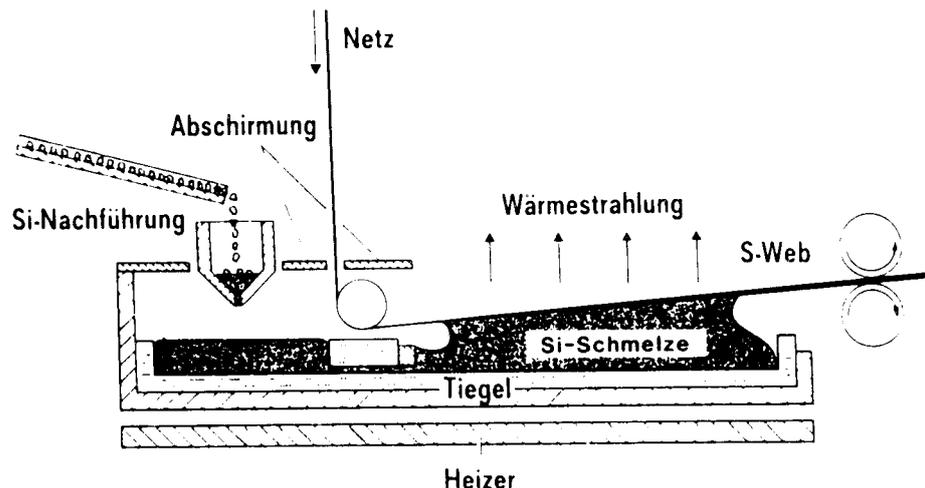


Abb. 4. Horizontales Ziehen eines Si-Bandes nach der S-Web-Technik

Modulproduktion

Bei der Modulfertigung werden die Solarzellen elektrisch miteinander verbunden und zum Schutz vor Witterungseinflüssen in ein Glas-Kunststoff-Sandwich eingekapselt; ein stabiler Aluminiumrahmen vervollständigt das Modul (Abb. 5). Tabelle 4 zeigt, daß der Aluminiumrahmen der energieintensivste Teil dieser konventionellen Modulkonstruktion ist. Durch ein geändertes Design ganz aus Kunststoff läßt sich der Energieaufwand bei der Modulproduktion erheblich verringern.

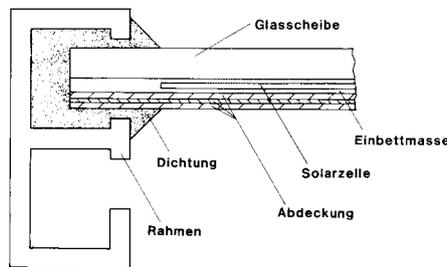


Abb. 5. Querschnitt durch ein Solarmodul

Moduldesign	Konvent. Modul	Kunststoff-Modul
Material:		
- Aluminium	215	-
- Glas	27	-
- Kunststoff	23	40
Prozeßenergie	5	3
Σ	270	43

Tab. 4. Energieaufwand in kWh zur Herstellung von 1 m² Modulfläche

Diskussion

Das Balkendiagramm in Abb. 6 zeigt die Energierücklaufzeit für vier Verfahrenskombinationen bei der Silizium-, Scheiben-, Zellen- Modulproduktion.

Kombination A gibt den Stand der Entwicklung wieder, der auch heute noch oft zur Berechnung der Energierücklaufzeit zugrunde gelegt wird, jedoch veraltet ist. Der hohe Verbrauch an energieintensivem Material aus dem Siemens C-Prozeß in seiner ursprünglichen Form wird durch das Czochralski-Ziehen verursacht. Zusammen mit dem hohen Aufwand für die Produktion eines konventionellen Moduls führt er zu Energierücklaufzeiten von etwa 8 Jahren. Bei Einsatz des weiterentwickelten Siemens C-Prozesses ergeben sich Energierücklaufzeiten von etwa 5 Jahren.

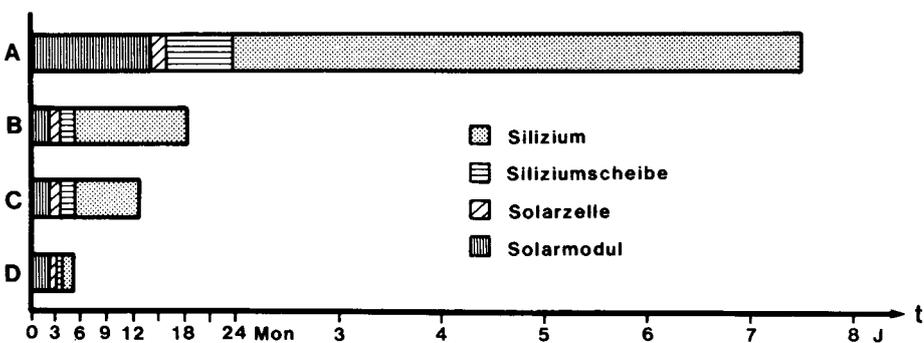
Kombination B zeigt, daß ein modernes Flächensilizium-Verfahren mit hoher Siliziumausbeute schon zu einer drastischen Verkürzung der Energierücklaufzeit führt.

Der Einsatz von Solarsilizium und ein geändertes Moduldesign in Verbindung mit heute üblichen Standardverfahren der Scheiben- und Zellenfertigung

(Kombination C) führt bereits zu einer Energierücklaufzeit von rund einem Jahr.

Kombination D schließlich bezieht noch künftige Techniken der Scheibenfertigung und Zellenproduktion in die Rechnung mit ein; ein so produziertes Modul gewinnt die investierte Energie in wenigen Monaten zurück.

Die Aufteilung des Balkens macht aber auch deutlich, daß der Senkung des Energieaufwandes durch die Modulfertigung Grenzen gesetzt sind. Dieser „Verpackungsanteil“ hat bei Verfahrenskombination D am Gesamtenergieaufwand einen viel größeren Anteil als etwa bei Kombination A. Der Energieaufwand für die Modulfertigung dürfte sich auch bei anderen Zellentypen (Dünnschichtzellen) nicht weiter senken lassen. Eine weitere Verkürzung der Energierücklaufzeit ist jedoch über die Verbesserung des Modulwirkungsgrades möglich. Kristalline Si-Module mit Wirkungsgraden von 15 % für terrestrische Anwendungen wurden bereits von der Firma Spire (USA) im Labormaßstab produziert.



- A Siemens C-Prozess - Cz-Ziehen - Konventionelles Modul
- B Siemens C-Prozess - EFG - Kunststoff Modul
- C ACR-Prozess - Gießen - Kunststoff Modul
- D ACR-Prozess - S-Web - verbesserte Zellentechn. - Kunststoff Modul

Abb. 6. Energierücklaufzeit für Solarmodule mit kristallinem Silizium

Literatur

- [1] Hunt, L.P.; Proc. 12th Photov. Specialists Conf., Baton Rouge, Louisiana, 1977, IEEE, 347-352
- [2] Spenke, B., Heywang, W.; Phys. Status Solidi (A) 64, 1981, 11
- [3] Yokoe, K., Noguchi, N., Horigome, T.; First Intern. Photov. Sci. Eng. Conf. Kobe, 1984, 821-823
- [4] Dieltl, I.; Proc. Mat. New Proc. Techn. for Photov. 163rd ECS Meeting, San Francisco, 1983 (Preprint)
- [5] Aulich, H.A., Eisenrith, K.-H., Schulze, F.-W., Urbach, H.-P.; Sixth E.C. Photov. Solar Energy Conference, London, 1985, 951-955
- [6] Gessert, C., Helmreich, D., Peterat, M.; Sixth E.C. Photov. Solar Energy Conf., London, 1985, 891-895
- [7] Wald, F.V.; in: Grabmaier J. (Ed.) Crystals-Silicon (Vol 5) Berlin 1981, 147-198
- [8] Falckenberg, R., Grabmaier, J.G., Hoyler, F.; Proc. of 166th Meeting of the Electrochem. Soc., New Orleans, 1984
- [9] Aulich, H.A.; Schulze, F.-W.; Strake, B.; Proc. 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1985, 1213-1218
- [10] Shimizu, Y.; Proc. Flate-Plate Solar Array Project Workshop on Low-Cost Polysilicon for Terrestrial Photovoltaic Solar-Cell Applications, Las Vegas, 1985, 57-78

Unter Hinweis auf die Erdbebenhäufigkeit in seinem Land gab Ministerpräsident Papandreou bekannt, daß in Griechenland keine Atomkraftwerke gebaut würden. Gleichzeitig unterstrich der Ministerpräsident, daß sich die Energiepolitik seines Landes auf die Nutzung sanfter Energieformen stützen werde. Nach Feststellung der Public Power Corporation (DEH) könnte Griechenland 15 bis 20 Prozent des heutigen Stromverbrauchs mit Windenergie decken. Ein entsprechendes Programm sieht bis 1992 den Bau von Windparks auf insgesamt 15 Inseln vor, wobei man an Einzelanlagen mit Leistungen von 50 und 100 W denkt.