

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

Band: 82 (1991)

Heft: 10

Artikel: Energieaufwand zur Herstellung von Solarzellen : Besprechung eines Forschungsberichtes

Autor: Real, M. / Spreng, D.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-902959>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 19.11.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Energieaufwand zur Herstellung von Solarzellen – Besprechung eines Forschungsberichtes

M. Real und D. Spreng

Im Hinblick auf eine verbreitete Anwendung der Photovoltaik findet auch das Verhältnis zwischen Energieinput und -output bei diesen Anlagen vermehrtes Interesse. Wie der Beitrag zeigt, lässt sich allerdings auf diese Frage keine einfache, allgemeingültige Antwort geben. Immerhin gelangt die hier vorgestellte Studie zum Schluss, dass die energetische Amortisationszeit nicht als Hindernis bei der Bewertung des künftigen Einsatzes angesehen werden muss.

Dans la perspective d'une large utilisation de la technique photovoltaïque, le rapport entre la fourniture et la consommation d'énergie de ces installations intéresse de plus en plus. Ainsi que l'article le montre, il n'est pas possible de répondre simplement et de manière généralement valable à cette question. L'étude présentée ici arrive toutefois à la conclusion que la durée d'amortissement énergétique ne doit pas être considérée comme un obstacle lors de l'évaluation de l'utilisation future.

Adressen der Autoren

Markus Real, Alpha Real AG, Energy Systems and Engineering, Feldeggstrasse 89, 8008 Zürich
 PD Dr. Daniel Spreng, Forschungsgruppe Energieanalysen, Institut für elektrische Energieübertragungen und Hochspannungstechnik, ETH, 8092 Zürich

Einleitung

Die Arbeit der Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, die hier besprochen wird, schliesst eine wichtige Wissenslücke [1]. Es dürfte deshalb angebracht sein, in dieser Ausgabe des VSE/SEV-Bulletins, in welcher die Nutzung der Sonnenenergie im Zentrum steht, die Resultate der Studie vorzustellen, obwohl der Schlussbericht schon bald zwei Jahre vorliegt.

Die Studie hat bisher, mindestens hierzulande, keine Schlagzeilen gemacht. Der Grund hierfür ist wohl der, dass die Resultate weder von den Sonnenenergie-Befürwortern noch von den Kritikern leicht zu Propagandazwecken eingesetzt werden können. Die Arbeit ist methodisch sehr sauber, von der Sache her informativ, aber die Resultate sind zu differenziert, als dass sie sich in wenigen Schlagworten zusammenfassen liessen.

Viele der bisherigen Arbeiten zur Bestimmung des Energieaufwands von Energiesystemen, u.a. auch von Sonnenenergiesystemen, sind in «Net-Energy Analysis» [2] zusammengefasst. Darin werden die publizierten Studien nach der Art der produzierten Energie geordnet. Systeme, welche Wärme produzieren, sind nicht in den gleichen Topf zu werfen mit solchen, die Elektrizität liefern, und Systeme, deren Produktion zeitlich konstant ist, sind von denjenigen zu unterscheiden, welche hin und wieder, ungeachtet des momentanen Bedarfs, Energie in der gewünschten Form anbieten.

Beispielsweise erfordert ein Sonnenkollektorsystem zur Gewinnung von warmem Wasser, das einen grossen Speicher einschliesst, einen grösseren Energieaufwand zu seiner Herstellung als ein System ohne diesen Speicher. Ein Kraftwerk, bei welchem zusätzlich eine Turbine und ein Generator zur Erzeugung von Elektrizität vorhanden ist, wird nochmals einen grösseren Herstel-

lungsaufwand haben. Ein möglichst kleiner Energieaufwand ist also nur positiv zu werten innerhalb einer Kategorie von Systemen, welche die gleiche Funktion erfüllen und den gleichen Nutzen erbringen.

Publizierte Untersuchungen des Energieaufwands von Sonnenenergiesystemen gab es bisher im Bereich (siehe [2]) der Sonnenkollektoren, der solarthermischen Kraftwerke und auch von Kraftwerken, welche die photovoltaische Gewinnung von Sonnenenergie im Weltall einschliessen. Eigenartigerweise sind terrestrische Photovoltaikanlagen bisher nicht im Detail untersucht worden.

Dem Münchner Untersuchungsbericht kommt eine besondere Bedeutung zu, erstens weil der Energieaufwand von terrestrischen Photovoltaik-Systemen bisher noch kaum untersucht wurde, zweitens weil er methodisch sauber erarbeitet ist und drittens weil bisher viele schlecht begründete Aussagen zu diesem Thema gemacht worden sind.

Untersuchungsmethode

Bevor die eigentliche Untersuchung beschrieben wird, soll hier eine Bemerkung zur Untersuchungsmethode gemacht werden. Schlecht begründete Aussagen zum Energieaufwand von Energiesystemen sind bisher oft aufgrund einer unzulässigen Methodik gemacht worden.

Zur Bestimmung des Energieaufwands von Produkten und Dienstleistungen werden verschiedene Methoden angewandt. Teilweise können die Methoden frei gewählt werden. Oft ist die gewählte Methode aber eng mit der Fragestellung oder mit den unausgesprochenen Erwartungen, die hinter der Fragestellung stehen, verbunden. Beispielsweise ändert sich der Charakter der Untersuchung völlig, wenn zum Energieaufwand eines Energiesystems

der private Energieverbrauch der in den verschiedenen Herstellungsschritten beschäftigten Mitarbeiter hinzugezählt wird. Man fragt dann nicht mehr klar nach dem Energieaufwand als einem von mehreren Inputs, sondern eher nach dem Energieaufwand als einem umfassenden Mass aller Dinge. Das heisst es wird eigentlich viel mehr nach der Vitalität eines Systems gefragt, als nach dem Energieaufwand aus ingenieurmässiger Sicht (vergl. [2]).

Aber auch wenn es um den Energieaufwand im engeren Sinn geht, können verschiedene Methoden angewendet werden. Insbesondere unterscheidet man die Input/Output-Methode und die Prozessanalyse. Erstere geht von der Input/Output-Matrix mit den Elementen xy aus. Das Element xy entspricht den Verkäufen während eines Jahres vom Wirtschaftssektor x zum Wirtschaftssektor y . Mit Hilfe der direkten Energiebezüge jedes einzelnen Sektors ist es möglich zu bestimmen, wieviel Energie direkt und indirekt (gemessen in Energieeinheiten) aufgewendet wird, um eine Einheit Output (gemessen in Geldeinheiten) jedes einzelnen Wirtschaftssektors einem Endverbraucher anbieten zu können.

Diese Methode verteilt den gesamten Energieverbrauch der Wirtschaft (Energieverbrauch insgesamt minus Energieverbrauch der privaten Haushalte) auf die von den Endverbrauchern bezogenen Produkte und Dienstleistungen. Sie hat den Vorteil, dass im Prinzip der gesamte indirekte Verbrauch erfasst wird. Sie hat aber auch eine Reihe von Nachteilen: sie ist nur in Ländern anwendbar, für welche eine Input/Output-Matrix erhoben wird; die neuesten Daten sind jeweils fünf und mehr Jahre alt und vor allem beziehen sich die Daten auf Durchschnittsprodukte und Durchschnittspreise. Es können also nur Durchschnittsprodukte von Sektoren, die effektiv erhoben wurden und deren Preise bekannt sind, analysiert werden.

In der Schweiz gibt es keine Wirtschaftsstatistik dieser Art. In den USA werden rund 370 Sektoren unterschieden, die aber sehr unterschiedliche Grösse haben. Es gibt beispielsweise einen separaten Sektor für Briefpapier, andererseits sind alle Produkte der organischen Chemie in einem einzigen Sektor zusammengefasst.

Die Prozessanalyse sollte im Prinzip auf das gleiche Resultat für den gesamten Energieaufwand zur Herstellung eines Produktes kommen. Die Herstellung wird in Prozessschritte unterteilt: Erzabbau, Rohstoffgewinnung, Herstellung von Halbfabrikat, von Fabri-

kat, Produktteil, Produkt inkl. Verpacken usw. Jeder Prozessschritt wird dann ingenieurmässig analysiert, der direkte Energieverbrauch wird untersucht und der indirekte Energieverbrauch abgeschätzt. Letzterer ergibt sich aus dem Verbrauch von Hilfsmaterialien, der Abnutzung von Einrichtungen und allfälligen Transporten.

Bisherige Analysen der Photovoltaik sind meist nach der Input/Output-Methode gemacht worden. Diese ist aber nur dann anwendbar, wenn eine Photovoltaikanlage so sehr zerlegt wird, dass die Energieintensitäten auf typische Produkte angewandt werden können. Wird von den Kosten einer Pilotanlage direkt auf den Energieaufwand geschlossen, erhält man viel zu hohe Zahlen, denn die Kosten einer Pilotanlage sind immer wesentlich höher als Kosten von typischen Produkten. Behauptungen, Photovoltaikanlagen hätten im Prinzip einen zu hohen Energieaufwand und könnten kaum je mehr Energie liefern als sie selber brauchten, beruhen auf methodisch unzulässigen Analysen dieser Art.

Die hier besprochene Untersuchung hat darum einen besonderen Wert, weil sie auf einer detaillierten Prozessanalyse beruht. Prozessanalysen haben zwar den Nachteil, dass indirekte Energieaufwendungen immer nur teilweise erfasst werden. Bei den energieintensiven Produktionsmethoden, die hier angewendet werden, resultieren aus diesem Nachteil aber nur unbedeutende Ungenauigkeiten.

Ist der gesamte Energieaufwand zur Herstellung einer Photovoltaik-Anlage, vom Rohstoff bis zur fertig installierten Anlage, einmal bestimmt, so lässt sich dieses Resultat in verschiedener Weise auf den zu erwartenden Energieertrag beziehen. Es entstehen daraus verschiedene Masszahlen, auf deren genaue Definition jeweils zu achten ist. Dabei ist wichtig, welche Energien zueinander in Beziehung gesetzt werden (Primärenergie, Elektrizität, Brennstoffe, Wärme, angebotene Energie und effektiv genutzte Energie) und wie der Energieaufwand, der während des Betriebs entsteht, in Rechnung gestellt wird.

Da in der Münchner Studie der Energieaufwand auf Stufe Endenergie separat nach Elektrizität, Brennstoffen und nichtenergetischem Verbrauch (Rohölverbrauch für Kunststoffe, Schmieröl u.ä.) analysiert wurde, steht dem Leser frei, eine der in der Studie gewählten Masszahlen umzurechnen. Bei Photovoltaik-Anlagen fällt kein Energieaufwand während dem Betrieb

an, es muss also nicht entschieden werden, wie dieser in Rechnung gestellt werden soll.

Den in Bild 2 dargestellten energetischen Amortisationszeiten AZ liegt folgende Definition zugrunde: Der gesamte Energieaufwand, vom Rohstoff bis zum fertigen Kraftwerk, wurde auf Stufe Endenergie erhoben (in Deutschland wird dieser gesamte Energieaufwand oft kumulierter Energieverbrauch genannt) und in Primärenergie umgerechnet, indem Elektrizität mit 2,5, Brennstoffe mit 1,176 und der nicht-energetische Verbrauch mit 1,25 multipliziert und die drei Zahlen addiert werden. Der in Rechnung gestellte Primärenergieertrag ist die produzierte Elektrizität, die nicht nur mit dem Faktor 2,5, sondern – da der Stromtransport entfällt – mit 2,65 multipliziert wird. Und die energetische Amortisationszeit (in Monaten) ergibt sich, indem der gesamte Energieaufwand in Primärenergie durch den durchschnittlichen monatlichen Primärenergieertrag dividiert wird. (Unüblich ist die Verwendung der Einheit kWh für den Primärenergieverbrauch. Im folgenden – insbesondere Bild 1 – wird diese Konvention, die in der Studie getroffen wurde, jedoch beibehalten.)

Beschreibung der Prozesskette zur Herstellung von Solarzellen

In der Studie wird die Herstellung von kristallinen und amorphen Solarzellen aus Silizium diskutiert. Diese Limitierung auf die Siliziumtechnologie ist gerechtfertigt aufgrund der Tatsache, dass heute praktisch sämtliche terrestrischen Energieanwendungen mit Silizium solarzellen realisiert werden. In Tat und Wahrheit hat dieses Material einige hervorragende Eigenschaften, welche es für den Einsatz in Solarzellen prädestinieren: Silizium ist das zweithäufigste Element der Erdkruste und damit praktisch unerschöpflich. Siliziumverbindungen gehören zu den stabilsten Verbindungen überhaupt. Damit ist eine gute Voraussetzung geschaffen, dass die Solarzellen auch eine lange Lebensdauer haben. Die Entsorgung von Siliziumverbindungen ist wie z.B. die Entsorgung von Glas umweltmässig kein Problem.

Herstellung kristalliner Solarzellen

Der Stand der Siliziumtechnologie ist wegen der verbreiteten Anwendung in der Elektronikindustrie sehr hoch. Davon profitiert die Solarzellenindu-

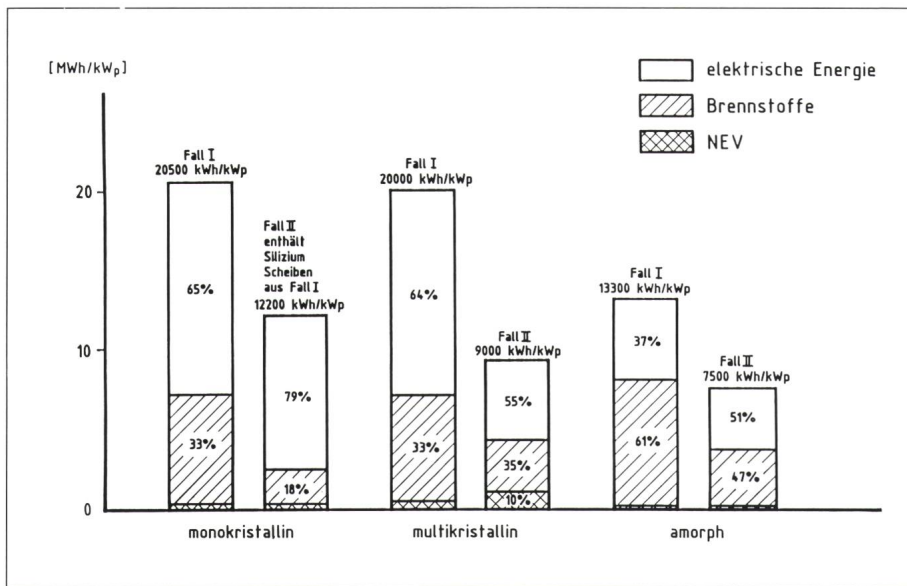


Bild 1 Kumulierter Primärenergieverbrauch von photovoltaischen Kraftwerken
Fall I: Stand Technik 1988; Fall II: Stand Technik 1994 (extrapoliert)

Quelle: F/E

aufgeschmolzen und aus der Schmelze nach dem Tiegelziehverfahren (Tschochralsi-Ziehverfahren) monokristalline Stäbe mit einem Durchmesser bis 130 mm und einer Länge bis rund 1,5 m gezogen. Im Gegensatz zu der Herstellung multikristalliner Zellen ist bei der Herstellung monokristalliner Solarzellen die Anforderung an die Reinheit äusserst gross. Die Verwendung von neuen Prozessschritten zur Herstellung von solarem Billigmaterial ist deshalb bei der monokristallinen Technologie nur begrenzt möglich.

Anschliessend werden die kristallinen Blöcke mittels speziellen Innenloch- oder Drahtsägen in Scheiben zertrennt. Die Studie geht von Solarzellenscheibendicken von rund 450 µm aus. Für die Langzeitperspektive ist die Herstellung von dünneren Scheiben von rund 200 µm mitberücksichtigt.

Die Resultate der Studie zeigen gerade in diesem Bereich eine ausgeprägte Sensibilität des Energieverbrauches in Abhängigkeit von der Scheibendicke.

Dabei hat die Entwicklung der letzten zwei Jahre die Studie insofern bereits überholt, als heute bereits die Sägetechnologie soweit ausgereift ist, dass kommerziell die Herstellung dünner Scheiben von 200 µm Dicke und weniger möglich sind. Dass diese noch nicht überall in der Produktion Eingang gefunden haben, liegt vor allem im entsprechend schwierigeren Handling der dünnen Scheiben in der nachfolgenden Weiterverarbeitung der Solarzellen.

Anschliessend an die Herstellung der Scheiben durch Trennschleifen erfolgt eine Reihe von kleinen Prozessschritten, welche aus der kristallinen Scheibe eine Solarzelle machen. Die kristalline, rund 200 bzw. 450 µm dicke Siliziumscheibe wird zuerst nasschemisch geätzt, dann texturiert, dann in einer Gasphasendiffusion dotiert, dann nochmals nasschemisch behandelt, mittels Siebdruck kontaktiert, zum Teil oberflächenpassiviert, mit einer Antireflexschicht aufgedampft, mechanisch randbearbeitet und am Schluss getestet.

Anschliessend werden die einzelnen Zellen zu einem seriellen Verbund zusammengelötet und in einer Kunststoffeinbettung zu einem Laminat verpackt. Dieses wird heute noch meist mit einem Aluminiumrahmen gegen mechanische Belastungen geschützt und hinten mit einer Klemmenbox versehen, wo die elektrischen Anschlüsse für die Plus- und Minusleitung vorgesehen sind. Auf dem Markt werden jedoch auch zusehends Lamine ohne Aluminiumrahmen eingesetzt.

strie, welche mit Silizium als Ausgangsbasis arbeitet.

Für die Herstellung des technischen Siliziums verwendet man weltweit Siliziumdioxid als Ausgangsstoff. Siliziumdioxid kommt in der Natur sehr häufig vor und seine bekannten Erscheinungsformen sind Sand, Quarz, Quarzkies oder in sehr reinem Zustand z.B. die Bergkristalle. Die Reduktion dieses Ausgangsstoffes wird grosstechnisch in Elektro-Niederschächtföfen mit Kohlenstoff durchgeführt. Durch einen Lichtbogen zwischen den Elektroden und dem Ofenboden werden die hohen Temperaturen, die für eine effiziente Prozessführung erforderlich sind, erzeugt. Das Silizium wird in flüssiger Form bei ca. 1500° abgestochen und besitzt eine Reinheit von 98 bis 99%.

Mit einer anschliessenden Raffination mit Sauerstoff kann die Reinheit bis auf 99,5% gesteigert werden. Obwohl die Siliziumreduktion seit vielen Jahren grosstechnisch praktiziert wird, muss das Verfahren aus energetischer Sicht als noch nicht optimiert beurteilt werden. Die Studie zeigt hier gewisse Lücken auf, wobei sie offen lässt, wie weit das vorhandene Potential zur Reduzierung des Energieeinsatzes noch ausgeschöpft werden kann.

In einem Zwischenschritt wird zur weiteren Reinigung das Silizium in eine gasförmige Verbindung überführt. Diese gereinigten Verbindungen werden anschliessend wieder zerlegt und hochreines Silizium (auch Polysilizium oder EG-SI genannt) abgeschieden.

Es ist der gleiche Prozess, welcher in der Halbleiterindustrie verwendet wird. Tatsächlich wird nur ein Bruchteil der

heutigen Produktionskapazität an hochreinem Silizium für Solarzellen verarbeitet. Da die Nachfrage auf dem Photovoltaikmarkt zurzeit noch gering ist und auch teilweise Überkapazitäten auf dem Halbleitermarkt bestehen, lohnt sich der Aufbau einer eigenständigen Produktion zur Reinigung von «Solarsilizium» derzeit nicht. In der Studie wird ausgeführt, dass die vorhandenen Prozesse wohl kaum energetisch optimiert sind. Entsprechende alternative Prozesse, welche energetisch weniger Verluste haben, sind zwar entwickelt worden, befinden sich aber noch im Forschungs- oder Pilotmassstab. Auf solche Alternativen wird in der Studie nicht eingegangen.

Zur Herstellung multikristalliner Solarzellen wird das eben gereinigte Polysilizium im Unterdruckbereich unter Schutzgas aufgeschmolzen und in Kokillen gegossen, wo es durch eine kontrollierte Abkühlung langsam erstarrt. Die Grösse der Kokillen und die Art des Abkühlvorganges bestimmen massgebend die Kosten und damit den Energieaufwand dieses Prozessschrittes. Zudem ist dieser Prozessschritt äusserst kritisch für die Qualität des Ausgangsmaterials und damit für den Wirkungsgrad der Solarzelle. In diesem Bereich bestehen auch grosse Unterschiede zwischen den einzelnen Solarzellenfabrikanten. Es existiert ein grosses Potential an Verbesserungen und damit an der energetischen Nutzbilanz.

Wie multikristalline Solarzellen werden die monokristallinen aus dem reinen Polysilizium in Halbleiterqualität hergestellt. Dazu wird das Polysilizium im Unterdruckbereich unter Schutzgas

Anschliessend werden die Module nach entsprechenden IEC-Verfahren getestet und zum Versand verpackt.

Herstellung amorpher Solarzellen

Die in der Studie beschriebenen amorphen Solarzellen bestehen ebenfalls aus dem Grundmaterial Silizium. Die Prozessschritte sind dagegen grundverschieden. Wie der Name amorph aussagt, handelt es sich bei diesem Typus Solarzelle nicht um eine kristalline Verbindung, sondern um eine ungeordnete Anordnung von Siliziumatomen auf einem Substrat. Da die Prozessschritte Kristallbilden, Sägen und Diffundieren der PN-Übergänge bei der amorphen Solarzelle wegfallen, ist für die Herstellung der amorphen Zelle bedeutend weniger Energie notwendig.

Die amorphe pin-Schicht wird auf ein Glassubstrat abgeschieden. Dieses ist bereits mit einer transparenten, leitenden Schicht beschichtet. Die amorphe Siliziumabscheidung erfolgt in einem Glimmentladungsreaktor. Die Rückseitenkontaktierung erfolgt durch Sputtern. Durch den Integralprozessaufbau, welcher direkt auf dem frontseitigen Glassubstrat aufbaut, muss nur die Rückseite der Solarzelle noch vor Umwelteinflüssen geschützt werden. Dazu werden die Module entweder mit einem Schutzlack versehen oder, falls längere Lebensdauer gefordert wird, wird eine Verkapselung der Module in Laminieröfen durchgeführt.

Die Technologie konnte sich bis heute noch nicht auf dem Markt der Energieanlagen durchsetzen, da der Wirkungsgrad der Zelle mit rund 5...6 % sehr schlecht ist und das Langzeitverhalten unbefriedigend ist.

Resultate der Studie

Energieaufwand

In der Studie wurden minutiös die einzelnen Prozessschritte analysiert und die Energieaufwendungen für die einzelnen Schritte detailliert ausgewiesen. Die Daten dieser Prozessanalyse basieren zum Teil auf Messungen und, wo diese nicht möglich waren, auf Betriebsaufzeichnungen über längere Zeit. Nicht ins Gewicht fallende Energieflüsse wurden zum Teil über monetäre Investitionen unter Zuhilfenahme der Input/Output-Methode abgeschätzt.

Dabei wurde immer auf eine strikte Aufteilung des Endenergieverbrauches in elektrische Energie und Brennstoffe und die Ermittlung des nicht energetischen Verbrauches in allen Prozessschritten geachtet. Insbesondere wurde

in der Studie auch analysiert, welche Energieverbrauchsanteile einer gut ausgelasteten Anlage bei der Produktion lastabhängig, bzw. lastunabhängig sind. Damit kann auch der Einfluss der Kapazitätsauslastung einer Produktionsanlage eliminiert und auf den Energieverbrauch extrapoliert werden.

Die Studie basiert auf Daten, welche vor Juli 1989 erfasst wurden. Um nicht nur den Ist-Zustand veralteter Produktionsmöglichkeiten zu untersuchen, wurde auch die damalige aktuelle Entwicklung auf einen Zeitraum von 5 Jahren extrapoliert und als Fall t + 5 bezeichnet. In beiden Fällen wird mit gut ausgelasteten Produktionsanlagen gerechnet. Der Energieaufwand ist in Bild 1 dargestellt.

Energetische Amortisationszeiten

Die Dauer der energetischen Amortisationszeit hängt neben dem energetischen Aufwand, welcher für die Installation und den Betrieb der Anlage notwendig ist, vor allem auch vom Ertrag ab. In der Studie wurden dabei die Berechnungen vor allem für die klimatischen Gegebenheiten in der Bundesrepublik Deutschland unterstellt. Die Einstrahlungsverhältnisse in der Schweiz dürften im Mittelland leicht und vor allem im Jura, der Westschweiz, dem Alpengebiet und insbesondere im Tessin wesentlich höher sein. Aufgrund der konservativen Klimawerte von Deutschland errechnet die Studie die in Bild 2 wiedergegebenen energetischen Amortisationszeiten.

Die Studie gelangt zum Schluss, dass der kumulierte Energieverbrauch und die energetischen Amortisationszeiten von photovoltaischen Solarzellenkraftwerken auch in Deutschland nicht als Hindernis bei der Beurteilung des Einsatzes und des Potentials einer zukünftigen Energieversorgung angesehen werden kann. In Bild 2 sind die energetischen Amortisationszeiten photovoltaischer Kraftwerke dargestellt und zwar jeweils aufgegliedert nach den verschiedenen untersuchten Solarzellentechnologien monokristallin, multikristallin und amorph. Dabei wurde jeweils zwischen Fall 1 und Fall 2 unterschieden. Fall 1 beschreibt die Technik von 1988 und früher und Fall 2 ist eine entsprechende Extrapolation auf das Jahr 1994 (in beiden Fällen wird mit gut ausgelasteten Produktionsanlagen gerechnet).

Unsicherheiten und Unvollständigigkeiten

Sämtliches Zahlenmaterial, welches für die Berechnung der Energieaufwen-

dungen zur Herstellung der Solarzellen und der Kraftwerke gemessen, berechnet, bzw. abgeschätzt wurde, stammt ausschliesslich von deutschen Herstellern von Solarzellen, bzw. vom Ausgangsmaterial Silizium. Es ist denkbar, dass andere Hersteller in der Optimierung ihrer Prozesse schon weiter fortgeschritten sind. Tatsächlich deuten die Autoren der Studie auf ein noch bedeutendes Verbesserungspotential hin. Allerdings wird in der Studie nicht genau definiert, wo dieses Verbesserungspotential liegt.

Bei der Beurteilung der verschiedenen Technologien wurde für die amorphe Solarzelle ein Wirkungsgrad von 6% und für die polykristalline Solarzelle ein Wirkungsgrad von 12% angegeben. Dabei dürfte der Wirkungsgrad der amorphen Solarzelle noch unter dem Wert von 6% liegen, dagegen erreichen polykristalline Solarzellen heute schon Wirkungsgrade von 13% und mehr. Mit dieser Korrektur dürfte sich der Vorteil betreffend energetischer Rückzahlungszeit amorpher Zellen gegenüber den kristallinen leicht reduzieren.

Bei der Berechnung der energetischen Aufwendungen für das Kraftwerk, bestehend aus Kabeln, Unterbau und Elektronik, wurde wiederum auf deutsche Pilotanlagen zurückgegriffen. Ob diese in der jetzigen Phase schon optimiert sind, muss angezweifelt werden. Insbesondere wurde die ganze Integration der Solarmodule im Gebäude vollständig weggelassen.

Durch das in der Schweiz bereits realisierte Projekt «Megawatt», bei dem eine Vielzahl von standardisierten 3-kW-Anlagen in Gebäuden integriert wurden, hat sich gezeigt, dass der (energetische) Aufwand an Haltestrukturen und Material bedeutend kleiner ist als dies bei den hier mituntersuchten Modellanlagen. Aufgrund der Modularität von Solarzellenanlagen muss man annehmen, dass «economies of scale», wonach die spezifischen Anlagekosten mit zunehmender Grösse abnehmen, bei Solarzellenanlagen nicht unbedingt zutreffen.

Neben der geographischen Einschränkung der Quellenangaben auf Deutschland ist auch die Einschränkung auf das Grundmaterial Silizium zu wenig begründet. So hat z.B. seit Abschluss der Studie im Jahre 1989 ein führender Elektrokonzern in Deutschland die amerikanische Firma ARCO aufgekauft, welche ein erfolgversprechendes Herstellungsverfahren mit anderen Materialien für die Herstellung von Dünnschichtzellen untersucht. Bei

der weiteren Beurteilung der verschiedenen Technologien wäre es wertvoll, wenn eine etwas breitere Palette von möglichen Solarzellenmaterialien im Vergleich aufgeführt würde.

Die potentiell wesentlichste Verkürzung der energetischen Amortisationszeit wird jedoch erreicht, wenn kristalline Zellen ohne die energiefressenden Zwischenschritte «Kristallbildung» und «Sägen» auskommen. Es werden weltweit rund 20 Verfahren untersucht, Solarzellenscheibchen zu giessen, epitaktisch aufzutragen oder direkt als Band aus der Schmelze zu ziehen. Obwohl sich bis heute noch kein Verfahren zur industriellen Reife entwickeln konnte, wäre es interessant gewesen, das Potential der Bandtechnologie darzustellen.

Für die Berechnung des Erntefaktors, auf den hier nicht weiter eingegangen wird, wurde eine Lebensdauer der Anlage von 20 Jahren angenommen. Nachdem nun aber heute Anlagen bekannt sind, welche 1967 installiert wurden und noch immer einwandfrei funktionieren, darf bei kristallinen Solarzellen von einer viel längeren Lebenserwartung ausgegangen werden.

Vergleich mit anderen Kraftwerken

Die Elektrizitätserzeugung mittels Photovoltaik befindet sich noch in der Anfangsphase, so dass energetische Amortisationszeiten, die sich auf den jetzt notwendigen Aufwand bezüglich Material und auf heutige Produktionsmethoden beziehen, mehrere Jahre betragen, selbst wenn man von gut ausgelasteten Produktionsanlagen ausgeht. Man darf aber damit rechnen, dass in Zukunft Solarzellen, die mit ausgereiften industriellen Methoden produziert und in gut geplanten Systemen eingesetzt werden, zu Rückzahlzeiten führen, die ähnlich sind wie diejenigen anderer, nicht-fossil befeuerter Kraftwerke. (Bei fossil befeuerten Kraftwerken kann von

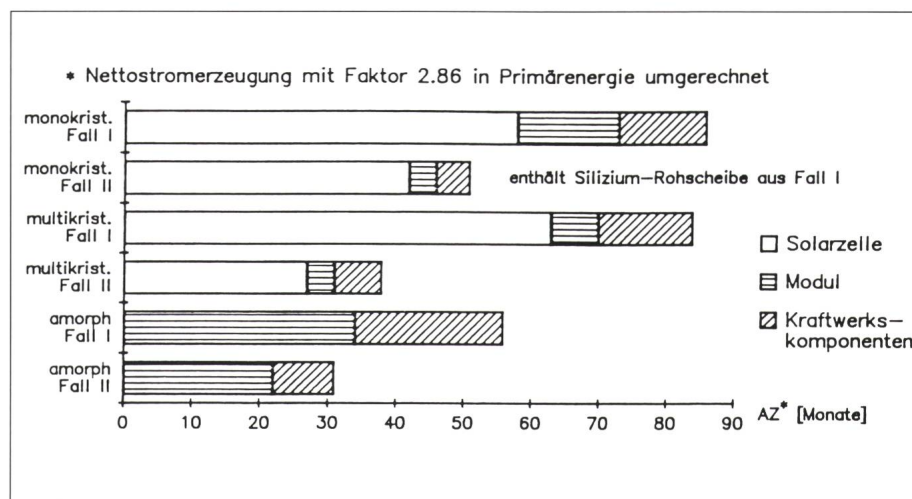


Bild 2 Energetische Amortisationszeiten von photovoltaischen Kraftwerken mit $T_0 = 1000 \text{ h/a}$
Fall I: Stand Technik 1988; Fall 2: Stand Technik 1994 (extrapoliert)

Quelle: FfE

einer energetischen Rückzahlzeit gar nicht gesprochen werden, da bei diesen Kraftwerken der Energieaufwand ständig den Energieertrag übertrifft!)

Bei einer solarthermischen Prototyp-Anlage, die für die Alpensüdseite geplant wurde, ergäbe sich eine energetische Amortisationszeit von einem Jahr. An sehr sonnigen Standorten weisen Anlagen von diesem Typ Rückzahlzeiten von wenigen Monaten auf.

Bei einem Kernkraftwerk der üblichen Art werden zum Bau der Anlage und für die Bereitstellung der ersten beiden Brennstoffchargen eine Energiemenge investiert, die in weniger als einem halben Jahr vom laufenden Kraftwerk produziert wird. Bei Hochtemperaturreaktoren, moderneren Anreicherungstechniken usw. ergeben sich noch kürzere Rückzahlzeiten. Fossil-befeuerte Kraftwerke brauchen direkt und indirekt ständig mehr Energie als sie liefern.

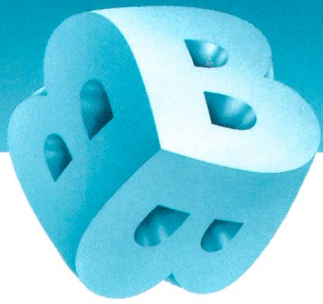
Besonders kurze energetische Amortisationszeiten weisen Systeme auf, welche natürliche Bewegungsenergie in Elektrizität umwandeln, also Wasser und Windkraftwerke.

Mit der Einführung einer Technologie zur Nutzung der erneuerbaren Energien wird diese zuerst einmal zum nicht vernachlässigbaren Energiekonsumenten. Es ist sinnvoll, wenn die Industrienationen diese Energieinvestitionen für die Zukunft tätigen, bevor die traditionellen Ressourcen knapp werden.

Das in der Studie angedeutete Potential zur nochmaligen Verbesserung der Energiebilanz kann nur erreicht werden, wenn die Photovoltaik-Technologie den Sprung zur industriellen Fertigung schafft.

Literatur

- [1] Gerd Hagedorn, Stefan Lichtberger und Herbert Kuhn: Kumulierter Energieverbrauch für die Herstellung von Solarzellen und photovoltaischen Kraftwerken. Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, Juli 1989.
- [2] Daniel T. Spreng: Net-Energy Analysis. Praeger, New York 1988.



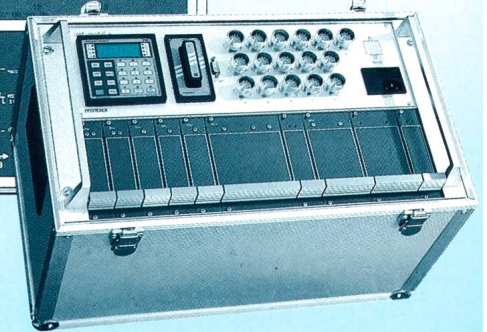
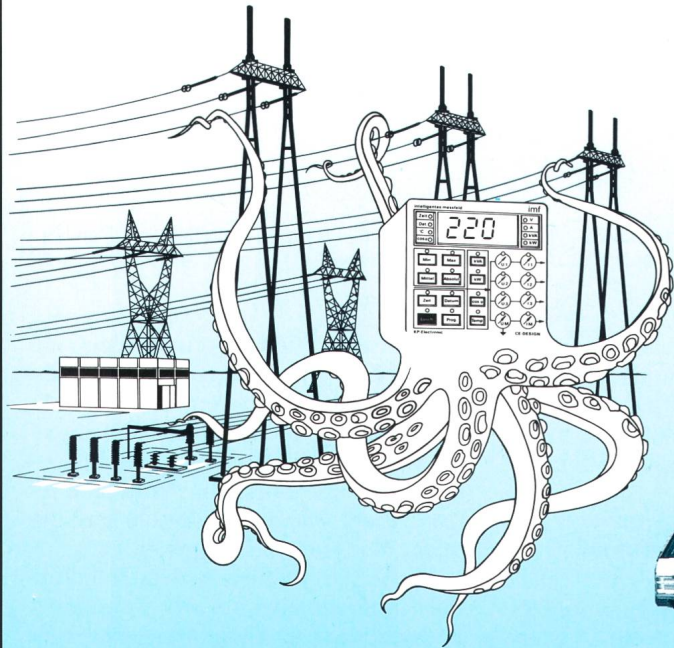
F. Borner AG

Stationenbau, Kabinenbau, El. Anlagen

CH-6260 Reiden, Telefon 062 81 20 20, Telefax 062 81 29 38

Mobile Messtechnik für die Netzanalyse

Messung von 16 Kanälen gleichzeitig
Grafische Auswertung auf dem Computer



Mobile Demonstration
in Ihrem Werk



Rufen Sie uns an!

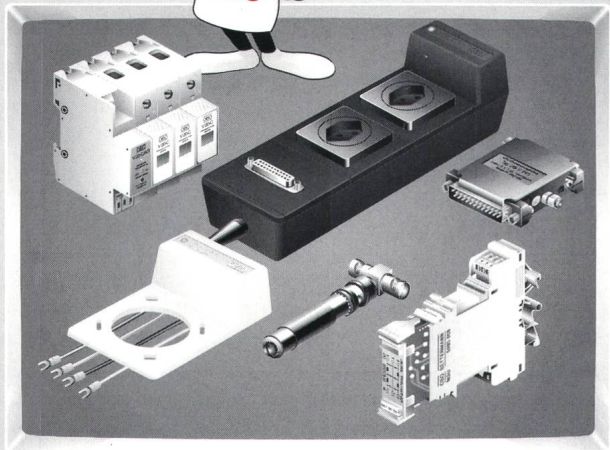
OBO-Direct

der neue Fachservice der

BETTERMANN AG

exclusiv
nur für
die Schweiz!

Schalten
Sie aufs OBO-
Sicherheitsprogramm –
der direkte Kontakt
macht's!



Überspannungssicherheit aus erster Hand:
Nutzen Sie die Vorteile Ihres Direct-Kontaktes.
*OBO bietet Ihnen ein komplettes Programm
für Grund- und Feinschutz – Hardware und
Know-how aus einer Hand:*

- die V 20-Familie mit Fernsignalisierung und akustischem Signal – modularer Aufbau im 17,5 mm Raster.
- SNS – DNS mit OBO-TEC-Sicherheit für den individuellen Geräte-Feinschutz.
- OBO-Koaxschutzgeräte für BNC oder UHF-Anschlüsse
- OBO Überspannungsschutzkaskade für MSR Anlagen
- OBO-Datenleitungsschutzgeräte schützen vor Überspannungen auf Datenleitungen

Bettermann AG · Lochrütiried · CH - 6386 Wolfenschiessen
Tel.: 041/ 65 24 64 · Fax.: 041/ 65 19 37