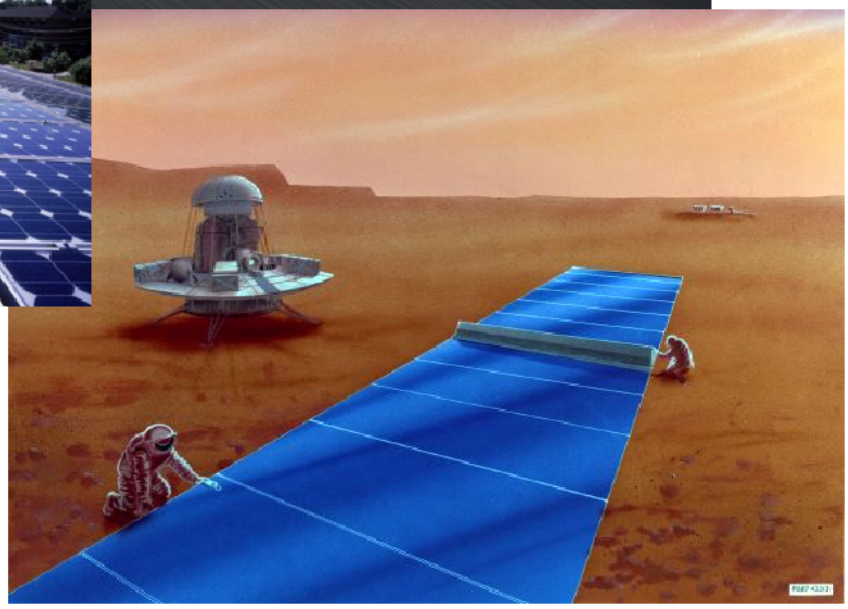
Ökobilanz von Photovoltaikanlagen (PVA)

Christoph Zimmermann

Februar 2004



Einleitung

Mit Photovoltaik (PV) Elektrizität zu produzieren verursacht keine Luftverschmutzung, keine Treibhausgase und benötigt keine endliche fossile Ressourcen. Die Nachfrage nach photovoltaischen Produkten ist in den letzten Jahren sprunghaft angestiegen, ein weiteres Wachstum des Marktes mit ca. 25% jährlich wird allgemein erwartet. Weltweit sind die Photovoltaikhersteller dabei, industrielle Fertigungen mit hohen Kapazitäten für die Photovoltaik aufzubauen. Neben den Möglichkeiten zur Kostenreduktion und den technischen Potentialen ist vor einer breiten Markteinführung der Photovoltaik zu klären, ob eine grossmassstäbliche Markteinführung nicht unerwünschte ökologische Folgen haben könnte. Während des Betriebs von PV-Anlagen sind schädliche Einflüsse auszuschliessen, nicht aber bei ihrer Herstellung und Entsorgung. Zu klären sind hier mögliche Freisetzungen von toxischen Stoffen, die ökologischen Auswirkungen der insgesamt mobilisierten Stoffströme sowie die energetische Amortisationszeit.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung....2
Stoffströme: wie gross ist der ökologische Rucksack einer Solarzelle?....3
Toxizität: Sind Solarzellen giftig?....3
Energierückzahlzeit: Wann amortisieren sich Solarzellen?....3
Recyclingfähigkeit von Photovoltaikmodulen....4
Die Chance der Solarwirtschaft: Geschlossene Stoffströme....6
Fazit....6

Stoffströme: wie gross ist der ökologische Rucksack einer Solarzelle?

Auswirkungen des so genannten ökologischen Rucksacks, also der Summe der Stoffströme, die in der industriellen Vorleistungskette von der Solarmodul-Fabrik bis zum Bergwerk mobilisiert werden, sind kein Grund, die Photovoltaik als bedenklich für Mensch und Umwelt einzustufen.

Bei der Verwendung von Dünnschichtmodulen aus amorphem Silizium lassen sich unter südeuropäischen Einstrahlungsbedingungen aus einem Kilogramm Silizium genauso viele Kilowattstunden Strom herstellen wie aus einem Kilogramm angereicherten Uran. Allerdings verwandelt sich das Uran in radioaktive Isotope, die über Jahrtausende von der Umwelt isoliert werden müssen. Silizium kann dagegen problemlos recycelt werden, denn es wird ja nicht im eigentlichen Sinne "verbraucht". Bei der Nutzung erneuerbarer Energien findet der "Verbrauch" in Form der Kernfusion auf der Sonne statt, ohne Auswirkungen für die Biosphäre. Ferner gehört Uran zu den seltenen Stoffen auf der Erdkruste, während Silizium als zweithäufigstes Element - nach menschlichen Massstäben - unerschöpflich auf der Erde vorhanden ist. Erst bei einem erheblichen Ansteigen der jährlichen Produktion muss eine mögliche Erschöpfung der Silber Ressourcen (mc-Si Module) und der Indium Ressourcen (CIS Module) in Betracht gezogen werden.

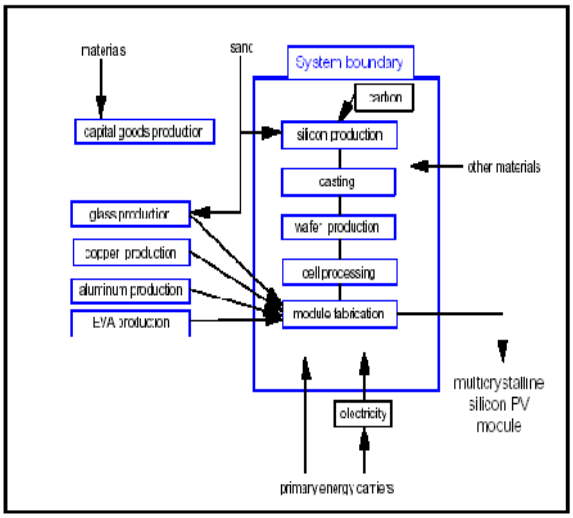


Abbildung 1: Materialfluss bei der Produktion von mc-Si Modulen

Toxizität: Sind Solarzellen giftig?

Die teilweise geäusserte Furcht, dass bei der Massenproduktion von Solarzellen grosse Mengen giftiger Stoffe anfallen, ist unbegründet. Dies haben umfangreiche Lebenszyklusanalysen inzwischen nachgewiesen. Gerade das heute fast ausschliesslich für die Herstellung von Solarzellen genutzte Silizium ist toxisch vollkommen unbedenklich. Auch neue Technologien, wie Cadmium-Tellurid-Solarzellen (CdTe) oder Kupfer-Indium-Diselenid-Solarzellen (CIS), bergen im Vergleich mit anderen Energieversorungsoptionen keine grossen Umweltrisiken. Allenfalls während des Produktionsprozesses werden problematische Stoffe bzw. Stoffverbindungen benötigt. Die einzigen signifikanten Risiken bestehen bei der Lagerung und Verwendung von explosiven oder toxischen Gasen, z.B. Silane für die Produktion von amorphem Silizium und H_2Se für gewisse CIS Prozesse. Hier muss wie bei allen industriellen Verfahren auf entsprechende Sicherheitsvorkehrungen geachtet werden oder auf alternative Methoden zurückgegriffen werden. Die Cadmium-Freisetzungen bei der Verwendung von Cadmium-Tellurid-Zellen pro Kilowattstunde entsprechen etwa denen von Kohlenkraftwerken mit neuer Filtertechnik und unterschreiten die von Müllverbrennungsanlagen mit modernen Rückhaltesystemen deutlich. Im Vergleich zu Nickel-Cadmium-Akkumulatoren weisen Cadmium-Tellurid-Zellen sogar einen um mehr als den Faktor Tausend geringeren Cadmium-Bedarf auf.

Energierückzahlzeit: Wann amortisieren sich Solarzellen?

Auch das Argument, Photovoltaikanlagen würden zu ihrer Herstellung annähernd soviel Energie benötigen, wie sie während ihrer Lebensdauer liefern können, ist mehrfach widerlegt. Zum Beispiel zeigt eine Untersuchung von Palz und Zibetta[1] für die Europäische Kommission anhand zweier französischer Fabriken für Solarmodule, dass selbst für ein polykristallines Silizium-Modul (mc-Si) die energetische Amortisationszeit nur 2,7 Jahre beträgt. Es stellt während seiner Lebenszeit also wesentlich mehr Energie bereit, als zu seiner Herstellung benötigt wurde.

1 Palz, W.; Zibetta, H. (1991). Energy Pay-Back Time of Photovoltaic Modules. International Journal of Solar Energy. Volume 10, Number 3-4, pp. 211-216.

Dass andere Autoren zu deutlich höheren Zahlen kommen, liegt vor allen Dingen an extrem nachteiligen Annahmen. So gehen Hagedon und Helleriegel[2] etwa davon aus, dass grosse Photovoltaikanlagen auf der grünen Wiese aufgeständert werden, was entsprechend aufwendige Fundamente und Tragestrukturen erfordert. Auch die Verwendung von gerahmten Modulen, im schlechtesten Fall mit Aluminiumprofilen, kann die Energiebilanz einer PV-Anlage stark verschlechtern. Dass es auch anders geht, beweist z.B. die Freiburger Solarfabrik, die rahmenlose oder mit Holzrahmen versehene Module anbietet. Auch haben fast alle Autoren - im Gegensatz zu Palz und Zibetta - nicht berücksichtigt, dass es sich bei dem heute für Solarzellen eingesetzten Reinsililzium um ein Kuppel- bzw. Abfallprodukt aus der Halbleiterindustrie handelt. Der hohe Energieeinsatz wird für Reinsilizium für Halbleiter (electronic grade silicium) getätigt und nicht für Solarzellen, die auch mit weniger reinem Silizium (solar grade silicium) auskommen. Gemäss Kato[3] beträgt die Energierückzahlzeit 9 Jahre, wenn man den vollen Energieaufwand für die Siliziumherstellung mit berücksichtigt. Überspitzt ausgedrückt sagt manche publizierte Energierückzahlzeit der Photovoltaik mehr über den hohen Energiebedarf für die Herstellung integrierter Schaltungen aus, als über die energetische Bilanz von Solarzellen.

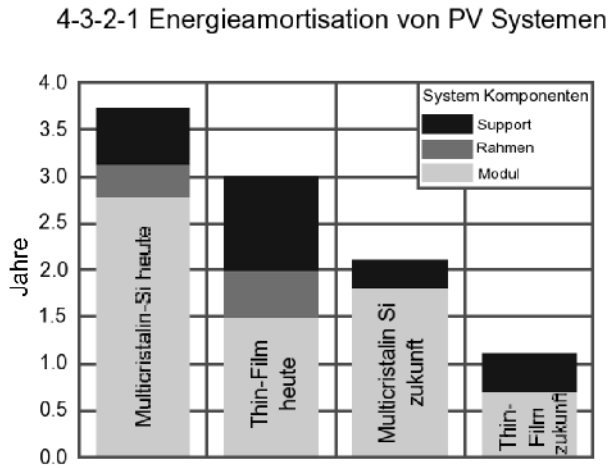


Abbildung 2: Es zeigt sich, dass mit Rahmenlosen Modulen und neuen Herstellungstechniken die Amortisationszeit unter 2 Jahre sinken kann

Die oben genannte Energieamortisationszeit von knapp drei Jahren lässt sich noch entscheidend verbessern, wenn man zu neuen Zell- bzw. Modultechnologien kommt. Van Engelberg und Alsema[4] ermitteln für so genannte Tandem-Module aus amorphen Silizium mit 10% Wirkungsgrad eine Rückzahlzeit von 9 Monaten unter mitteleuropäischen Einstrahlungs-Bedingungen (1'100 kWh/m²*a).

Recyclingfähigkeit von Photovoltaikmodulen

Der derzeitige Bedarf an „solar grade silicium“ mit jährlich ca. 4800 Tonnen ist wesentlich höher, als die verfügbare Menge als Abfallprodukt aus der Elektronikindustrie, die bei etwa 2100 Tonnen liegt. Es ist daher nötig, andere Quellen zu erschliessen, wie z.B. das Recycling oder es werden geeignete Verfahren zur Siliziumgewinnung in Solarqualität gefunden. Solarmodule werden in einigen Jahren unter die europäische Elektronikschrottverordnung fallen. Schon seit Anfang der 90er Jahre wurden Entsorgungsfragen nicht nur von Forschungsinstituten und Hochschulen sondern auch industriell untersucht. Im Gegensatz zur Verwertung von Solarmodulen aus kristallinem Silizium sind bei Dünnschichtmodulen nach ihrer Trennung konstruktionsbedingt und aufgrund des geringen Gehalts an Halbleitermaterial keine grösseren Erlöse zu realisieren.

Eine Wertanalyse ergab, dass nur über eine Rückgewinnung der unbeschädigten Solarzellen und Wafer aus kristallinem Silizium eine Kostendeckung für eine Wiederverwertung erreicht werden kann.

2 Hagedorn, Hellriegel. *Umweltrelevante Masseneinträge bei der Herstellung verschiedener Solarzellentypen*. Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 1992.

3 Kato, K.; Murata, A.; Sakuta, K. (1997). Energy Payback Time and Life-Cycle CO2 Emission of Residential PV Power System with Silicon PV Module. Appendix B-8. Environmental Aspects of PV Power Systems. Utrecht, The Netherlands: Utrecht University, Report Number 97072.

4 E.A. Alsema, B.C.W. van Engelenburg. *Environmental Risks of CdTE and CIS Solar Cell Modules*; 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Montreaux, 1992, pp. 995 - 998.

Methoden zur Rückgewinnung

Die Rückgewinnung der intakten Siliziumwafer aus dem Modulverband gelingt z.B. mit einem speziellen thermischen Verfahren. Oberhalb von 300°C beginnen die Verbundkunstoffe zu zerfallen und werden bei Temperaturen bis 600°C restlos verbrannt. Zurück bleiben das Glas, die Rahmen, soweit sie nicht zuvor entfernt wurden, die metallischen Verbinder, Solarzellen und Füllstoffe. Die Solarzellen werden manuell abgetrennt und die übrigen Komponenten werden sortenrein gesammelt und dem normalen Recycling zugeführt. Die nur oberflächlich leicht angegriffenen Solarzellen werden in einer Folge von mehreren Ätzschritten gereinigt, so dass letztlich ein neuwertiger Siliziumwafer vorliegt.

Der Wafer erfüllt alle üblichen Qualitätsanforderungen und kann wieder zu einer Solarzelle weiterverarbeitet werden. Bruchstücke von Solarzellen können ebenfalls in einem Ätzprozess aufgearbeitet werden. Dieser Kreislauf ist kostengünstiger als die Neuproduktion eines Wafers und spart zudem etwa 80% der dazu benötigten Primärenergie, so dass dieser Prozess wirtschaftlich wie energetisch sinnvoll durchgeführt werden kann.

BP Solar erprobt bereits mit guten Ergebnissen ein anderes Verfahren für die Wiederverwendung von Solarzellen aus Modulen. Bei diesem Verfahren wird das Ethylenvenylacetat chemisch gelöst.

Modulkomponente	Materialien	Rel. Massenanteil [%]	Recyclingfähigkeit
Glas	Natron-Kalkgläser	30 – 65	Flachglas, Gußglas, Hohlglas, Fasern, Fritten
Verbundmaterial	EVA, Acrylate, PU u.a.	5 – 10	thermisch
Rückseitenabdeckung	Polyester, Aluminium, Fluorpolymere, Stahl, Glas	0 – 10 (ohne Glas)	thermisch, Metallkreislauf, Glasrecycling
Rahmen	Aluminium, Stahl, PU, PC u.a.	0 – 20	Metallkreislauf, Kunststoffrecycling, thermisch
Anschlußdosen	ABS, PC, PPO, PET u.a.	0 – 5	Kunststoffrecycling, thermisch
Kabel	Kupfer, Polyolefine, synth. Kautschuke, TPE, PTFE	ca.1	Elektronikschrottrecycling, Metallrecycling
Dichtmassen	Silikone, Acrylate, Polysulfide, PE-Schäume, Kautschuke, Polyisobutylene, PU	0 – 10	thermisch
Füllstoffe	Al_2O_3, TiO_2, $CaCO_3$, SiO_2, C u.a.	ca.1	Füllstoffe, mineralische Zuschläge
Solarzellen aus krist. Silicium	Si, Ti, Ag, Sn, Pb, Cu, Ni, Pd u.a.	5 – 10	Keramikherstellung, Legierungszuschläge, Solarzellenherstellung
alternativ: Dünnschichtsolarzellen	Amorphes Si, Al, Sn, Cu, Pb, In, CdTe S, Cu, Sn, Pb, In, $CuInSe_2$, Mo, Cu, Sn, Al, Pb, S u.a.	<1	chemisch und mechanisch, Metallkreislauf
Elektrische Verbinder	Cu, Sn, Pb, Al, Ag u.a.	ca. 1	Metallkreislauf

Tabelle 1: Recyclingfähigkeit der verschiedenen Komponennten einer Solarzelle

Messdaten einer recycelten Solarzelle

In nebenstehender Tabelle sind die Prüfergebnisse des Kalibrierlabors des Instituts für solare Energiesysteme in Freiburg einer aus recycelten Materialien bestehenden Solarzelle aufgeführt. Die gemessenen Daten entsprechen denen von nicht recycleten Zellen. Aufgrund der sich stetig verbessernden Solarzellentechnik ist die recycelte Zelle im Wirkungsgrad sogar noch besser als in ihrem ersten Leben! Ein Recycling von kristallinen Silizium-Modulen ist damit ohne Qualitätseinbussen möglich.

Zukünftig sollten Solarmodule so konstruiert werden, dass ein sinnvolles Recycling möglich ist.

Identifikation	ASA032/810/12
Datum	06/98
Hersteller	ASE, Alzenau, Pilkington Solar International GmbH, Köln
Zellfläche	100.2 cm²
Wirkungsgrad	13.7 ± 0.3 %
Jsc	31.5 mA/cm²
Voc	0.599 V
FF	72.4 %

Tabelle 2

Die Chance der Solarwirtschaft: Geschlossene Stoffströme

Um noch weitere Verbesserungen der Ökobilanz von Solarmodulen zu erreichen, können entsprechende Recyclingprozesse entwickelt werden. Glas und Silicium lassen sich einfach wiederverwerten. Problematisch ist allein die Auflösung des Modulverbandes, der auch Kunstsoffe wie Ethylenvenylacetat enthält.

Dem gegenüber können fossile und nukleare Kraftwerke niemals eine positive Energie- oder Soffbilanz erreichen: sie benötigen nicht nur für Herstellung und Abriss Energie und Rohstoffe, sondern sind während des Betriebes auf endliche Primärenergieträger angewiesen, die sie teilweise in Strom, zum grössten Teil aber in Abwärme, Abgase, Asche und andere Reststoffe umwandeln. Die erneuerbaren Energietechnologien wie die Photovoltaik eröffnen dagegen die einmalige Chance, die Sonnenenergiewandler selbst mit Sonnenenergie herzustellen und die notwendigen Rohstoffe im geschlossenen Kreislauf zu führen. Die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt werden auf das denkbar geringste Mass reduziert.

Fazit

Polykristalline Silizium-Module amortisieren in knapp drei Jahren die Energie, die zur Herstellung benötigt wird. Nach dieser so genannten Energieamortisationszeit verbessert sich die Ökobilanz in nicht unerhebliche Masse, wenn man bedenkt, dass für jede Kilowattstunde, die wir dem Stromnetz entnehmen, im Kraftwerk drei Kilowattstunden Primärenergie in Form von Kohle, Öl, Gas, oder Uran aufgebracht werden muss. Und das über die gesamte Lebensdauer der Solarmodule, die mindestens 20 Jahre beträgt.

Ein grosser Teil der Rohstoffe zur Herstellung von Solarzellen kommt als Abfallprodukt aus der Siliziumproduktion der Halbleiterindustrie. Der Erschliessung neuer Quellen für Solarsilizium kommt daher höchste Bedeutung zu. Dazu zählen neben der Erzeugung von Solarsilizium über neue Verfahren auch moderne und kostengünstige Aufbereitungsprozesse von verunreinigtem Halbleiter- und Solarsilizium, sowie die Schaffung einer Kreislaufwirtschaft für Solarprodukte.