

# Lebenszyklusanalyse und Recyclingkonzepte für Solarmodule

Dr. Johann Springer  
ZSW  
johann.springer@zsw-bw.de

Niels Warburg  
Universität Stuttgart,  
Institut für Kunststoff-  
prüfung und Kunststoff-  
kunde  
warburg@  
ikp2.uni-stuttgart.de

Katharina Wörsing  
Fraunhofer-Institut für  
Chemische Technologie  
woersing@ict.fraunhofer.de

## Ökobilanz und ganzheitliche Bilanzierung

Der Lebenszyklusanalyse von Solarmodulen, und dabei besonders der Energierückgewinnungszeit wurde schon früh große Aufmerksamkeit zuteil seitens der Öffentlichkeit, der Industrie und der Wissenschaft. Die anfangs mit noch ungenügenden Daten und Methoden hergestellten Analysen und teilweise unangemessene Vergleiche mit herkömmlichen Energiesystemen führten dazu, dass sich falsche Ansichten über die Energieernte von PV-Systemen festsetzten, die bis heute nicht vollständig berichtigt sind. Doch eine große Zahl sorgfältig durchgeführter Studien (Tab. 1) zeigt, dass bei industrieller Herstellung von Solarmodulen erhebliche Erntefaktoren erzielt werden können.

Durch ihre systematische und genormte Vorgehensweise [7] liefern Ökobilanzen von Solarmodulen wichtige vergleichende Beiträge zur Objektivierung der Umweltdiskussion im Bereich der Energie und der Berechnung der Energierückgewinnungszeit.

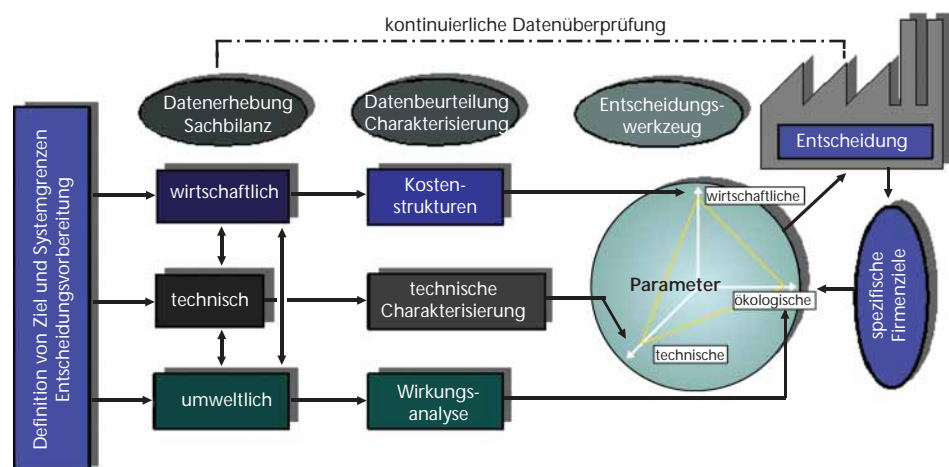
## Ganzheitliche Bilanzierung

Die Methode der ganzheitlichen Bilanzierung [8] ist eine Erweiterung der Ökobilanz, da diese alleine als Entscheidungshilfe bei der Industrie oft nicht ausreicht. Sie analysiert zusätzlich die ökonomischen und technischen Aspekte entlang der Prozesskette und liefert über ein Bewertungsschema ein Entscheidungswerkzeug (Abb. 1).

Tabelle 1  
Beispiele vorhandener Studien zur Lebenszyklusanalyse von Solarmodulen [1–6, 9, 12]

Quelle	Gegenstand	Jahr
KFA Jülich	kumulierter Energieverbrauch von Solarzellen und PV-Kraftwerken	1998
FZ-Jülich	umweltrelevante Stoffströme bei der Herstellung verschiedener Solarzellen	1990
Schweizer Bundesamt für Energiewirtschaft	Ökoinventare für Energiesysteme, Silicium-Materialien, komplette Anlagen	1994
FH Aachen, FZ-Jülich	Prozesskettenanalyse zum CdTe-Solarmodul	1995
TU München	Lebenszyklusanalyse von Dünnschichtsolarmodulen (CIS und CdTe)	1997
Uni Oldenburg	integrierte Betrachtung der Umweltauswirkungen von PV-Technologien	1998
Unis Utrecht und Rom	EPBT (Energy Pay Back Time) of PV Energy Systems	1998
Öko-Institut	Lebenszyklusanalyse von PV und Diesel getriebenen Pumpen	2000

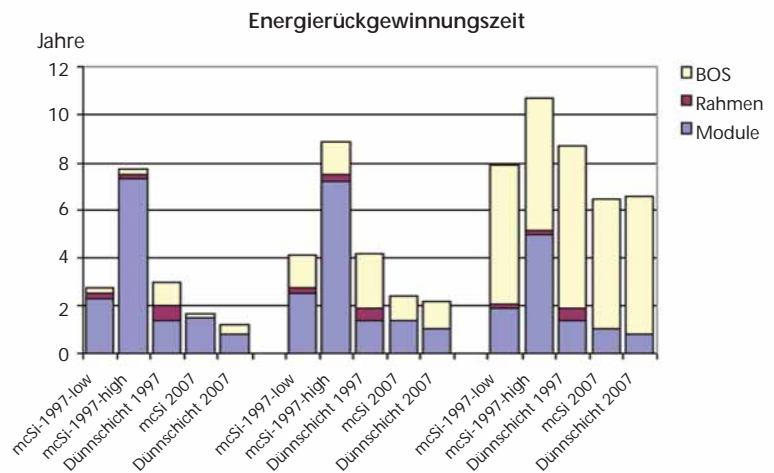
Abbildung 1  
Schema der ganzheitlichen Bilanzierung



## Energierückgewinnungszeit und Erntefaktor

Der Teilaspekt Energierückgewinnungszeit (EPBT) bzw. Erntefaktor der Ökobilanz von Photovoltaikmodulen ist in zahlreichen Studien bearbeitet worden [9–12]. Ein Beispiel für das Ergebnis einer gründlich recherchierten Berechnung [5] der Energierückgewinnungszeiten von Solarmodulen zeigt *Abb. 2*. Die Autoren vergleichen die Dauer von aktuell errechneten Energierückgewinnungszeiten multikristalliner Siliciummodule und Dünnschichtsolarmodulen mit einer Prognose für das Jahr 2007 und unterscheiden zwischen netzgebundenen Großanlagen, dachintegrierten Anlagen und Solar-Home-Systemen. Der Anteil von Rahmen und Systemkomponenten wird dabei gesondert ausgewiesen. Es zeigt sich, dass bei Dünnschichtsolarmodulen und vor allem bei Solar-Home-Systemen der Anteil der Systemkomponenten beträchtlich ist.

Aus der Zusammenstellung ergibt sich, dass, unabhängig von der Zelltechnologie, auch unter ungünstigen Bedingungen und pessimistischen Annahmen die Energierückgewinnungszeiten so niedrig liegen, dass bei üblichen 25 Jahren Einsatzdauer Erntefaktoren von mindestens 5, bei optimistischen Annahmen und günstigen Bedingungen Erntefaktoren über 50 erzielt werden können. Dabei liegen tendenziell die Erntefaktoren von Dünnschichtmodulen höher als die von kristallinen Siliciummodulen und



Low=optimistische, high=pessimistische Annahmen von kristallinen Siliciummodulen und Dünnschichtsolarmodulen unter Einbeziehung von Rahmen und Systemkomponenten – Berechnungen für mediterrane Sonneneinstrahlung [12]

die von polykristallinen höher als die von monokristallinen Modulen.

*Abbildung 2*  
Analyse (1997) und Prognose (2007) der Energierückgewinnungszeiten

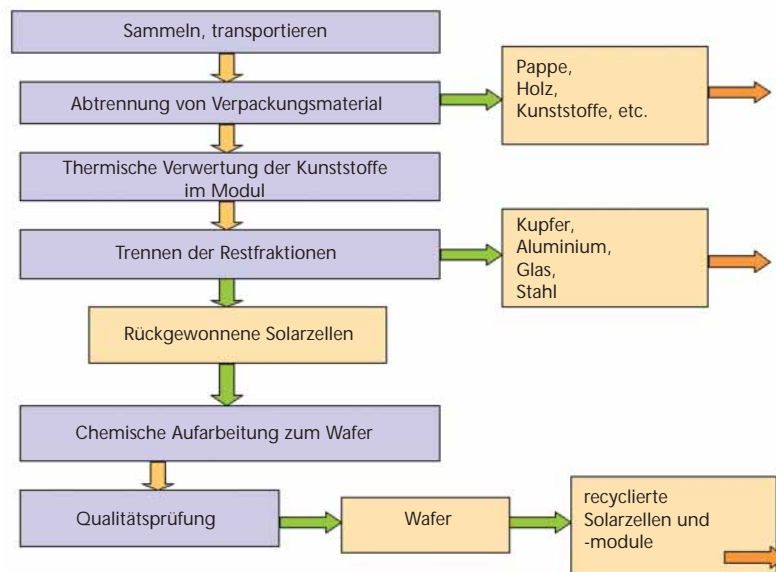
## Recycling von Solarmodulen

Recycling von Solarmodulen wird motiviert durch das Umweltbewusstsein der Klientel, durch gesetzliche Vorgaben (Elektro- und Elektronikschrottrichtlinie der EU) und durch die Möglichkeit der Rückgewinnung wertvoller Solarzellen oder Materialien. Sowohl für Solarmodule mit kristallinem Silicium als auch für

Institution	PV-Module/Verfahren	Stadium
Deutsche Solar AG [13]	c-Si/thermische Trennung des Modulverbunds Wiederaufarbeitung der Wafer	Pilotfertigung (Freiberg)
SOLTECH (Belgien) [14]	c-Si/Pyrolyse im Durchlaufofen oder Fließbettreaktor Waferrückgewinnung	Pilotmaschine
Solar Cells Inc. [15]	c-Si/thermische Trennung des Modulverbunds; Si rohstofflich oder als Wafer	Labor
Solar Cells Inc.	CdTe/Zerkleinerung, chemische Auflösung und Trennung	Pilotstadium (mobile Anlage)
Antec Solar GmbH [16]	CdTe/Zerkleinerung, thermische Behandlung, Ätzen mit Cl	Patent
Showa Shell [17]	CIGS/mechanisch-thermische Trennung des Verbunds, Säurebehandlung, Abschaben des CIGS, Lösungsaufarbeitung	Labor
Interphases Research [18]	CIGS/elektrochemisches werkstoffliches Recycling von CIGS	Labor
Drinkard Metalox Inc.	CIGS und CdTe/Metallrückgewinnung durch Elektrolyse	Pilotfabrik geplant (1998)
BPSolar [19]	c-Si/Auflösung des Modulverbunds mit Säure, Waferrückverwendung	Labor
Uni Utrecht	a-Si/Komplettverwertung für Flaschenglas Wiederverwertung der Substrate inkl. TCO	Experimentell (1995)

*Tabelle 2*  
Verschiedene Ansätze zum Recycling von Solarmodulen

Tabelle 3  
Solarmodulrecycling bei  
der Deutschen Solar AG



Dünnschichtsolarmodule gibt es weltweit zahlreiche Ansätze zum Recycling (Tab. 2) im Laborstadium aber auch bereits im Pilotstadium, wovon insbesondere die Aktivität der Deutsche Solar AG (Tab. 3) hervorzuheben ist. Eine wichtige Voraussetzung für effizientes Recycling ist die Schaffung eines Sammelsystems. In der Anfangsphase wird ein großer Teil des zu bearbeitenden Materials aus Produktionsabfällen bestehen, da Solarmodule sehr langlebige Produkte sind und mit massenhaften Rückströmen von ausgedienten Modulen noch lange nicht zu rechnen ist. Mit dem entsprechenden Zeitverzug von 20 bis 30 Jahren wird aber das Aufkommen an ausgedienten Modulen der Jahresproduktionskapazität nahe kommen. Bei weiterhin hohen Wachstumsraten in der PV-Branche rechnet man um 2030 weltweit mit 200 MWp (oder etwa 300.000 Tonnen) Modulschrott. Im Vergleich mit anderen Schrottarten ist das nicht viel, umso höher sind die Anforderungen an eine effiziente Abfalllogistik.

Die Kostensituation des Modulrecyclings wird sehr stark von der Möglichkeit der Rückgewinnung auf hohem Wertniveau abhängen. Daher ist stets auch die Möglichkeit der Wiederverwendung auf Produktniveau zu prüfen. Bei Siliciummodulen ist die Wiedergewinnung von Si-Wafern als Grundlage für recycelte Zellen ein realistisches Ziel. Dies ist auch im Hinblick auf die Energiebilanz der Module vorteilhaft. Eine Analyse der Deutsche Solar AG ergab, dass über eine Rückgewinnung der unbeschädigten

Solarzellen und Wafer eine Kostendeckung für die Verwertung erreicht werden kann. Bei Dünnschichtsolarmodulen erscheint zunächst nur die rohstoffliche Wiedergewinnung des gewichtsmäßig dominierenden Glasanteils (gegebenenfalls auch Aluminiumrahmen) lohnend.

Im Hinblick auf die Rohstoffsituation sowie mögliche Preisentwicklungen wird aber auch die Rückgewinnung der in geringen Massenanteilen vorliegenden Materialien der Solarmodule, wie z. B. Indium oder Tellur, attraktiv werden. Kostendeckung für den Recyclingprozess ist aber wesentlich schwerer zu erzielen als bei der Wiedergewinnung von Siliciumsolarmodulen, so dass bei den Dünnschichtsolarmodulen voraussichtlich mit höheren Annahmehöhen gerechnet werden muss.

Daraus resultiert, dass eine Rücknahme- und Recycling-Infrastruktur für Dünnschichtsolarmodule nur durch gesetzliche Rahmenbedingungen oder unter dem Druck des Marktes etabliert werden wird. Die technologischen Voraussetzungen für den Aufbau einer Recyclinganlage für Dünnschichtsolarmodule, wie sie schematisch in Tab. 4 gezeigt ist, sind vorhanden. Komponenten aus Altglasrecycling, Materialtrennung und -anreicherung, Aufbereitung metallbefrachteter Lösungen, Galvanotechnik und Reinigungstechnik müssen in geeigneter Weise kombiniert und angepasst werden. Damit ist technisch eine Trennung aller Komponenten bis hin zum reinen Rohstoff möglich. Aus öko-

nomischen Gründen werden aber Kompromisse eingegangen werden müssen, z. B. thermische Verwertung von Kunststofffraktionen und Depolimerung von wertstoffarmen Restfraktionen.

## Einfluss des Recycling auf die Ökobilanzergebnisse

Neben der offensichtlichen Schonung von Ressourcen durch Recycling gibt es eine Reihe weiterer Gründe, die Lebenswegphase „Recycling/Entsorgung“ detailliert zu betrachten. Das Problem des „Shifting of Burdens“, ein Verschieben von Umweltauswirkungen in andere Phasen des Lebenszyklus, kann auch in der Lebenszyklusphase „Recycling/Entsorgung“ auftreten. Aus diesem Grunde ist es essentiell, Ökobilanzen zu erstellen. Durch die Rückgewinnung von Materialien im Recycling wird gegebenenfalls die Produktion entsprechender Primärmaterialien reduziert, die in der Regel höhere Emissionen und Energieverbräuche pro kg Material erfordern als der Recyclingprozess. Es ergibt sich ein Netto-Gewinn der den Solarzellen in der Gesamtbetrachtung gutgeschrieben wird. Dies hat auch einen entsprechenden Einfluss auf die Energierückgewinnungszeit.

Durch Ökobilanzen kann der „umweltliche Break-Even“ bestimmt werden, d. h. wie viel Aufwand (im Sinne von Energieverbrauch und Emissionen) ist gerechtfertigt, um durch das Recycling eine Netto-Umweltentlastung im Vergleich zur Primärproduktion zu erreichen. Bis zu welcher Tiefe „lohnt“ sich die Zerlegung der Solarzellen und wo ist es umweltlich besser, den Recyclingprozess abzurechnen bzw. müssten effektivere Recyclingprozesse eingesetzt werden? Im von der EU im Rahmen des 5. Forschungsrahmenprogramms geförderten Projekt „SENSE“ werden entsprechende Ökobilanzen in Kooperation zwischen Herstellern und Forschungsinstituten erstellt. Zudem werden Recyclingverfahren für Dünnschicht solarzellen praktisch entwickelt. Ziel sind also im Sinne der Nachhaltigkeit optimierte Solarzellen unter Betrachtung des gesamten Lebensweges von der Rohstoffherstellung bis zum Recycling.

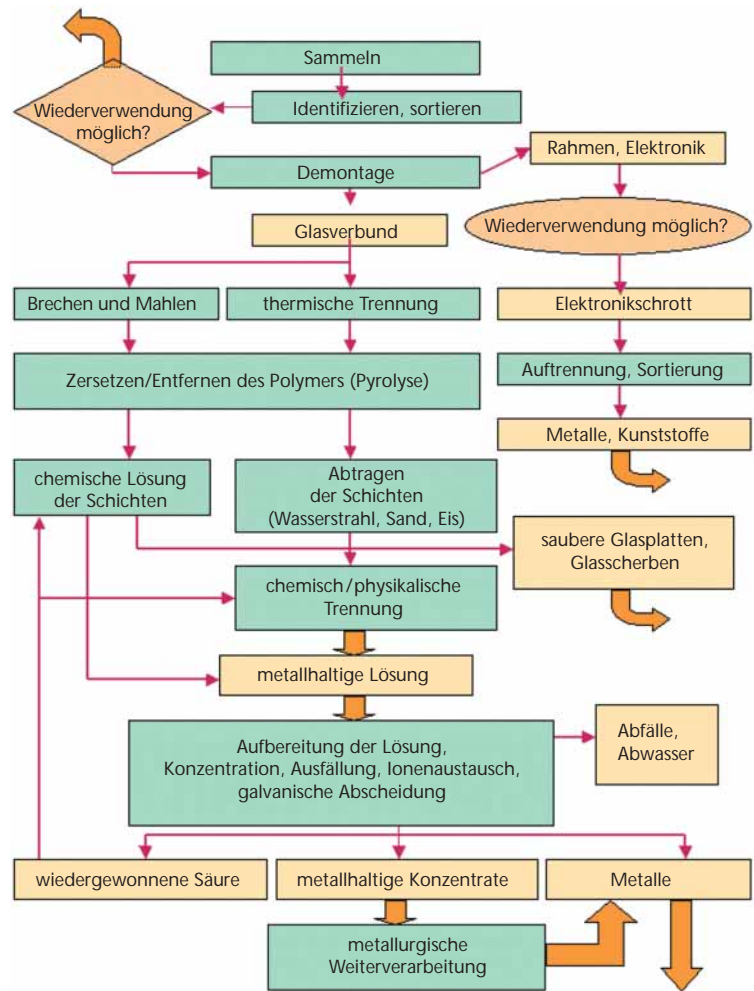


Tabelle 4  
Übersicht für ein Recycling-Konzept von Dünnschicht-Solarmodulen

## Literatur

- [1] G. Hagedorn, S. Lichtenberger, H. Kuhn: Kumulierter Energieverbrauch für die Herstellung von Solarzellen und photovoltaischen Kraftwerken, Abschlußbericht BMFT-Projekt 0328830B, Jülich, 1989
- [2] G. Hagedorn, E. Hellriegel: Umweltrelevante Stoffströme bei der Herstellung verschiedener Solarzellen, Angewandte Systemanalyse Nr. 67, Berichte des Forschungszentrums Jülich 2636
- [3] R. Frischknecht et al.: Ökoinventare für Energiesysteme, Schlussbericht des BEW/NEFF-Forschungsprojekts „Umweltbelastung der End- und Nutzenergiebereitstellung“, Zürich 1994
- [4] T. Reetz: Prozesskettenanalyse zum CdTe-Solarmodul, Interner Bericht KFA-STE-IB-2/93, Jülich 1993
- [5] H. Steinberger, Lebenszyklusanalyse von Dünnschichtsolarmodulen auf der Basis der Verbindungshalbleiter CdTe und CIS, Dissertation, München 1997
- [6] U. R. Fritsche, V. Lenz, Life-cycle Analysis of PV and Diesel Pumps for Irrigation in Developing Countries, Öko-Institut, Darmstadt 2000
- [7] European Committee for Standardization: EN ISO 14041
- [8] P. Eyerer, Ganzheitliche Bilanzierung – Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen, Springer-Verlag, Heidelberg-Berlin, 1996
- [9] J. Möller, D. Heinemann, D. Wolters, 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien, 1998
- [10] K. E. Knapp, T. L. Jester, IEEE Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Anchorage 2000
- [11] B. Sorensen, 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien, 1998
- [12] E. A. Alsema, P. Frankl, K. Kato, 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien, 1998
- [13] K. Wambach: Recycling of PV modules, 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien 1998
- [14] L. Frisson, K. Lieten, T. Bruton, K. Declerck, J. Szlufcik, H. de Moor, M. Goris, A. Benali, O. Aceves: Recent improvements in industrial PV module recycling, 16th European Solar Energy Conference, Glasgow, 2000
- [15] J. Bohland, T. Dapkus, K. Kamm, K. Smigielski: Photovoltaics as hazardous materials; the recycling solution, 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Wien 1998
- [16] D. Bonnet, Antec Solar GmbH: Recyclingverfahren für CdTe/CdS Dünnschichtsolarmodulen, Europäisches Patent EP1187224A1
- [17] K. Kushiya, M. Ohshita, M. Tanaka: Development of recycling and reuse technologies for large-area CIGS based thin-film modules, 3rd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Osaka, 2003
- [18] S. Menezes: Investigation of electrochemical processes for synthesis and removal of CIS films, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. vol. 426, 1996, 189
- [19] T. Bruton, R. D. W. Scott, J. P. Nagle, M. C. M. Man, A. D. Fackerall: Recycling of high energy content, high value components of silicon PV modules, 12th European Photovoltaic Energy Conference, Amsterdam 1994