



BINE
Informationsdienst

projektinfo 02/10



Recycling von Photovoltaik-Modulen

Abb. 1



- ▶ **Modul-Recyclingrate von über 95 Prozent erreichbar**
- ▶ **Wiederaufarbeitung kostengünstiger als Waferneukauf**
- ▶ **Bisher nicht nutzbare Siliziumqualitäten werden solarindustriell einsetzbar**
- ▶ **hochwertiges Recyclingsystem als Visitenkarte der Solarbranche**

Alte Module werden in der Pilotanlage in Freiberg für den Recyclingprozess vorbereitet

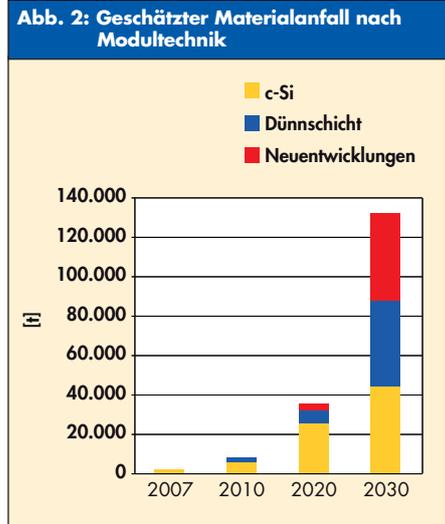
Die Solarindustrie wächst. Die installierte Leistung wird sich kontinuierlich erhöhen. In Deutschland wurden im Jahr 2009 Photovoltaik-Module mit einer Kapazität von rund drei Gigawatt neu installiert, die Stromerzeugung aus PV-Anlagen stieg von 4,4 TWh (2008) auf 6,2 TWh. Neue Großprojekte in aller Welt, aber auch die wachsende Verbreitung auf den Hausdächern hierzulande lassen den Bedarf an Rohstoffen weiter steigen. Nicht zuletzt die wertvollen Inhaltsstoffe von PV-Anlagen machen eine Wiederverwertung wirtschaftlich sinnvoll.

Was bisher wegen der langen Lebensdauer der Photovoltaik-Module von 25 und mehr Jahren kein ernstes Thema für die Solarindustrie gewesen ist, stellt sie in Zukunft vor neue Herausforderungen. Erste Photovoltaik-Anlagen haben in den vergangenen Jahren ihr Lebensende erreicht und wurden in einer Pilotanlage der Deutschen Solar AG recycelt. Bis 2015 wird eine beträchtliche Menge an PV-Modulen

ausgedient haben, die daraus zu erwartende Abfallmenge steigt sprunghaft. Durch die Wiederverwertung können die Erzeuger wertvolle Rohstoffe zurückgewinnen und den Bedarf an Primärrohstoffen verringern.

In einem vom Bundesumweltministerium geförderten Verbundprojekt arbeiten Forscher der Deutschen Solar AG und der TU Bergakademie Freiberg seit 2002 daran, Modulrecycling umweltschonender und effizienter zu machen. Mit modernster Technologie lassen sich jetzt Produktionsabfälle, komplette ausgediente sowie gebrochene Module wiederaufbereiten und dabei Recyclingraten von über 95% erzielen. Um die Alt-Module optimal aufzubereiten, wird ein hochwertiges, flächendeckendes Recycling-System entlang der gesamten solaren Wertschöpfungskette notwendig. Um dieses auf EU-Ebene aufzubauen, hat die Solarindustrie als gemeinsame Initiative den Verband PV CYCLE gegründet.

Nachhaltige Photovoltaik braucht Recycling



Auch „grüne Technik“ hält nicht ewig. Mit der schnellen Ausweitung der Photovoltaik steigt auch das zukünftige Abfallaufkommen von PV-Produkten und es wird unerlässlich, dafür eine Kreislaufwirtschaft zu schaffen. Dies auch deshalb, weil das starke Wachstum und der hohe Preisdruck in der Branche neue, kostengünstige Quellen für Solarsilizium erfordern.

Ebenso wird die Umwelt durch Recycling entlastet. Neben der Energie- und Ressourcensparung geht es natürlich auch darum, Verlust oder Freisetzung seltener oder giftiger Elemente und Verbindungen zu verhindern. Sowohl Altmodule als auch Produktionsabfälle stehen zur Entsorgung an. Die genaue Menge zu bestimmen, ist aufgrund vieler Unsicherheitsfaktoren schwierig. Wegen der hohen Lebensdauer der Solarmodule war die Abfallmenge der noch jungen Technologie bisher gering. Im Jahr 2008 lag sie in der EU bei 3.800 Tonnen (entspricht 51 MWp). Bis 2030 wird sie voraussichtlich auf 130.000 Tonnen steigen. (Abb. 2)

PV-Schrott – was ist drin?

Heute bestehen etwa 90% des PV-Abfallaufkommens aus kristallinem Silizium (c-Si), die restlichen 10% entfallen auf Dünnschichtzellen, zu denen bisher CIS- (Cu, In, Se) und CdTe-Technik sowie amorphe und mikrokristalline Technik gezählt werden. Der Anteil der Dünnschichtzellen wird allerdings bis auf etwa 20% im Jahr 2020 steigen (Abb. 2). Das Abfallaufkommen aus Neuentwicklungen ist bis dahin noch zu vernachlässigen. Neue Technologien der Zukunft können beispielsweise Module auf neuem Trägermaterial oder organische Zellen sein, alles was sich bisher in den Kinderschuhen der Entwicklung befindet oder nur als Idee vorhanden ist. 2030 könnten sich die Anteile der unterschiedlichen Technologien in etwa die Waage halten. **Abbildung 3** zeigt die Zusammensetzung verschiedener PV-Modultypen.

Abb. 3: Zusammensetzung von c-Si- und Dünnschichtmodulen (entspr. der jeweiligen Technologie)

	c-Si (kristalline Siliziumzellen)	α-Si (amorphe Siliziumzellen)	CIS (Kupfer-Indium-Diselenid-Zellen)	CdTe (Cadmium-Tellurid-Zellen)
Anteil in %				
Glas	74	90	85	95
Aluminium	10	10	12	< 0,01
Silizium	ca. 3	< 0,1		
Polymere	ca. 6,5	10	6	3,5
Zink	0,12	< 0,1	0,12	0,01
Blei	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,01
Kupfer (Kabel)	0,6		0,85	1,0
Indium			0,02	
Selen			0,03	
Tellur				0,07
Cadmium				0,07
Silber	< 0,006			< 0,01

Quelle: Recycling von Solarmodulen – Potential und Anspruch eines zukünftigen Stoffstroms / PV CYCLE Studie 2007

Upcycling statt Downcycling

Bisher erreichten PV-Unternehmen meist keine ausreichend reinen Stofffraktionen bei der Verwertung alter Solarmodule. Man spricht von einem „Downcycling“, was nur geringe Verkaufserlöse erbringt. Es verursacht über die Deponierung hinaus erhebliche Kosten, die durch Annahmgebühren zu decken sind. Die Kosteneffizienz des Modulrecyclings hängt stark davon ab, ob eine Rückgewinnung auf hohem Wertniveau erreicht wird („Upcycling“). Die Wiederverwendung auf Produktniveau ist im Hinblick auf die Energiebilanz vorteilhaft und sollte deshalb immer angestrebt werden. Auch wenn es technisch möglich wäre, alle Komponenten bis zum reinen Rohstoff zu trennen, müssen Kompromisse eingegangen werden, um die Kosten im Rahmen zu halten.

Bei Dünnschichtsolarzellen muss allerdings wegen der geringen Gehalte an Halbleitermaterialien mit höheren Rücknahme- und Recyclingkosten gerechnet werden. Das Recycling reduziert die energieaufwendigere und emissionsintensivere Produktion

Recycling-Initiative der Industrie

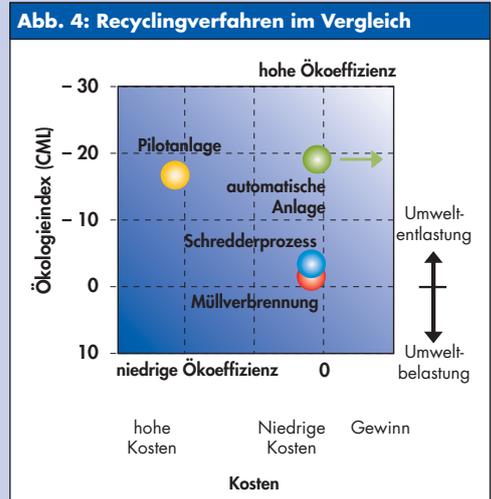
Um in Europa ein freiwilliges branchenweites Rücknahme- und Recycling-Programm für Altmodule einzurichten, gründeten im Juli 2007 acht Unternehmen der PV-Industrie den Verband PV CYCLE. Mit inzwischen über fünf Dutzend Mitgliedern repräsentiert er etwa 85% des europäischen PV-Marktes. Der Industrieverband verpflichtet sich, PV-Abfälle kostenfrei zurückzunehmen und zu entsorgen.

PV-Module sollen mindestens 25 Jahre lang saubere Energie liefern. Da die ersten größeren Photovoltaik-Anlagen Anfang der Neunziger installiert wurden, erreicht ab 2015 eine beträchtliche Menge an PV-Modulen das Ende ihres Lebenszyklus. Bis dahin soll ein Programm für Rücknahme und Recycling von Altmodulen sowie von Produktionsabfällen und beschädigten Modulen stehen. Die Vorgabe lautet, mindestens 65% aller Altmodule, die abgebaut werden, zu sammeln und daraus 85% oder mehr der wertvollen Stoffe wie Glas, Aluminium und Halbleitermaterialien zurückzugewinnen.

von Primärmaterialien und verbessert dadurch die ökologischen und wirtschaftlichen

Nachhaltigkeit von Recyclingverfahren

Die ökologische Effizienz verschiedener Recyclingverfahren unterscheidet sich stark (Abb. 4). Bei Schreddern und Müllverbrennung ist die Recyclingrate von Al, Cu und Glas niedrig, die Endprodukte sind minderwertig und eine Kostenreduktion ist unrealistisch. Die Pilotanlage erreicht mit manueller Separation bei niedrigem Durchsatz eine befriedigende Recyclingrate. Die automatisierte Anlage liefert bei hohem Durchsatz hochwertige Endprodukte, sie erreicht damit energie- und kosteneffizient eine hohe Recyclingrate. Das Konzept der Öko-Effizienz berücksichtigt den gesamten Lebensweg eines Produktes: Mit dem Ziel, Umweltentlastung und Kostensenkung zu verbinden, werden Energie- und Ressourcenverbrauch, Umweltbelastungen und Wiederverwertbarkeit dem wirtschaftlichen Wert des Produktes gegenübergestellt.



Kenndaten von PV-Anlagen. Seine umweltentlastenden Effekte sowie die CO₂-Bilanz können über eine Lebenszyklusanalyse erfasst werden. Der sogenannte Erntefaktor

beschreibt das Verhältnis von gewonnener zu eingesetzter Energie. Er erreicht bei den üblichen 25 Jahren Einsatzdauer – je nach Annahme und Bedingungen – den Faktor 5

bis 50 und ist bei Dünnschichtmodulen in der Regel höher als bei kristallinen Silizium-Modulen.

► Aufarbeitung

Von der Pilotanlage...

Die Forscher entwickelten ein nachhaltiges Kreislaufsystem für photovoltaische Produkte. Nach der kleinmaßstäblichen Erprobung (2002 – 2005) wurden die Trennverfahren auf die Pilotanlage Freiberg übertragen. Im aktuellen Projekt werden möglichst umweltgerechte Verfahren zur Aufarbeitung von Solarsilizium entwickelt. Dabei geht es einerseits darum, die Toxizität und Umweltschädlichkeit der Ätzlösungen und somit auch die Entsorgungskosten der Restlösungen zu verringern. Andererseits ermöglichen verbesserte Ätzverfahren eine höhere Lichtausbeute und somit einen höheren Wirkungsgrad der neuen Solarzellen.

Das ursprüngliche Recycling-Ziel, unbeschädigte Zellen zurückzugewinnen, wurde aufgegeben, da es auf Grund der heutigen geringen Solarzellendicken (<180 µm) und der starken Vorschädigung der Module nach deren Rückbau und Transport nicht mehr wirtschaftlich ist. Darum gewinnt man Solarzellenbruch, der gereinigt wird, so dass reines Si entsteht. Dieses wird wieder zu multikristallinen Gussblöcken eingeschmolzen, aus denen dann neue Wafer hergestellt werden. Das erspart die aufwendige Gewinnung von Si aus hochreinem Quarz. Diese weltweit erste Pilotanlage zum Recycling aller handelsüblichen Solarmodule läuft seit 2002 und verarbeitet eine große Vielfalt von Solarzellen unterschiedlicher Technologien und Hersteller. In ihr wurden bereits die älteste deutsche sowie die älteste belgische PV-Anlage recycelt.

Mit dem neuen Verfahren werden vor allem Standardmodule mit Solarzellen aus monokristallinem, multikristallinem oder amorphem Silizium verwertet. Die Solarzellen verschiedener Hersteller benötigen eine spezifische, auf ihre Schichtsysteme angepasste Behandlung.

In zwei Prozessstufen trennt die Anlage die Komponenten der Module: In der ersten, thermischen Stufe werden die Kunststoffanteile des Moduls entfernt, Glas und Rahmenteile demontiert und sortenrein recycelt. (Abb. 5) In der zweiten Stufe wurden zuerst nicht nur Bruchsolarzellen, sondern auch ganze Solarzellen wiedergewonnen, zur Wafer-Rückgewinnung wird der Solarzellenaufbau mittels Ätzverfahren entfernt. Es hat sich als wirtschaftlicher erwiesen, Solarsilizium aus Bruchsolarzellen zurückzugewinnen.

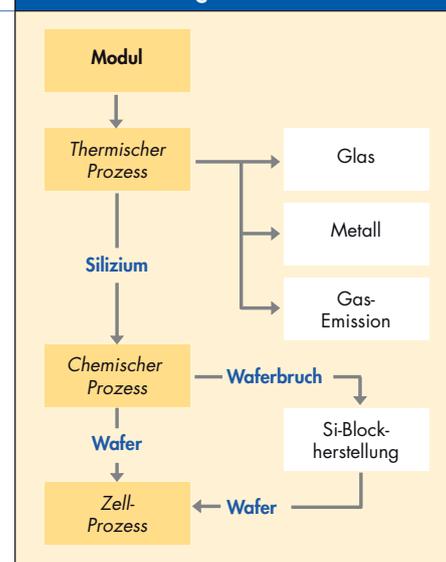
Die Pilotanlage arbeitet noch energie- und rohstoffaufwendig, zudem verursachen die manuelle Separation und der niedrige Durchsatz relativ hohe Kosten.

... zum automatisierten Recycling

Bei energieoptimierten automatisierten Anlagen soll die durch den thermischen Prozess und die Materialseparation verursachte Umweltbelastung auf ein Drittel reduziert werden. Großtechnisch wollen die Entwickler annähernd die Ausbeute und Reinheit erzielen, die in der Pilotanlage bei der Aufarbeitung einer belgischen Altanlage („Chevetogne“) erreicht wurde (Abb. 6). Es wird erwartet, dass mit hochwertigeren Endprodukten, höheren Durchsätzen und Recyclingraten kostendeckend oder sogar gewinnbringend gearbeitet werden kann.

Der in der automatischen Anlage gewonnene Si-Bruch wird anschließend eingeschmolzen und zu modernen Solarzellen verarbeitet. Verglichen mit alten Modulen aus den 80er Jahren erreichen die neuen Module sogar einen um 50% höheren Wirkungsgrad.

Abb. 5: Ablauf der Modulaufbereitung in Freiberg



Gegenüber der Herstellung von Modulen aus neuen Wafern spart die Produktion aus recycelten Wafern enorme Energiemengen.

Abb. 6: Ausbeute beim Recyclingprozess

Prozessparameter	Pilotanlage	Automatisierte Anlage
Anforderungen an den Materialinput	Ungebrochene PV Module	Gebrochene und ungebrochene Module
Materialseparation	Manuelle Separation	Automatische Separation
Prozesseignung	Kristalline Module	Alle Modultypen
Kapazität	200 t/Jahr	20.000 t/Jahr

Ergebnisse

	Ausbeute "Chevetogne" Generator [%]	Ausbeute [%]	Reinheit [%]
Glas	96	94,3*	99.99975
Si-Zellen und Zellbruch	84,6	72,8*	41 % >99.995 59 % >99.9999
Folien	-	Energierückgewinnung 100%	
Kupfer	77,78	100	100
Rahmen	100	100	100
Anschlussdosen		Elektronikschrott 100%	
Recyclingrate	84,57	95,7**	

* Auf Grund der starken Vorschädigung der Module (Glas- und Zellbruch)

sinkt die Ausbeute im Vergleich zum "Chevetogne Generator"

** minderwertige Mischfraktion 4,3% (Glas- und Zellbruch)

Ein anderes Verfahren zum Recycling von Dünnschicht-Modulen

Ein anderes Verfahren speziell zum Recycling von CdTe-Dünnschichtsolarmodulen setzt das US-amerikanische PV-Unternehmen First Solar seit Ende der neunziger Jahre ein. Es verarbeitet ganze sowie zerbrochene Module und Produktionsabfälle im selben Prozess. Dabei werden 90% des Glases und 95% des Halbleitermaterials zurückgewonnen. Das Verfahren wird an Standorten in den USA und in Frankfurt an der Oder eingesetzt.

Die Module werden in einem Schredder grob zerkleinert und anschließend in einer Hammermühle auf 4 – 5 mm kleine Stücke gemahlen. Dabei wird die Versiegelung der Laminierung aufgebrochen. In einer Edeltrommel werden die Halbleiterschichten mit Säure abgelöst. Anschließend werden Feststoffe (Glas und größere Teile der Laminierfolie) abgetrennt. Die metallhaltige Flüssigkeit wird in einem dreistufigen Ausfällungsprozess bei steigenden pH-Werten gereinigt und konzentriert. Aus dem entstandenen Filterkuchen kann wieder Halbleitermaterial für neue Module gewonnen werden.

► Fazit, Ausblick

PV-Abfälle kostenfrei zurückzunehmen und wiederaufzubereiten, ist ökologisch und ökonomisch sinnvoll: Durch automatisierte Recycling-Prozesse lassen sich zukünftig Recycling-Raten von über 95% erreichen und Rohstoffe kostenneutral oder sogar gewinnbringend zurückgewinnen. Die Wiederaufbereitung hat positive Auswirkungen auf die gesamte Energie- und Ökobilanz der PV-Technologie. Bei gleicher Leistung brauchen Module mit Solarzellen aus ausschließlich jungfräulichem Silizium gegenüber Modulen, in deren Solarzellen recyceltes Material verwendet wurde, dreimal so lang, bis sie die zu ihrer Herstellung erforderliche Energie erzeugt haben. Auch sind Wafer, zu deren Herstellung anteilig recyceltes Material verwendet wurde, signifikant kostengünstiger als neue.

Für den Aufbau eines umweltschonenderen und effektiveren Recycling-Prozesses im industriellen Maßstab leistet das Verbundprojekt wichtige Vorarbeit. Das weiterentwickelte Recycling-Pilotverfahren kann neue Zell- und Modultechnologien, stark vorgeschädigte Module sowie Dünnschichtmodule zu höherwertigen Produkten verarbeiten. Auch gelang es, das Verfahren zum Rückätzen von Solarzellen beziehungsweise Solarzellenbruch hinsichtlich neuer Produkte wie feinkörnigem Silizium weiter zu entwickeln.

Standardisierte und automatisierte Abläufe ermöglichen ein ökonomisch und ökologisch optimales Recycling-Ergebnis. Die Prozesse zur Aufarbeitung werden von den Forschern beständig weiterentwickelt und optimiert. Dabei sind die erreichbaren Ergebnisse umso besser, je spezifischer die Bearbeitungsverfahren auf die jeweilige Zell- und Modultechnologie abgestimmt werden können.

Noch werden nur zwei Verfahren großtechnisch eingesetzt: Das Behandlungsverfahren der Deutschen Solar vor allem für kristalline Silizium-Module, das von FirstSolar für CdTe-Module. Verfahren für andere Modultypen erfordern noch Entwicklungsaufwand.

Für Funktion und Image einer nachhaltigen Photovoltaik-Wirtschaft ist es erforderlich, europaweit ein effizientes Recycling-System aufzubauen, das die zukünftigen Abfallmengen verarbeiten kann. Damit hat der Recycling-Verband der Industrie eine anspruchsvolle Aufgabe zu erfüllen.

Die späteren Recyclingmöglichkeiten und Verfahrenskosten werden stark davon beeinflusst, welche Stoffe und Verbindungen in den Produkten verwendet werden. Deshalb ist es wichtig, bereits bei der Entwicklung neuer Technologien zu berücksichtigen, wie diese am Ende ihrer Nutzungszeit sach- und umweltgerecht zerlegt und wiederverwertet werden können. Hier sind eine entsprechende Materialauswahl sowie genaue Dokumentation der Inhaltsstoffe hilfreich.

► PROJEKTADRESSEN

Koordination

- Sunicon AG
Alfred-Lange Str. 15
09599 Freiberg/Sachsen

Projektpartner

- Technische Universität
Bergakademie Freiberg
– Fakultät für Chemie und Physik
Institut für Anorganische Chemie
Leipziger Str. 29
09599 Freiberg/Sachsen

► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

Literatur

- Schlenker, S. u. a.: Entwicklung eines nachhaltigen Kreislaufsystems für photovoltaische Produkte „SOMOZELL II“. Schlussbericht. Deutsche Solar AG, Freiberg (Hrsg.). 2009. FKZ 0327566A,B.

Internet

- www.deutschesolar.de
- www.chemie.tu-freiberg.de
- www.solarworld.de
- www.sunicon.de
- www.pvcycle.org

Abbildungsnachweis

- Hintergrund S. 1 und S. 4, Abb. 4: Solarworld
- Abb. 1, 2, 5, 6: Sunicon
- Abb. 3: Ökopol / Solarworld u.a.

Service

- Dieses Projektinfo gibt es auch als online-Dokument unter www.bine.info im Bereich Publikationen/Projektinfos. In der Rubrik „Service“ finden Sie ergänzende Informationen wie weitere Projektadressen und Links.

PROJEKTORGANISATION

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
11055 Berlin

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Lothar Wissing
52425 Jülich

- Förderkennzeichen
0327566A; 0327566B

IMPRESSUM

- ISSN
0937 – 8367

- Version in Englisch
Das Dokument finden Sie unter www.bine.info.

- Herausgeber
FIZ Karlsruhe
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

- Urheberrecht
Eine Verwendung von Text und Abbildungen aus dieser Publikation ist nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion gestattet. Sprechen Sie uns an.

- Autoren
Axel Hahne
Gerhard Hirn

BINE Informationsdienst Energieforschung für die Praxis

BINE Informationsdienst berichtet zu Energieeffizienztechnologien und Erneuerbaren Energien.

In kostenfreien Broschüren, unter www.bine.info und per Newsletter zeigt die BINE-Redaktion, wie sich gute Forschungsideen in der Praxis bewähren.

BINE Informationsdienst wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.

Kontakt

Haben Sie Fragen zu diesem **projektinfo**?
Wir helfen Ihnen weiter:

Tel. 0228 92379-44

 **BINE**
Informationsdienst

FIZ Karlsruhe, Büro Bonn
Kaiserstraße 185 – 197
53113 Bonn

kontakt@bine.info
www.bine.info