

Recycling von PV-Modulen

Hintergrundpapier
zum Round Table 2013



Inhaltsverzeichnis

Einleitung	4
Rechtliche Aspekte des PV-Recyclings	6
Technische Aspekte des PV-Recyclings	8
Forschung und Entwicklung im PV-Recycling	13
Wirtschaftliche Aspekte des PV-Recyclings	14
Stakeholder des PV-Recyclings	16
Literaturverzeichnis	18

Herausgeber:
green jobs Austria
Vertreten durch: Mag. Florian Beer (Geschäftsführer)
Schottenfeldgasse 59/ TOP 6, A-1070 Wien
ZVR-Nr. 747111754
Tel: +43 (0) 1 / 89 04 270 – 10
Fax: +43 (0) 1 / 89 04 270 – 50
E-Mail: office@greenjobsaustria.at
www.greenjobsaustria.at

Redaktion:
DI Manuel Binder (green jobs Austria)

Design: www.nova-druck.at

Disclaimer:
Die nachfolgende Dokumentation wurde für die Verwendung als Hintergrundpapier bei dem von green jobs Austria gemeinsam mit PV Austria veranstalteten „Round Table: Recycling von PV-Modulen“ erstellt. Die vorliegenden Explikationen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Für Rückfragen kontaktieren Sie bitte DI Manuel Binder (manuel.binder@greenjobsaustria.at).

Hintergrund zum vorliegenden Dokument

Das vorliegende Dokument dient als Tischvorlage für die TeilnehmerInnen des am 6. November 2013 von green jobs Austria gemeinsam mit PV Austria und dem Lebensministerium veranstalteten „Round Table Recycling von PV-Modulen“.

Das Dokument liefert Informationen zu folgenden Themenkomplexen:

- Notwendigkeit von PV-Recycling
- Status Quo des PV-Recyclings (national und international)
- Rechtliche Rahmenbedingungen
- Bestehende und zukünftige PV-Recyclingtechnologien
- Wirtschaftliche Aspekte des PV-Recyclings
- Nationale und internationale Stakeholder im Bereich des PV-Recyclings

Durch die Behandlung dieser Themenkomplexe wird der aktuelle Status des PV-Recyclings dargestellt sowie Trends und Entwicklungen aufgezeigt. Der Verweis auf weiterführende Literatur ermöglicht den TeilnehmerInnen den Zugang zu vertiefenden Informationen zu einzelnen Themenfeldern.

Das vorliegende Dokument wurde im Rahmen einer Desk Research erstellt und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.



Einleitung

Steigende Abfallmengen

Waren im Jahr 2000 weltweit noch Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) mit einer Leistung von knapp 1,5 GW_{peak} installiert, erhöhte sich dieser Wert auf über 40,7 GW_{peak} im Jahr 2010. Das entspricht einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von rund 40 %. Federführend beim Ausbau der Photovoltaik waren in diesem Zeitraum Länder wie Deutschland, Italien, Tschechien, Frankreich, USA und Japan (MarketResearch.com 2012). In Österreich waren im Jahr 2000 knapp 5 MW_{peak} PV-Anlagenleistung installiert, zehn Jahre später bereits über 95 MW_{peak}. 2012 waren aufgrund des weiterhin starken Anstiegs rund 363 MW_{peak} installiert. (BMVIT 2013).

Wie jedes andere technische Bauteil weisen auch PV-Module eine begrenzte Lebensdauer auf. Man kann davon ausgehen, dass PV-Module rund 25-30 Jahre zur Stromproduktion eingesetzt werden können (PV Cycle 2013). Aus diesem Umstand ergibt sich zwangsläufig die Notwendigkeit einer Lösungsfindung für die ausgedienten Module. Aufgrund stetig wachsender Mengen an neu errichteten PV-Anlagen sowie markant gestiegenen Installationsmengen im Laufe der letzten Jahre gewinnt die Auseinandersetzung mit dem Recycling von PV-Modulen international an Bedeutung. Das Recycling von PV-Modulen verbindet somit die umwelttechnischen Themenkomplexe Erneuerbare Energien und Abfallwirtschaft.

Die Daten hinsichtlich der prognostizierten Abfallmenge für die nächsten 40 Jahre weisen je nach Quelle eine gewisse Bandbreite auf, abhängig von Nutzungsdauer, Produktionsmenge oder technologiespezifischem Gewicht (vgl. Literaturliste). Die Tendenz geht aber in allen Schätzungen klar in Richtung exponentiell ansteigendem PV-Abfall. PV-Cycle, eine gemeinnützige Organisation für das Sammeln und Recycling von PV-Modulen, geht davon aus, dass im Jahr 2010 europaweit rund 5.000 Tonnen an PV-Modul-Abfall anfielen. Ab dem Jahr 2015 wird mit der ersten großen Welle an ausgedienten Modulen gerechnet, bis zu 15.000 Tonnen werden erwartet (SPIEGEL 2010, SPIEGEL 2011).

Eine Abschätzung der europaweiten PV-Abfallmengen für die Jahre 2025 bis 2050 liefert Tabelle 1.

Tabelle 1:

Prognose der europaweiten PV-Abfallmengen für die Jahre 2025 bis 2050
Datenquelle: Beckmann (2012)

Jahr	Abfallmengen in 1.000 t
2025	14 - 22
2030	152 - 223
2035	1.800 - 2.900
2040	2.200 - 3.900
2045	2.300 - 4.200
2050	4.900 - 9.600

In Österreich waren Ende 2012 rund 363 MW_{peak} PV-Leistung installiert. Geht man von einem durchschnittlichen Gewicht von 100 Tonnen pro MW_{peak} aus, ergeben sich für Österreich rund 36.000 Tonnen PV-Abfall in den nächsten 30 Jahren. Anzumerken ist hierbei, dass ein Großteil der Anlagen erst in den letzten Jahren installiert wurde, der mengenmäßig größte Teil des Abfalls somit in rund 20-30 Jahren anfällt (BMVIT 2013).

Derzeit besteht mit rund 90 % der Großteil des PV-Abfallaufkommens aus kristallinen Siliziumzellen, die verbleibenden 10 % entfallen auf Dünnschichtzellen (CIS- und Cadmiumtellurid-Technik (CdTe-Technik), amorphe Siliziumzellen). Für das Jahr 2020 geht man von einem Anteil der Dünnschichtzellen von rund 20 % aus, deren Bedeutung wird also wachsen. Neuentwicklungen, die bisher noch nicht am Markt etabliert sind, etwa Module auf neuen Trägermaterialien oder organische Zellen, können 2030 bereits ein Drittel des PV-Abfalls ausmachen (BINE 2010).

Neben jenen Modulen, die das Ende ihres Lebenszyklus erreicht haben, werden auch schadhafte Module einem Recycling zugeführt. Schäden am Modul können einerseits bereits im Zuge der Produktion entstehen (Schätzungen gehen von 0,2 % der produzierten Module aus), andererseits auch durch den Transport oder die Installation der Anlage (Schätzungen gehen von 0,5 % aus). Dazu zählen elektrische Defekte, kaputte Rahmenkonstruktionen oder ein

fehlerhafter Aufbau. Weiters führen Garantie- und Gewährleistungsfälle zur Ausmusterung von schadhafte PV-Modulen. Schätzungen zufolge beträgt der gesamte Ausschuss der Produktion 0,1 - 1 %, bei einer weltweiten Produktion von 14 GW (2010) sind das zwischen 100.000 und einer Million Module (Focus 2010). Derzeit machen diese schadhafte Module den Großteil der von PV Cycle gesammelten Module aus, nur 1 % aller gesammelten Module hat das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht (PV Cycle 2013 ; Wambach et. al. 2009).

Die Produktion von PV-Modulen spielt in Österreich nur eine sehr untergeordnete Rolle, die PV-Abfallmengen werden sich zukünftig vorwiegend aus Anlagen am Ende ihrer Lebensdauer zusammensetzen.

Wertvolle Inhaltsstoffe des PV-Moduls

PV-Module enthalten große Mengen wertvoller Materialien, die im Zuge des Recyclingprozesses wiedergewonnen werden können (vgl. Tabelle 2). Durch eine möglichst effektive Extrahierung sortenreiner Rohstoffe wird die Wirtschaftlichkeit des Recyclingprozesses erhöht und der Bedarf der Modulproduzenten an Primärrohstoffen verringert (BINE 2010).

Durch automatisierte Prozesse sind zukünftig Recyclingraten von 95 % zu erwarten, Rohstoffe können gewinnbringend zurückgewonnen werden. Wafer, die teilweise mit recyceltem Silizium hergestellt werden, weisen signifikant niedrigere Kosten auf, aufgrund des hohen Preisdrucks in der Photovoltaikbranche ein wesentlicher Aspekt. Weiters wird die Energie- und Ökobilanz von PV-Anlagen aufgrund der Wiederaufbereitung wesentlich erhöht. Wird nur aus Quarzsand gewonnenes Silizium zur Produktion herangezogen, dauert es bis zu dreimal so lange, bis die Module die zu ihrer Herstellung benötigte Energie wieder erzeugt haben (BINE 2010).

Neben wertvollen Inhaltsstoffen enthalten PV-Module auch eine Reihe an potentiell umweltschädigenden Bestandteilen, wie beispielsweise Blei, Siliziumtetrachlorid, Cadmium, Selen oder Schwefelhexafluorid. Umfassendes Recycling verringert die Menge an verwendeten Schadstoffen und trägt somit auch aktiv zur Umweltverträglichkeit der PV-Branche bei (TheDailyGreen.com 2010).

Tabelle 2: Zusammensetzung von PV-Modulen. Datenquelle: PV Cycle: Recycling von Solarmodulen – Potential und Anspruch eines zukünftigen Stoffstroms. Zitiert in BINE (2010)

Rohstoffe	c-Si (Kristalline Siliziumzellen) [%]	a-Si (amorphe Siliziumzellen) [%]	CIS (Kupfer-Indium-Diselenid-Zellen) [%]	CdTe (Cadmium-Tellurid-Zellen) [%]
Glas	74	90	85	95
Aluminium	10	10	12	< 0,01
Silizium	3	< 0,1	-	-
Polymere	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
Indium	-	-	0,02	-
Selen	-	-	0,03	-
Tellur	-	-	-	0,07
Cadmium	-	-	-	0,07
Silber	< 0,006	-	-	< 0,01

Rechtliche Aspekte des PV-Recyclings

Offene Fragen

Bei der Sammlung und Verwertung gibt es eine Reihe an offenen organisatorischen, logistischen und technischen Fragestellungen die es aufgrund der steigenden Mengen in den nächsten Jahren zu lösen gilt. Es muss beispielsweise geklärt werden, nach wie vielen Arbeitsjahren Module als Abfall anfallen bzw. wann und aus welchen Beweggründen sich Anlagenbetreiber dazu entschließen, ihre Paneele zu entsorgen und welche Konsequenzen das für die Abfallwirtschaft hat. Für die Recyclingunternehmen ist es von großer Bedeutung, in welchem Zustand und wie „sortenrein“ (zB.: Siliziumzellen vs. Dünnschichtzellen) die Module angeliefert werden um entsprechende Technologien zu entwickeln und zu optimieren (SPIEGEL 2010). Weiters gilt es, die Finanzierung des Recyclings zu klären und nachhaltige Infrastrukturen zu schaffen. Nicht zuletzt sind rechtliche Rahmenbedingungen festzulegen und Zuständigkeiten der unterschiedlichen Akteure (vgl. Kapitel Stakeholder des PV-Recyclings) im Bereich des PV-Recyclings zu definieren.

Wie jeder andere Abfall auch muss die Entsorgung von ausrangierten PV-Modulen den europäischen, nationalen und regionalen Gesetzen entsprechen. Im rechtlichen Kontext ist im Bereich des PV-Recyclings in erster Linie die europäische WEEE-Richtlinie (Waste Electrical and Electronic Equipment; Directive 2012/19/EU) hervorzuheben. Die WEEE-Richtlinie regelt eine geeignete Entsorgung von Produkten am Ende ihrer Lebensdauer und fordert Hersteller und Importeure von Elektronik- und Elektrogeräten zu einer Rücknahme und zum Recycling ausrangierter Produkte auf (PV Cycle 2013).

Das EU Parlament hat im August 2012 die WEEE-Richtlinie so adaptiert, dass auch PV-Module als Elektrogeräte im Sinne der WEEE-Richtlinie gelten und somit in deren Geltungsbereich fallen (pv magazine 2012). PV-Module sind nun Bestandteil der Kategorie Vier „Consumer Equipment and Photovoltaik Panels“ (ALBA Group 2012). Da die einzelnen Mitgliedsländer bis zu 18 Monate Zeit haben, die WEEE-Direktive in nationales Recht umzusetzen, sollte spätestens mit Ende Februar 2014 die Implementierung in nationales Recht stattgefunden haben (pv magazine 2012). Da für jedes EU-Mitgliedsland unterschiedliche Umsetzungen der EU-Richtlinie zu erwarten sind, erschwert dies die Implementierung eines einheitlichen Gesamtsystems bzw. müssen diese ländertypischen Besonderheiten angepasst werden (BINE 2012).

Nach der Implementierung der WEEE-Richtlinie gelten für alle Hersteller und Importeure die jeweiligen nationalen Gesetze. Verantwortlich für die, für den Endkunden kostenlose, Rücknahme und das Recycling der Module sind die „Produzenten“. Unter dem Sammelbegriff „Produzenten“ werden im Rahmen der WEEE-Richtlinie jene natürlichen oder juristischen Personen zusammengefasst, die in einem Mitgliedsstaat ansässig sind und

- PV-Module unter eigenem Namen oder eigener Marke herstellen oder die PV-Module für die Vermarktung unter ihrem Namen oder ihrer Marke auf dem Gebiet dieses Mitgliedslandes entwickeln oder herstellen lassen → **Hersteller**

- auf dem Gebiet dieses Mitgliedslandes unter eigenem Namen oder eigener Marke PV-Module wiederverkaufen, die von anderen Lieferanten produziert wurden (es sei denn, die Marke des ursprünglichen Produzenten ist auf dem Produkt angegeben) → **Vertriebshändler/Wiederverkäufer**
- PV-Module aus einem Drittland oder einem anderen Mitgliedsland in diesem Mitgliedsland auf professioneller Basis auf den Markt bringen → **Importeur**
- PV-Module mittels Fernkommunikation direkt an private Haushalte oder andere Benutzer als private Haushalte in einem Mitgliedsland verkaufen und die in einem anderen Mitgliedsland oder einem Drittland ansässig sind → **Internet/Fernabsatz** (PV Cycle 2013).

Wer letztendlich als Produzent des PV-Moduls gilt, liegt im Ermessen der 27 Mitgliedsländer (pv magazine 2012). Die daraus entstehenden Pflichten für sämtliche Produzenten umfassen folgende Punkte:

- Registrierung ihres Unternehmens im nationalen WEEE-Register
- Meldung der PV-Module, die sie in einem Jahr verkaufen, an das nationale WEEE-Register
- Organisation und Finanzierung der Rücknahme und Entsorgung ihrer PV-Module am Ende ihrer Lebensdauer

- Erstellung einer finanziellen Garantie, wenn ihre PV-Module als WEEE aus privaten Haushalten betrachtet werden
- Erreichung verpflichtender Sammel- und Recyclingziele
- Kennzeichnung ihrer Produkte mit einer durchgestrichenen Abfalltonne
- Information für Entsorgungseinrichtungen über die Zusammensetzung ihres Produkts und die potenzielle Verwendung gefährlicher Materialien
- Information für den Endkunden darüber, wie er seine PV-Module entsorgen muss (PV Cycle 2013)

Die EU-Richtlinie sieht vor, dass 85 % der verkauften Module gesammelt und zu 80 % recycelt werden müssen. Es wird empfohlen, eine getrennte Sammlung von anderen Elektroaltgeräten einzurichten und bestehende Sammel- und Recyclingstrukturen zu stärken und auszubauen (ALBA Group 2012).

Da diese auferlegten Pflichten viele Unternehmen vor eine alleine nur schwer lösbare Aufgabe stellen, bedienen sich viele Betriebe der Elektro-Branche gemeinsamer Systeme, beispielsweise Sammel- oder Garantiesysteme (BINE 2012).

Neben der WEEE-Richtlinie spielen die Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) und die Verordnung über die Verbringung von Abfällen (Verordnung (EG) Nr. 1013/2006) eine Rolle im PV-Recycling (PV Cycle 2013).



Technische Aspekte des PV-Recyclings

In diesem Kapitel sind jene technischen Verfahren kursorisch angeführt und beschrieben, die sich derzeit in Anwendung befinden bzw. zukünftig zum Recycling von PV-Modulen eingesetzt werden können. Mit den unterschiedlichsten Techniken können heute bereits große Anteile der bei der Modulproduktion verwendeten Materialien zurückgewonnen werden. Vor allem bei den massenbezogen bedeutendsten Komponenten (vgl. Tabelle 2) wie dem PV-Glas und den eisenhaltigen und nicht eisenhaltigen Metallen sind hohe Recyclingquoten erzielbar. Auch bei bestimmten Halbleitermaterialien kann ein Großteil zurückgewonnen werden (PV Cycle 2013).

Für die in PV-Modulen enthaltenen Sekundärrohstoffe Glas, Aluminium und Kupfer besteht bereits ein etablierter Markt, ausreichend Abnehmer sind vorhanden. Für die aktiven Substanzen aus den Dünnschichtmodulen sowie für Siliziumbruch muss sich dieser Markt in den nächsten Jahren noch entwickeln (BINE 2012). Im Folgenden werden technische Recyclingverfahren näher dargestellt.

Recyclingverfahren der Firma Sunicon

Im sächsischen Freiberg wurde von der Solarworld-Tochter Sunicon im Jahr 2004 die erste Pilotanlage zum Recycling von PV-Modulen errichtet. Die Anlage kann bis zu 100 Tonnen pro Jahr verarbeiten, das entspricht einer kumulierten Modulleistung von rund einem Megawatt. 2009 wurden in dieser Anlage beispielsweise die Module des ältesten belgischen Solarparks Chevetogne verarbeitet (SPIEGEL 2010). Die Anlage ermöglicht ein Recycling von vielfältigen Solarmodulen unterschiedlicher Hersteller. Es werden vor allem Standardmodule aus monokristallinem, multikristallinem und amorphem Silizium verwertet, eine an die unterschiedliche Schichtdicke angepasste Anlagenadaptierung ist notwendig (BINE 2010).

Ursprünglich war es das Ziel der Anlagenentwickler, unbeschädigte Zellen zurückzugewinnen. Aufgrund der äußerst geringen Solarzellendicken von weniger als 180 µm und der starken Vorschädigung der Module durch Rückbau und Transport ist man aus wirtschaftlichen Überlegungen von dieser Idee

abgekommen. Es steht nun die Gewinnung von gereinigtem Solarzellenbruch im Vordergrund, aus diesem wiederum reines Silizium hergestellt werden kann. Das Silizium kann über das Einschmelzen zu multikristallinen Gussblöcken zu neuen Wafern verarbeitet werden, sodass die Gewinnung aus hochreinem Quarz nicht mehr notwendig ist (BINE 2010).

In Abbildung 1 ist der Ablauf der Modulaufbereitung in der Sunicon-Pilotanlage dargestellt.

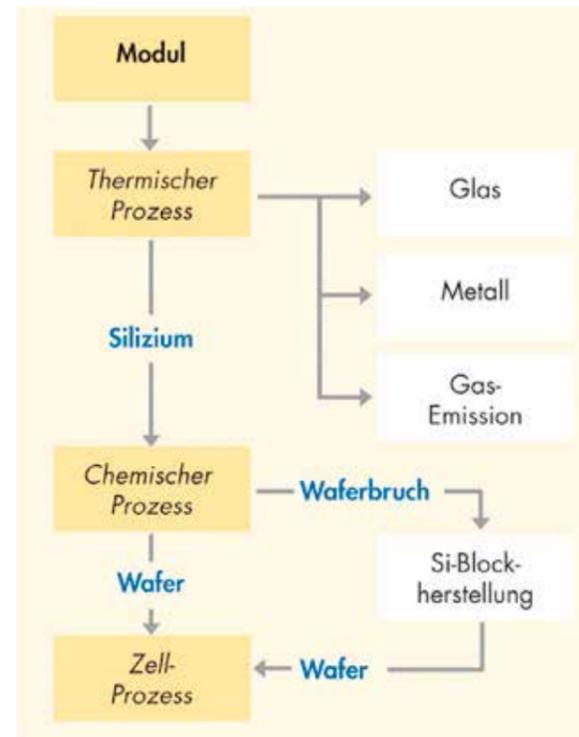


Abb. 1: Ablauf der Modulaufbereitung in der Sunicon-Pilotanlage. Quelle: Sunicon zitiert in BINE (2010).

Der Recyclingvorgang ist in einen thermischen, einen chemischen und einen Zellprozess aufgeteilt. In der thermischen Prozessstufe werden Glas- und Rahmenteile demontiert und sortenrein recycelt (vgl. auch Tabelle 3). Weiters werden in diesem Schritt Kunststoffanteile des Moduls in einem 600°C heißen Verbrennungsprozess entfernt. Im zweiten Teilprozess werden ganze Solarzellen sowie Bruchsolarellen wiedergewonnen. Ätzverfahren sorgen für eine Entfernung des Solarzellenaufbaus und ermöglichen die Waferrückgewinnung. Wie oben bereits ange-

führt hat es sich als wirtschaftlicher erwiesen, das Silizium aus Bruchsolarellen zurückzugewinnen. Solarworld versucht mit diesem Prozess die originale Waferdicke bestmöglich zu erhalten. Wafer mit einer Dicke über 200 µm sind weniger anfällig für Bruch und können mit höherer Ausbeute recycelt werden. Bei dünneren Waferschichten ist der Prozess aufwendiger. Der aus dem gewonnenen Siliziumbruch in einem letzten Prozessschritt hergestellte Siliziumblock dient als Ausgangsstoff für die erneute Solarzellenproduktion (BINE 2010 ; renewableenergyfocus.com 2009).

Verglichen mit jenen Modulen, die in den 1980er Jahren produziert wurden und nun das Ende des Lebenszyklus erreicht haben, weisen die neuen, teilweise aus recycelten Komponenten bestehenden Module einen um 50 % höheren Wirkungsgrad auf (BINE 2010).

Tabelle 3 zeigt die erzielten Recyclingquoten, aufgeschlüsselt nach Materialien in der Anlage in Freiberg im Jahr 2009. Datengrundlage liefert das Recycling von 1.900 Modulen des belgischen Solarparks Chevetogne.

Tabelle 3: Recyclingquoten nach Materialien der Sunicon – Anlage. Datenquelle: Wambach et. al. *inkludiert Mischkomponenten von 0,24 kg

	Input [kg]	Massenanteil [%]	Output [kg]	Ausbeute [%]
Glas	5,93	65,82	5,75	96,96
Plastik	0,94	10,43	Energiegewinnung	Energiegewinnung
(gebrochene) Zellen	0,26	2,89	0,22	84,62
Kupfer	0,09	1,00	0,07	77,78
Aluminium	1,58	17,54	1,58	100,00
Anschlussbox	0,21	2,33	Energiegewinnung	Energiegewinnung
Gesamt	9,01	100,00	7,62	84,57 *

Aus dieser Tabelle wird einerseits ersichtlich, dass sich vor allem bei Solarglas sowie bei Aluminium sehr hohe Recyclingquoten erreichen lassen. Andererseits ist erkennbar, dass Teilkomponenten wie beispielsweise Plastik zur Energiegewinnung herangezogen werden können.

Die Pilotanlage arbeitete noch energie- und rohstoffaufwendig, manuelle Separation und niedriger Durchsatz verursachen noch relativ hohe Kosten. Die Pilotanlage wurde deswegen 2011 demontiert.

Automatisierte, großtechnische, energieoptimierte Anlagen sollen die Umweltbelastungen bei gleicher Materialausbeute auf ein Drittel reduzieren und kostendeckend bzw. gewinnbringend recyceln (Beckmann 2012 ; BINE 2010).

Recyclingverfahren der Firma First Solar

Die US Firma First Solar ist Hersteller von CdTe-Modulen und hat ein speziell auf diesen Modultyp ausgelegtes Recyclingkonzept entwickelt. Derzeit

wird in erster Linie Bruch- und Ausschussware wiederverwertet. Das Verfahren ist in der Lage, sowohl ganze, als auch zerbrochene Module sowie Produktionsabfälle im selben Prozess zu verarbeiten. Die Ausgangsmaterialien werden zuerst in einem Schredder grob zerkleinert um anschließend in einer Hammermühle auf 4 – 5 mm kleine Stücke gemahlen zu werden. Ziel dieses Prozessschrittes ist das Aufbrechen der Versiegelung der Laminierung. Im nächsten Schritt werden in einer Edelstahltrommel Halbleiterschichten mittels Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid gelöst, danach werden Feststoffe wie Glas oder Laminierfolie abgetrennt. Die verbleibende metallhaltige Flüssigkeit wird unter ständiger Erhöhung des pH-Wertes in einem dreistufigen Ausfällungsprozess gereinigt und konzentriert. Der aus diesem Prozess entstehende Filterkuchen kann wieder zu Halbleitermaterial für neue Module verarbeitet werden. Mit der Recyclingtechnologie können 95 % des Halbleiters Cadmiumtellurid wiedergewonnen werden sowie bis zu 90 % des PV-Glases. Die Recyclingquote für Tellur beträgt in diesem Prozess über 80 %, der gewonnene Rohstoff kann wiederverkauft werden (BINE 2010 ; SPIEGEL 2010). Sechs Prozent des recycelten Cadmiumtellurids fließen bereits wieder in die Neuproduktion ein (BSVE 2012).

Das Verfahren wird an Standorten in den USA und Deutschland (Frankfurt) angewandt. Finanziert wird die Wiederverwertung ausschließlich durch den Modulverkauf da ein Teil des Verkaufserlöses in einen zweckgebundenen, unabhängigen Fonds fließt. So ist sichergestellt, dass sämtliche Module von First Solar auch im Falle einer Insolvenz recycelt werden (BINE 2010 ; SPIEGEL 2010). First Solar organisiert neben dem Recycling selbst auch die Logistik der Sammlung, das Verpacken der Module sowie den Transport zur Recyclingstelle (renewableenergyfocus.com 2009).

Weitere Recycler

Neben den beiden oben dargestellten Recyclingtechnologien gibt es noch weitere Akteure, die für das PV-Recycling eine wesentliche Rolle spielen. Dazu zählen unter anderem sogenannte Flachglasrecycler von denen rund 75 % der bis Mitte 2010 von PV Cycle gesammelten 1.500 Tonnen Altmodulen verwertet wurden. Die Kapazitäten dieser Recycler sind derzeit ausreichend vorhanden, ein Engpass beim Flachglasrecycling ist nicht abzusehen. Die Verwertungsmöglichkeiten bei Dünnschichtmodulen sind weitaus geringer. Aufgrund der wesentlich kleineren Menge an gesammelten Dünnschichtmodulen ist aber auch hier kein Kapazitätsengpass abzusehen. Es ist zu erwarten, dass die beteiligten Akteure mit Anstieg der Sammelmengen auch deren Kapazitäten erhöhen (BINE 2012).

Ein weiteres Verfahren zum Recycling von nicht-siliziumbasierten Dünnschichtmodulen hat das deutsche Unternehmen Loser Chemie entwickelt. Dabei werden die Module in einem chemischen Bad von der Beschichtung befreit um aus den Rückständen Tellur, Cadmium und Molybdän zu gewinnen. Das Glas wird in der Flachglasherstellung verwendet. Seit Beginn des Jahres 2012 recycelt Loser Chemie PV-Module und wird die Kapazitäten weiter ausbauen (BSVE 2012).

Das Unternehmen Reiling Glasrecycling hat sich auf das Rückgewinnen von Solarglas spezialisiert. Um ein umfassendes Modulrecycling zu gewährleisten, strebt Reiling eine Recyclingallianz mit anderen Unternehmen an. Das zurückgewonnene Glas kommt in der Schaum- und Isolierglasherstellung zum Einsatz. Herausforderungen liegen vor allem in der Erzielung höherer Glasqualitäten zur Verwendung in der Behälter- und Flachglasindustrie. Des Weiteren geht noch eine große Menge an Glas im Recyclingprozess verloren, da es zu fest mit der Verbundfolie verbunden ist (BSVE 2012).

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Behandlungsanlagen für PV-Module (Stand 4/2012).

Tabelle 4: Übersicht über die Behandlungsanlagen für PV-Module (Stand 4/2012)
Kein Anspruch auf Vollständigkeit. Datenquelle: Beckmann (2012)

	Sunicon	Solarcycle	First Solar	Loser Chemie	Saperatec	Lobbe	Reiling
Standorte	Freiberg Sachsen	Bitterfeld Wolfen	Frankfurt (Oder)	Langenweißbach	Bielefeld	Espenhain	Torgau, Marienfeld
Modultyp für Recycling (ggf. geplant)	Kristalline Module	Kristalline Module, Dünnschicht-Module (CIS, CIGS)	CdTe-Module	Waferbruch, Dünnschichtmodule (CIS, CIGS, CdTe)	Dünnschichtmodule (CIS, CIGS, CdTe)	Kristalline Module, Dünnschichtmodule (CIS, CIGS, CdTe)	Kristalline Module
Anmerkungen	Pionier (2003) bei Recyclinganlagen, Pilotanlage wurde 2011 demontiert	Recyclinganlage der 2. Generation mit vollautomatischer Anlagentechnik in Planung	Recyclinganlage für CdTe-Module (weltweit) an jedem Produktionsstandort in Betrieb	Pilotanlage in Betrieb, Erweiterung geplant	Pilotanlage in Betrieb, Ausbau der Produktionskapazitäten geplant, genehmigter Entsorgungsbetrieb mit Demontageservice, Containerbereitstellung	Versuche in Labor und Technikum, Anlagenbetrieb für 2013 geplant, gemeinsame Behandlung mit LCD-Platten	Flachglasaufbereitung im Industriemaßstab in Betrieb, Recyclinganlage der 2. Generation in Planung
Verfahrenstechnik	Kombination thermischer, physikalischer und chemischer Verfahrensschritte	Kombination thermischer, physikalischer und chemischer Verfahrensschritte	Zerkleinerung, Kombination Trocken- und Nassprozesse	Verbundöffnung, Chemische Behandlung der Halbleiterschichten	Trennung von Verklebungen und Beschichtungen mit Hilfe von Tensiden	Kombination aus Kälteschockversprödung und chemisch-physikalischer Behandlung	Rein mechanisch-physikalische Aufbereitungs- und Sortiertechnik



In Tabelle 5 sind Verfahrenstypen zur Behandlung von PV-Modulen sowie deren Stärken und Schwächen zusammengefasst.

Tabelle 5: Merkmale von Verfahrenstypen zur Behandlung von PV-Modulen
Datenquelle: Deutsches Umweltbundesamt (2004)

Verfahren	Fraktionen Output	Stärken	Schwächen
Chemisch	Silizium-Wafer, Glas, gebrauchte Chemikalien, Halbleiter, Metallrahmen (vor der Behandlung separiert)	Gewinnung von Silizium für Wiederverwendung bzw. Wiederverwertung, Rückgewinnung von Halbleitern	Hohe Menge verbrauchter Chemikalien zur Beseitigung
Thermisch	Silizium-Wafer, Glas, Halbleiter, Metallrahmen (vor der Behandlung separiert)	Gewinnung von Silizium für Wiederverwendung bzw. Wiederverwertung	Energiebedarf, Emissionspotenzial im Abgaspfad, Abgasbehandlung, Abfälle aus der Abgasbehandlung
Mechanisch (für Dünnschicht-Module)	Glas, Halbleiter, Kunststoffe, Metallrahmen (vor der Behandlung separiert)	Rückgewinnung von Halbleitern, kein Einsatz von Chemikalien	Kontaminierter Sand, gefährliche Stäube während des Prozesses
Trennung mit anschließendem Einsatz des Glases im Verbundglasrecycling	Glas (einschließlich Si), Metallrahmen (vor der Behandlung separiert)	Mechanische Trenntechnik ohne Nebenprodukte, die zusätzlich entsorgt werden müssen	Downcycling, Si-Einschluss führt zu Glasfehler, Gehalte an Si, Cu, Pb und Kunststoff problematisch für Recyclingeinsatz in der Glasproduktion



Forschung und Entwicklung im PV-Recycling

Die PV-Branche ist durch eine intensive Forschungstätigkeit gekennzeichnet, in den letzten Jahren konnten in vielen Bereichen bedeutende Fortschritte erzielt werden. Dies hat auch wesentlich dazu beigetragen, dass Modul- und Anlagenpreise kontinuierlich sanken, Anlagen in immer größerer Anzahl errichtet werden und dadurch die zukünftigen Abfallmengen steigen. Die Forschung im Bereich des PV-Recyclings ist derzeit hingegen noch gering ausgeprägt.

In dem deutschen Forschungsprojekt „SoMoRec“ arbeiten Experten beispielsweise daran, die Verwertung von PV-Modulen ökonomisch und ökologisch zu optimieren. Dabei werden einzelne Prozesse des Recyclings analysiert und hinsichtlich deren Optimierungspotenzial untersucht. Es sollen die Toxizität und Umweltschädlichkeit der Ätzlösungen minimiert

werden und dadurch auch die Entsorgungskosten der Restlösungen verringert werden. Darüber hinaus sind verbesserte Ätzverfahren in der Lage, eine höhere Lichtausbeute zu ermöglichen und dadurch den Wirkungsgrad der neuen PV-Zellen zu steigern. Im Vorgängerprojekt „Somozell“ wurde an der Pilotanlage der Firma Sunicon bereits an einem sortenreinen Recycling ausgedienter PV-Anlagen gearbeitet (BINE 2010 ; BINE 2011).

Neben diesem konkreten Projekt gibt es eine Reihe von Forschungsinstitutionen, die sich mit dem Thema Recycling auseinandersetzen, unter anderem auch im Bereich der Photovoltaik. In Österreich zählen dazu beispielsweise die Technischen Universitäten Wien und Linz, die Montanuniversität Leoben, die Johannes Kepler Universität Linz und die Joanneum Research Forschungs GmbH in Graz. Im internationalen Kontext sind vor allem das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und die TU Bergakademie Freiberg hervorzuheben.

Wirtschaftliche Aspekte des PV-Recyclings

In diesem Kapitel wird dargestellt, welche Kosten- und Nutzenaspekte derzeit im Zusammenhang mit dem Recycling von PV-Modulen bestehen.

Kosten ...

Da es sich beim Recycling von PV-Anlagen um eine relativ junge Industriesparte mit wenigen Erfahrungswerten handelt, sind Unternehmen mit einer Reihe an unbekanntem Variablen konfrontiert. Schätzungen gehen davon aus, dass Recyclinganlagen ab einer Durchsatzmenge von rund 20.000 Tonnen/Jahr wirtschaftlich rentabel arbeiten können. Dies würde einem Rücklauf von 20 MW PV-Leistung bzw. über einer Million Modulen entsprechen (SPIEGEL 2010).

Neben den Durchsatzmengen sind die für die recyclebaren Modulkomponenten erzielbaren Preise mitentscheidend. Sinken Rohstoffpreise, werden zum Beispiel Glas oder Metalle am Weltmarkt billiger, müssen, aus Sicht des Recyclers, die recycelten Mengen im Gegenzug dazu steigen um den Umsatz konstant zu halten (SPIEGEL 2010). Die Preise für einige Rohstoffe in der Photovoltaikbranche sind sehr volatil, so lag der Preis für ein Kilogramm Polysilizium in den Jahren 2006 – 2008 bei rund US\$ 400, während er wenige Jahre danach nur mehr bei US\$ 55 lag. Diese Preisschwankungen wirken sich wesentlich auf die Wirtschaftlichkeit von Recyclinganlagen aus (TheDailyGreen.com 2010).

Ein weiterer wichtiger Faktor für ein wirtschaftliches PV-Recycling sind die Kosten für die bei den technischen Prozessen benötigte Energie. Ein Ansteigen der Energiekosten würde die Wirtschaftlichkeit der in vielen Fällen energieintensiven Recyclingprozesse markant schmälern (SPIEGEL 2010).

Derzeitige Überlegungen sehen vor, dass die Rücknahme und das Recycling von PV-Modulen auch zukünftig für den Anlagenbesitzer kostenlos bleiben. Der Endkunde soll nur für den Abbau der Anlage sowie für den Transport zur Sammelstelle zuständig sein. Da die Entsorgungskosten dem Produzenten anfallen, werden diese in die Gesamtkalkulation der Modulproduktion einbezogen um Kostenwahrheit zu schaffen. Neben den direkten Sammlungs- und Ent-

sorgungskosten können Beiträge für nationale Registrierungen, das Reporting oder Finanzgarantien anfallen (BINE 2012).

Die Produzentenverantwortlichkeit im Hinblick auf das Modulrecycling wird derzeit in erster Linie als Kostenfaktor gesehen. Vertreter der Branche erwarten allerdings, dass sich mit steigenden Durchsatzmengen im Sinne der economies of scale die spezifischen Recyclekosten verringern werden (TheDailyGreen.com 2010).

Auch mittels produktionstechnischer Maßnahmen können die Kosten für das Recycling reduziert werden. Dabei ist es entscheidend, sich bereits in der Produktdesignphase mit dem späteren Recycling auseinanderzusetzen. Erfolgt dieser nachhaltige Ansatz nicht in dieser frühen Phase der Produktgestaltung wird auch der Recyclingprozess aufwändiger und somit meist teurer. Im Sinne der Produzentenverantwortlichkeit ist es für Hersteller naheliegend, sich umfassend mit dem späteren Produktrecycling auseinanderzusetzen, da dieser im Endeffekt auch bezahlt werden muss. Bereits für bestimmte Recyclingprozesse designte Produkte haben großes Kostensenkungspotenzial (TheDailyGreen.com 2010).

Da die Verwendung von Silizium aus recycelten Modulen deutlich billiger ist als die Produktion aus Quarzsand, kann sich Modulrecycling auch als Sparfaktor erweisen. Von Regierungen verordnete Emissionseinsparungen können in diesem Zusammenhang dazu beitragen, dass PV-Recyclingprozesse forciert werden (TheDailyGreen.com 2010).

Derzeit wird das Modulrecycling, wie oben bereits angeführt, primär als Kostenfaktor für Hersteller gesehen. Geht man beispielsweise von rund 175 Euro Verwertungskosten pro Tonne Alt-Modul aus, ergibt sich für die im Jahr 2010 installierten 1,4 Millionen Tonnen Module ein Betrag von knapp 250 Millionen Euro (FAZ 2011). Für das Jahr 2050 werden in einem von der Europäischen Kommission in Auftrag gegebenen Bericht Kosten für das Sammeln, Vorbehandeln und Recycling von PV-Paneele von rund US\$ 2,6 Milliarden errechnet (EnergyTrend 2012).

... und Nutzen

Abschätzungen von Branchenvertretern gehen allerdings aufgrund der in Modulen enthaltenen Wertstoffen langfristig von einem bedeutenden Markt für PV-Recycling aus. Für das Jahr 2025 wird der jährliche recycelte Produktwert von kristallinen Silizium-Solarpaneelen auf US\$ 122 Millionen geschätzt. Mit US\$ 105 Millionen ist der Großteil davon dem Glasrecycling zuzuschreiben, gefolgt vom Aluminiumrecycling mit rund US\$ 11 Millionen. Aus diesen Zahlen wird ersichtlich, dass der PV-Recyclingmarkt bedeutende Dimensionen annehmen wird und dadurch Chancen für Unternehmen eröffnet. Aufgrund der, in der Einleitung bereits dargestellten, rasanten Steigerung der prognostizierten Abfallmengen ist das PV-Recycling ein bedeutender Wachstumsmarkt der nächsten Jahre bzw. Jahrzehnte. Für das

Jahr 2035 geht man bereits von einem jährlichen recycelten Produktwert von kristallinen Silizium-Solarpaneelen von rund US\$ 12,9 Milliarden aus (davon rund US\$ 11 Milliarden für Solarglas und US\$ 1,1 Milliarden für Aluminium) (Energy Matters 2012 ; MarketResearch.com 2012). Setzt man 100 % Aluminiumrecycling, 95 % Glasrecycling und 30 % Recycling von seltenen Metallen voraus, ergeben sich für das Jahr 2050 geschätzte Erlöse in Höhe von rund US\$ 23 Milliarden (EnergyTrend 2012).

Weitere Berechnungen gehen davon aus, dass sich im Zeitraum 2025 bis 2035 der Wert pro Watt recycelter Modulleistung von US\$ 0,58 auf US\$ 1,21 mehr als verdoppelt. Gründe dafür werden einerseits in der höheren Menge an recyceltem PV-Glas und Aluminium gesehen, andererseits in den erwarteten Preisvariationen von kristallinen Solarmodulen (Energy Matters 2012 ; MarketResearch.com 2012).



Stakeholder des PV-Recyclings

In diesem Kapitel werden nationale, europäische und internationale Akteure im Bereich des Recyclings von PV-Modulen vorgestellt. Die Auflistung dient als Grundlage für eine nachhaltige, branchenübergreifende Vernetzung der Stakeholder. Die Institutionen, Einrichtungen, Unternehmen und Dienstleister wurden im Rahmen einer Desk Research erhoben, die Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Recycling von PV-Modulen und/oder Elektroaltgeräten			
Deutsche Solar AG	Deutschland	Langjährige Forschungs- und Anwendungsaktivitäten im PV-Recycling	www.deutschesolar.de
First Solar	USA	Anlage zum Recycling von PV-Modulen	www.firstsolar.com
Loser Chemie	Deutschland	Integriertes Recycling von PV-Abfall	www.loserchemie.de
Reiling Glas Recycling GmbH & Co. KG	Deutschland	Recycling von Solarglas	www.reiling.de
saperatec GmbH	Deutschland	Recycling von Verbundmaterialien	www.saperatec.de
Solarworld / Sunicon / Solarcycle	Deutschland	Pilotanlage zum Recycling von PV-Modulen	www.solarworld.de
Recyclinginstitutionen und Sammelstellen			
Elektro Recycling Austria	Österreich	Sammlung und Verwertung von Elektroaltgeräten	www.era-gmbh.at
Energetica Energietechnik GmbH	Österreich	Sammelstelle für PV-Module in Österreich	www.energetica-pv.com
European Recycling Plattform	Europa	Entsorgung und Behandlung von Elektroaltgeräten	www.erp-recycling.at
Interseroh Österreich	Österreich	Sammlung von Elektroaltgeräten	www.interseroh.at
Obrist Austria GmbH	Österreich	Sammelstelle für PV-Module in Österreich	www.obrist-austria.com
PV Cycle	Europa	Sammel- und Recyclingprogramm für PV-Altmodule in ganz Europa	www.pvcycle.org
Siblik	Österreich	Sammelstelle für PV-Module in Österreich	www.siblik.com
Umweltforum Haushalt	Österreich	Sammlung von Elektroaltgeräten	www.ufh.at
VERE – Verband zur Rücknahme und Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten e.V.	Deutschland	Aktivitäten im Bereich PV-Recycling	www.vereev.de

Forschung			
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE	Deutschland	Forschungsaktivitäten im Bereich PV-Recycling	www.ise.fraunhofer.de
Joanneum Research	Österreich	Forschungsaktivitäten im Bereich PV-Recycling	www.joanneum.at
Johannes Kepler Uni Linz	Österreich	Forschungsaktivitäten im Bereich PV-Recycling	www.jku.at
Montanuniversität Leoben	Österreich	Forschungsaktivitäten im Bereich Recycling	www.unileoben.ac.at
TU Bergakademie Freiberg	Deutschland	Forschungsaktivitäten im Bereich PV-Recycling	www.tu-freiberg.de

Politische Akteure / Interessensvertretung			
Bayerischen Landesamts für Umwelt	Deutschland	Zuständig für Abfallagenden in Deutschland	www.lfu.bayern.de
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft	Österreich	Zuständig für Abfallagenden in Österreich	www.lebensministerium.at
Europäische Kommission - DG Umwelt	Europa	Zuständig für Abfallagenden in der Europäischen Union	www.ec.europa.eu/environment
FEEL - Fachverband der Elektro- und Elektronikindustrie	Österreich	Interessensvertretung der österreichischen Elektro- und Elektronikindustrie	www.feei.at
PV Austria	Österreich	Interessensvertretung für Photovoltaik in Österreich	www.pvaustria.at

Diverse			
IBC Solar Austria	Deutschland	Rückbau von PV-Anlagen	www.abc-solar.at
photovoltaic.eu	Deutschland	Informationswebseite zum Thema PV	www.photovoltaik.eu
pv magazine	Deutschland	Informationswebseite zum Thema PV	www.pv-magazine.com
Secondsol GmbH	Deutschland	Zweitmarkt für Solarmodule	www.secondsol.de
Wambach Consulting	Deutschland	Beratung im Bereich PV-Recycling	www.wambach-consulting.com

Literaturverzeichnis

Alba Group (2012): ALBA Group plc & Co. KG: Solarmodule nun Elektroschrott. Online unter: <http://www.albagroup.de/branche/umweltbranche-aktuell/details/article/solarmodule-nun-elektroschrott.html> [12.9.2013]

Beckmann, J. (2012): Wieso Abfall? Entsorgung von Photovoltaik-Anlagen. Zitiert in: Installateur 02.12.

BINE (2010): BINE Informationsdienst. Online unter: <http://www.bine.info/themen/publikation/recycling-von-photovoltaik-modulen/> [5.9.2013]

BINE (2011): BINE Informationsdienst. Online unter: <http://www.bine.info/themen/erneuerbare-energien/photovoltaik/news/wie-geht-es-weiter-beim-recycling-von-pv-modulen/> [10.9.2013]

BINE (2012): BINE Informationsdienst. Online unter: <http://www.bine.info/themen/erneuerbare-energien/photovoltaik/news/solarmodule-auf-recyclingkurs/> [5.9.2013]

BMVIT (2013): Innovative Energietechnologien in Österreich. Marktentwicklung 2012.

BVSE (2012): Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. Recycling von Solarmodulen: hochwertige und ökonomische Verfahren brauchen vernünftigen gesetzlichen Rahmen. Online unter: http://www.bvse.de/344/5951/Recycling_von_Solarmodulen__hochwertige_und_oekonomische_Verfahren_brauchen_vernueftigen_gesetzlichen_Rahmen [5.9.2013]

Deutsches Umweltbundesamt (2004): Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung. Umwelt-Forschungs-Plan, FKZ 202 33 304 Endbericht.

Energy Matters (2012): Solar Panel Recycling Will Be A Multi-Billion Dollar Industry. Online unter: http://www.energymatters.com.au/index.php?main_page=news_article&article_id=3001 [11.9.2013]

EnergyTrend (2012): The Emerging PV Module Recycling Market.

Online unter: http://pv.energytrend.com/Energy-Trend_PV_20120315 [11.9.2013]

FAZ (2011): Hochreine Rohstoffe aus ausgedienten Solarmodulen. Online unter: <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/umwelt-technik/recycling-hochreine-rohstoffe-aus-ausgedienten-solarmodulen-11571632.html> [11.9.2013]

Focus (2010): Was passiert mit toten Solarzellen? Online unter: http://www.focus.de/wissen/technik/erfindungen/erneuerbare-energien-was-passiert-mit-toten-solarzellen_aid_562544.html [5.9.2013]

Karsten Wambach Consulting (2013): Recycling von Solarmodulen und Solarzellen.

MarketResearch.com (2012): Solar Module Recycling - A Necessary Step to Maximize Environmental Benefits of Solar PV Industry. Online unter: <http://www.marketresearch.com/GlobalData-v3648/Solar-Module-Recycling-Necessary-Step-6748827/> [5.9.2013]

PV Cycle (2013): Online unter: <http://www.pvcycle.org/de/> [5.9.2013]

pv magazine (2012): PV module recycling mandatory for all EU members by Q1 2014. Online unter: http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/pv-module-recycling-mandatory-for-all-eu-members-by-q1-2014_100008396/#axzz2HxGh0RjD [12.9.2013]

Renewableenergyfocus.com (2009) : End-of-life PV: then what? - Recycling solar PV panels. Online unter: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/3005/end-of-life-pv-then-what-recycling-solar-pv-panels/> [5.9.2013]

SPIEGEL (2010): Recycling von Modulen: Solar-Konzerne kämpfen um ihr grünes Image. Online unter: <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/recycling-von-modulen-solar-konzerne-kaempfen-um-ihr-gruenes-image-a-688779.html> [5.9.2013]

SPIEGEL (2011): Photovoltaik-Recycling: Solarindustrie plagt sich mit ihren Altlasten. Online unter: <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/photovoltaik-recycling-solarindustrie-plagt-sich-mit-ihren-altlasten-a-803784.html> [5.9.2013]

TheDailyGreen.com (2010): Solar Panel Recycling Gears Up. Online unter: <http://www.thedailygreen.com/environmental-news/latest/solar-panel-recycling-460810> [5.9.2013]

Wambach, K.; Schlenker, S.; Müller, A.; Konrad, B. (2009): A Voluntary Take Back Scheme and Industrial Recycling of Photovoltaic Modules. Online unter: http://www.bnl.gov/pv/files/PRS_Agenda/3_4_PV-Module-RecyclingWambach.pdf [01.10.2013]

