

Tim Stolle

Zukünftiges Abfallaufkommen von Photovoltaikmodulen

Materialfluss- und Reifegradanalyse
für das Recycling



Diplomica Verlag

Stolle, Tim: Zukünftiges Abfallaufkommen von Photovoltaikmodulen. Materialfluss- und Reifegradanalyse für das Recycling, Hamburg, Diplomica Verlag GmbH 2016

Buch-ISBN: 978-3-95934-937-6

PDF-eBook-ISBN: 978-3-95934-437-1

Druck/Herstellung: Diplomica® Verlag GmbH, Hamburg, 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und die Diplomica Verlag GmbH, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Alle Rechte vorbehalten

© Diplomica Verlag GmbH

Hermannstal 119k, 22119 Hamburg

<http://www.diplomica-verlag.de>, Hamburg 2016

Printed in Germany

Kurzfassung

Photovoltaik (PV) ist ein wesentlicher Bestandteil zur Erreichung der Energiewende in Deutschland, was sich in dem hohen Umfang der jährlich neu installierten PV-Leistung widerspiegelt. Aufgrund der begrenzten Lebensdauer ist diese Entwicklung mit einem entsprechend hohen PV-Abfallaufkommen in der Zukunft verbunden. Um hierfür ein effektives Recyclingsystem aufzubauen, sind Informationen über die zeitliche Verteilung, den Umfang und die Materialzusammensetzung des Abfallaufkommens nötig. Mit Hilfe einer Materialflussanalyse in Verbindung mit einer Lebensdauerberechnung wurden diese Informationen für Deutschland in dem Zeitraum zwischen 2000 und 2050 im Rahmen dieser Untersuchung ermittelt. Ebenso relevant für die Verwertung der PV-Module sind die vorhandenen Recyclingtechnologien und deren technische Reifegrade, welche mittels der Technology Readiness Level Methodik bestimmt wurden. Es zeigt sich, dass im Betrachtungszeitraum zwischen 6,4 und knapp 9 Millionen Tonnen PV-Abfall anfällt, wobei mit über 90% davon erst nach dem Jahr 2030 zu rechnen ist. Auf Modulebene entfällt der Großteil auf kristalline Siliziummodule (c-Si) und bei der Materialzusammensetzung dominiert Glas. Hinsichtlich der technischen Reife weist nur einer von vier betrachteten Recyclingprozessen den höchstmöglichen Reifegrad im Rahmen des TRL-Reifegradmodells auf. Dabei handelt es sich um den Prozess zur Verwertung von Cadmium-Tellurid-Modulen, obwohl maximal 14% des Abfallaufkommens auf diese Technologie entfallen. So sind besonders noch beim Recycling von c-Si-Modulen weitere Forschungs- und Entwicklungsbemühungen nötig, um den zukünftig aufkommenden PV-Abfall verwerten zu können.

Abstract

Photovoltaic (PV) plays a major role in the energy transition in Germany, which can be seen in the high amount of yearly PV-installations within the last years. This development leads to a corresponding volume of PV-waste in the future due to the limited life expectancy of the PV-Modules. To establish an effective recycling system, gathering information about the distribution over time, the amount and the composition of the arising PV-waste are crucial. Within this thesis these information are provided for the area of Germany and the time between 2000 und 2050 by using a material flow analysis and a life expectancy calculation. Equally relevant for the recovery of PV-modules are the recycling processes and their technological maturity, which are assessed by using the Technology Readiness Level method. It is shown that between 6.4 and almost 9 million tones of PV-waste will arise in Germany within the analysis period, of which over 90% accrue after 2030. The majority results from crystalline silicon (c-Si) modules respectively glass on the material level. With regard to the technological maturity it is shown that only one out of four examined recycling processes has been allocated at the highest possible maturity level of the TRL-maturity framework. This process is used to recycle Cadmium-Telluride modules, although this PV-technology only makes up for maximum 14% of the arising PV-waste. Therefore it is necessary to increase further research- and development activities, especially for the recycling process to recover c-Si modules to handle the future PV-waste streams.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	V
Abstract	VI
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Einleitung	15
1.1 Zielsetzung der Untersuchung	16
1.2 Aufbau der Untersuchung	16
2 Grundlagen des PV-Recyclings	17
2.1 PV-Modularten und Aufbau.....	17
2.1.1 Kristalline Siliziummodule	18
2.1.2 CdTe-Module	19
2.1.3 CI(G)S-Module.....	20
2.1.4 Amorphe Siliziummodule	21
2.1.5 Zusammenfassung	22
2.2 Entstehung des PV-Abfalls und Gründe des Recyclings	23
2.2.1 Ursachen der PV-Abfallentstehung	23
2.2.2 Erhalt wertvoller und seltener Rohstoffe	24
2.2.3 Verringerung von Umweltwirkungen.....	25
2.3 Verfahrensschritte des PV-Recyclings.....	27
2.3.1 Thermische Behandlung.....	27
2.3.2 Mechanische Behandlung	28
2.3.3 Chemische Behandlung.....	29
2.4 Rechtliche Rahmenbedingungen und Rücknahmesysteme	30
2.4.1 WEEE-Richtlinie	30
2.4.2 PV Cycle	32
2.4.3 First Solar	33

3	Methodik	35
3.1	Allgemeine Methodik der Materialflussanalyse.....	35
3.1.1	Definition der Zielstellung, Materialien und Grenzen	37
3.1.2	Datengrundlage und Vorgehen.....	39
3.1.3	Annahmen und Methodik der Lebensdauerberechnung.....	44
3.2	Technology-Readiness-Level Analyse.....	46
3.2.1	Aufbau und Ablauf der TRL-Methode	47
3.2.2	Betrachtung der Recyclingtechnologien/ Datengrundlage.....	49
4	Ergebnisse.....	55
4.1	Ergebnisse Materialflussanalyse	55
4.1.1	Ex-post Betrachtung	55
4.1.2	Ex-ante Betrachtung.....	57
4.2	Reifegrade der Recyclingtechnologien	68
5	Diskussion.....	73
5.1	Validierung der MFA-Modellannahmen	73
5.2	Interpretation der MFA-Ergebnisse.....	75
5.3	Interpretation der Ergebnisse der Reifegradanalyse	78
5.4	Zukünftige Herausforderungen	80
6	Fazit.....	83
	Literaturverzeichnis	85
	Anhang.....	93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau einer c-Si Solarzelle	19
Abbildung 2: Aufbau einer CdTe-Solarzelle in der Superstratkonfiguration	20
Abbildung 3: Aufbau einer Cl(G)S-Solarzelle in der Substratkonfiguration	21
Abbildung 4: Aufbau einer a-Si-Solarzelle in der Superstratkonfiguration	22
Abbildung 5: Durch PV Cycle eingesammelte PV Module nach Ländern [t] und Technologien [%] zwischen 2010 und 2014	32
Abbildung 6: Relevante Prozesse sowie Eingrenzung der Materialflussbetrachtung	38
Abbildung 7: Zusätzlich installierte PV-Leistung in Deutschland zwischen 2000 und 2013	39
Abbildung 8: Marktanteil der PV-Technologien am jährlichen Produktionsaufkommen	40
Abbildung 9: Entwicklung der PV-Marktanteile bis 2040	43
Abbildung 10: Verteilungsfunktion in den Szenarien Breakthrough und Slow-Progress	46
Abbildung 11: Zusammenhang zwischen Reife und Risiko von Technologien in der Entwicklungsphase	47
Abbildung 12: Übersicht der Reifegradstufen	48
Abbildung 13: Recyclingprozess von First Solar	51
Abbildung 14: Recyclingprozess von Sunicon	52
Abbildung 15: Recyclingprozess des RESOLVED-Projektes	53
Abbildung 16: Recyclingprozess von Loser Chemie	54
Abbildung 17: PV-Abfallaufkommen zwischen 2000 und 2013	56
Abbildung 18: Verteilung PV-Abfallaufkommen zwischen 2000 und 2013 im Breakthrough-Szenario	57
Abbildung 19: Verteilung PV-Abfallaufkommen zwischen 2000 und 2013 im Slow-Progress-Szenario	57
Abbildung 20: PV-Abfallaufkommen zwischen 2014 und 2050	58
Abbildung 21: Abfallaufkommen nach Modultypen (2014 bis 2050) im Breakthrough-Szenario	59
Abbildung 22: Anteil der Modultypen am Abfallaufkommen im Breakthrough-Szenario	60
Abbildung 23: Abfallaufkommen nach Modultypen zwischen 2014 und 2050 Slow-Progress-Szenario	61
Abbildung 24: Anteil der Modultypen am Abfallaufkommen Slow-Progress-Szenario	61
Abbildung 25: Materialanteile am PV-Abfallaufkommen im Breakthrough-Szenario	62
Abbildung 26: Materialanteile am PV-Abfallaufkommen im Slow-Progress-Szenario	63

Abbildung 27: Zeitliche Entwicklung des Abfallaufkommens nach Materialien	
aufgeschlüsselt.....	65
Abbildung 28: Abfallaufkommen weiterer Materialien in [t] im Breakthrough-Szenario.....	66
Abbildung 29: Abfallaufkommen weiterer Materialien in [t] im Slow-Progress-Szenario	66
Abbildung 30: Technologische Reife der betrachteten Recyclingprozesse	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung wichtiger Kennzahlen relevanter PV-Technologien	22
Tabelle 2: Verhältnis von Masse zu Leistung unterschiedlicher PV-Technologien	41
Tabelle 3: Materialanteile der PV-Module in [%]	42
Tabelle 4: Weibullparameter verschiedener Szenarien	45
Tabelle 5: Anteil des Abfallaufkommens in verschiedenen Zeitabschnitten	58
Tabelle 6: Abfallaufkommen aufgeschlüsselt nach Modultechnologie in tausend [t]	61
Tabelle 7: Abfallaufkommen aufgeschlüsselt nach Materialien in beiden Szenarien.....	64
Tabelle 8: Anteile der Modultypen am Abfallaufkommen aufgeschlüsselt nach Materialien	67
Tabelle 9: Vergleich Abfallprognose von Eckstein ggü. eigenen Berechnungen in [t]	74
Tabelle 10: Wirtschaftliche Betrachtung des Materialaufkommens.....	76

Abkürzungsverzeichnis

a-Ge:H	Hydrogenisiertes amorphes Germanium
AgNO ₃	Silbernitrat
a-si	Amorphes Silizium
a-Si:H	Hydrogenisiertes amorphes Silizium
CdS	Cadmiumsulfid
CdTe	Cadmiumtellurid
CENELEC	Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
C ₂ H ₄ O ₂	Essigsäure
Cl(G)S	Cadmium, Indium, Gallium, Selen
CO ₂ -eq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
c-si	Kristallines Silizium
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
ElektroG	Elektro- und Elektronikgerätegesetz
EoL	End of Life
EPBT	Energy Payback Time
ER	Early Returns
EVA	Ethylenvinylacetat
GWP	Global Warming Potential
HF	Flusssäure
HNO ₃	Salpetersäure
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
H ₂ SiF ₆	Hexafluoridokieselsäure
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
HTP	Humantoxizitätspotential
ITO	Indium-Zinn-Oxid
KOH	Kaliumhydroxid
mc-Si	Multikristallines Silizium
METP	Marines Ökotoxizitätspotential
MDP	Metal Depletion Potential
MFA	Material Flow Analysis

NaOH	Natriumhydroxid
nc-Si	Nano-kristallines Silizium
OPV	Organische Photovoltaik
PID	Potentialinduzierte Degradierung
PSC	Polymersolarzelle
PV	Photovoltaik
PVB	Polyvinylbutyral
sc-Si	Monokristallines Silizium
SGS	Solar Grade Silicon
Si	Silizium
S ₃ N ₄	Siliziumnitrid
SnO ₂	Zinndioxid
STC	Standard Test Conditions
TCO	Transparent conductive oxide
TETP	Terrestrisches Ökotoxizitätspotential
TiO ₂	Titandioxid
TRL	Technology Readiness Level
TWh	Terrawattstunde
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment
ZnO	Zinkoxid
ZnO ₂	Zinkdioxid

