

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

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>V</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VI</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>15</b>
1.1 Zielsetzung der Untersuchung .....	16
1.2 Aufbau der Untersuchung .....	16
<b>2 Grundlagen des PV-Recyclings</b> .....	<b>17</b>
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

<b>3</b>	<b>Methodik .....</b>	<b>35</b>
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
<b>4</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>55</b>
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
<b>5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>73</b>
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
<b>6</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>83</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>85</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>93</b>

## 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









