

Recycling von Photovoltaikmodulen im regionalen Kontext

Theoretische Grundlagen, desiderate
Rahmenbedingungen und prävalierende
Hemmnisfaktoren

Felix Heckler



Recycling von Photovoltaikmodulen im regionalen Kontext

Theoretische Grundlagen, desiderate Rahmenbedingungen
und prävalierende Hemmnisfaktoren

Von der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät
der Universität Leipzig
genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(akademischer Grad)

Dr.-Ing.

(Kurzform)

vorgelegt

von Diplom-Wirtschaftsingenieur Felix Heckler

geboren am 26.06.1984 in Leipzig

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Robert Holländer
Prof. Dr. Erik Gawel
Prof. Dr. rer. nat. Thomas Bruckner
(Vorsitzender der Promotionskommission)

Tag der Verleihung: 08.05.2019

Felix Heckler

Recycling von Photovoltaikmodulen im regionalen Kontext

Theoretische Grundlagen, desiderate Rahmenbedingungen und
prävalierende Hemmnisfaktoren

Shaker Verlag
Düren 2019

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.

Zugl.: Leipzig, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7000-2

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Einrichtung / Institut Universität Leipzig <i>Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät</i> Institut für Infrastruktur und Ressourcen- management		Professur Umwelttechnik und Umweltmanagement, VWL / Institutionenökonomische Umweltforschung			
Bearbeiter Felix Heckler		Betreuer der Arbeit Prof. Dr.-Ing. Robert Holländer Prof. Dr. Erik Gawel			
Titel der Arbeit Recycling von Photovoltaikmodulen im regionalen Kontext					
Art der Arbeit Dissertation	Datum 10.11.2017	Quellenangaben 362	Tab. und Abb. 238 (79+159)	Anlagen 26	Seitenzahl 818 (54+764)
Kurzfassung / Abstract <p>Die vorliegende Arbeit behandelt das Recycling von Photovoltaikmodulen – speziell aus der Gruppe der kristallinen Siliziumsolartechnologie. Dabei kommt der Analyse grundlegender Zusammenhänge sowie der Generierung einer auch für nachfolgende Forschungsansätze desideraten Datenbasis zentraler Stellenwert zu. Hierfür werden sowohl die technologische, die rechtliche und die ökonomische Ebene auf etwaige prävalierende Hemmnisfaktoren oder die Existenz von hemmenden Restriktionen hin untersucht als auch regionale Fragestellungen und diesbezügliche Rahmenbedingungen adressiert. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei insbesondere der Konnex zwischen regionalen Gegebenheiten und der aufgedeckten gegenwärtigen Disproportionalität aus der verfahrenstechnischen Realisierbarkeit und dem realen Anwendungsspektrum betrachtungsrelevanter Recyclingaktivitäten. Um den Untersuchungsgegenstand adäquat zu bearbeiten, wurde ein Prognosemodell zur Prädiktion annueller Altmodulströme auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse und aktueller Erfahrungswerte entwickelt, welches zudem nach technologischem Ansatz differenziert und regional uneingeschränkt arbeitet. Darauf aufbauend, aus der Modifikation eines finanzmathematischen Entscheidungskriteriums, der Anwendung von Optimierungsansätzen und der Kenntnis potenzieller Veränderungen des grundlegenden Aufbaus eines definierten Standard-solarmoduls infolge produktionskostengetriebener Marktumbrüche konnten letztlich multiple aber szenariengebundene Hemmnisfaktoren identifiziert werden. Aus dem ganzheitlichen Betrachtungsansatz von Produktion und Recycling gelang darüber hinaus eine Kalkulation idealisierter energetischer und materieller Einsparpotenziale eines Recyclingansatzes im Vergleich zur Durchflusswirtschaft. Gleichwohl konnte, basierend auf den Ergebnissen, ein weiterer Forschungsbedarf abgeleitet und empfohlen werden.</p>					
Schlagworte Photovoltaik, Recycling, Sachsen, kristalline Siliziumsolarmodule, Altmodulprognose					

Lebenslauf

Felix Heckler

*26.06.1984 in Leipzig

Coppistraße 4a

04129 Leipzig

Tel.: 0157/75757235

Email: HecklerFelix@web.de



Wissenschaftlicher Werdegang

01/2015 – 11/2018

Gastwissenschaftler an der Universität Leipzig:

- Promotion (summa cum laude)
„Recycling von Photovoltaikmodulen im regionalen Kontext“
- Durchführung der Übung der Lehrveranstaltung:
„Emissionen und Luftreinhaltung“

10/2012 – 12/2014

- Vertreter und Sprecher der Nachwuchsforschergruppe:
„RegAWa – Regionale Anpassung an den globalen Wandel“
- wissenschaftlicher Mitarbeiter an den Lehrstühlen
Umwelttechnik/Umweltmanagement
VWL / Institutionenökonomische Umweltforschung
der Universität Leipzig

Veröffentlichungen / Beiträge

06/2014

Discussion Paper

- Evolution der PV-Märkte: Globale Historie, nationale Besonderheiten und regionaler Anlagenbestand
- Literaturanalyse: Recycling für PV-Module – die technologischen Grundlagen

08/2013

04/2017

Posterausstellung

- Ideenwettbewerb „Neue Wege gehen“

11/2015

Beiträge

- Photovoltaikrecycling im ostdeutschen Produktionscluster – ein Beitrag zu einer nachhaltigen regionalen Entwicklung?
Beitrag zur Festschrift anlässlich des zehnjährigen Bestehens des Instituts für Infrastruktur und Ressourcenmanagement (IIRM): Zehn Jahre transdisziplinäre Nachhaltigkeitsforschung an der Universität Leipzig.

Studium

10/2004 – 09/2011

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Diplomstudiengang Wirtschaftsingenieurwesen (Gesamtnote: 1,8)

Studienrichtung: Verfahrenstechnik
Betriebswirtschaftslehre

Spezialisierung: Umweltschutztechnik
Verfahrensoptimierung
Produktion und Logistik

Studienarbeit: Laborversuche zur Minderung des thermisch mobilisierbaren Quecksilbers aus REA-Gips.

Diplomarbeit: Zur Überwachung von Emissionen aus Kraftwerken:
Validierung der Quecksilber-Adsorptionskapazität von Dowex-Harzen (Note: 1,3)

WS 2008/2009

Praxisseminar „Interdisziplinäre wissenschaftliche Beratung
In der Prozessindustrie - Problemanalyse bei The DOW Chemical
Company“

Studienbegleitende Praktika

04/2010 – 10/2010

Praktikum bei Heppe Medical Chitosan GmbH

06/2009 – 03/2010

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
• Hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl
Automatisierungstechnik zur Datenbankpflege

Außeruniversitäre Weiterbildungen

05/2012 – 08/2012

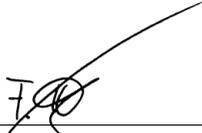
Intensivkurs: „*Englisch für den Beruf*“ bei der Sprachschule
Berlitz Deutschland GmbH

Schulbildung

1995 – 07/2003

Abitur am Friedrich-Schiller-Gymnasium Leipzig (Gesamtnote: 2,2)
Naturwissenschaftliches Profil mit den Leistungskursen:
• Mathematik
• Physik

Leipzig, 10.11.2017


Felix Fleckler

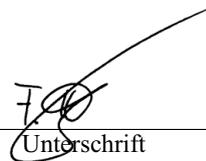
Erklärung gemäß § 8 Absatz 2 (Nummer 1 und 2) der Promotionsordnung der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Leipzig vom 12.10.2010

Hiermit erkläre ich in Anlehnung an § 8 Absatz 2 Nummer 1 der Promotionsordnung vom 12.10.2010 der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Leipzig, dass die vorgelegte Dissertation ohne unzulässige Hilfe, insbesondere ohne die Inanspruchnahme eines Promotionsberaters, und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde und dass die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken in der Arbeit als solche kenntlich gemacht worden sind.

Weiter erkläre ich in Anlehnung an § 8 Absatz 2 Nummer 2 der Promotionsordnung vom 12.10.2010 der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Leipzig, dass die vorgelegte Dissertation weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zwecke einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt und insgesamt noch nicht veröffentlicht wurde.

Leipzig, 10.11.2017

Ort, Datum



Unterschrift

Auch Photovoltaikmodule halten *nicht* ewig.

VORWORT

Das Recycling von Photovoltaikmodulen – was auf den ersten Blick leicht greifbar erscheint, stellt sich bei genauer Betrachtung als komplexe Kombination der beiden zukunftssträchtigen Technologiebranchen Photovoltaik und Recycling dar. Dies bestätigte sich nicht nur in der langjährigen Bearbeitung der Thematik, sondern auch in zahlreichen Gesprächen mit Experten, Vertretern aus Industrie und Wirtschaft oder interessierten Kollegen. Die grundlegenden Definitionen der zentralen Begrifflichkeiten Photovoltaik und Recycling dienten dabei nicht selten als erster „Eisbrecher“ hin zu einem Dialog. „Photovoltaikmodule? Das ist doch die Erzeugung von Strom aus Sonnenstrahlung.“ Darüber, oder wissenschaftlich ausgedrückt: die direkte Umwandlung von Teilen des solaren Strahlungsspektrums in elektrische Energie und dementsprechend die technische Nutzung des photovoltaischen Effektes, herrschte zumeist schnell Einigkeit. Auch die Verbindung zum Recycling fiel größtenteils leicht: „Was soll denn sonst mit ausgedienten Photovoltaikmodulen nach deren Nutzungsphase passieren?“ Spätestens hier transformierte sich der Dialog jedoch in einen vom Autor dieser Arbeit geführten Monolog, weil eine gezielte Spitze, wie die vorerst philosophisch klingende aber grundlegende Frage: „Ist ein Photovoltaikmodul gleich ein Photovoltaikmodul?“, dem bislang interessierten Gesprächspartner bereits an dieser Stelle eine ungeahnte aber nolens volens anstehende Tiefe der weiteren Diskussion signalisierte.

Genau diese Frage ist es jedoch, die sowohl zentrale Aspekte der vorliegenden Arbeit adressiert als auch, aus Sicht des Autors, qualitativ adäquate Quellen von wissenschaftlich ungenauen oder, mit Verlaub, vereinzelt auch fragwürdigen Arbeiten unterscheidet; zumindest sofern kein systemischer Ansatz gewählt wurde. Die Differenzierung der einzelnen Ansätze, Variationen und Konzeptionen innerhalb der Photovoltaiktechnologie ist desiderate Basis für die Betrachtung hochwertiger Recyclinglösungen, welche die Funktionsmaterialien einbegreifen. Allein die begriffliche Klassifizierung in beispielsweise kristalline Siliziumsolarmodule, Cadmiumtelluridsolarmodule oder sogenannte CIGS/CIS-Solarmodule macht bereits die Existenz von Unterschieden deutlich. Diese Unterschiede sind allerdings substanzieller Natur, da einerseits alle Photovoltaikmodule per Definition eine photoaktive Schicht als zentrales Bauelement nutzen, andererseits

sich genau hieran die namensgebenden Unterscheidungsmerkmale in der stofflichen Zusammensetzung äußern. Mit der heterogenen Umsetzung der technischen Realisierung des photovoltaischen Effektes können sich Photovoltaikmodule zudem erheblich in der gesamten materiellen Zusammensetzung und der Art und Weise, wie die einzelnen Ingredienzien verarbeitet wurden – folglich in den zugrunde liegenden Produktionsprozessen – unterscheiden. Es gibt sonach nicht *die* Photovoltaik. Vielmehr existieren konkurrierende Ansätze welche in der Konsequenz völlig heterogene Anforderungen an jenes, die Funktionsmaterialien berücksichtigendes, Recycling stellen.

Wenn sich nicht bereits an dieser Stelle die enorme Komplexität der Thematik offenbarte, dann spätestens mit der nächsten und ähnlich philosophisch anmutenden Konkretisierung des Betrachtungsgegenstandes. „Kann aus einem Photovoltaikmodul ein Photovoltaikmodul entstehen? Und, welche Recyclingstrukturen wären entsprechend zu etablieren?“ Hierfür ist es von essenzieller Bedeutung zuvörderst zentrale Termini zu klären und dem Gesprächspartner oder, im vorliegenden Fall, dem Leser bereitzustellen. Dabei dient der Begriff „Recycling“ in Fachkreisen als Hyperonym für sämtliche Kombinationen aus den Begrifflichkeiten „Verwendung“ und „Verwertung“, welche auf den Output etwaiger technologischer Maßnahmen zur Rückgewinnung der Bestandteile eines Altmoduls abzielen, mit den beiden Affixen „Wieder-“ und „Weiter-“, die den potenziellen Absatzmarkt des Prozessoutputs spezifizieren. Eine genaue Unterteilung findet sich entsprechend im zentralen Kapitel über das Recycling.

Aufgrund des noch jungen Forschungsfeldes und den geringen Erfahrungswerten mit der terrestrischen Applikation von Photovoltaikmodulen sind beide vorbezeichneten Fragestellungen jedoch bislang entweder gar nicht und wenn, nur in Teilen oder unbefriedigend beantwortet. Obgleich sich die vorliegende Arbeit vordergründig an Wissenschaft, fachspezifische Experten, Industrie und Wirtschaft richtet, soll sie auch dem Laien sowie dem geneigten oder interessierten Leser einen Einstieg in die Thematik ermöglichen und zur Klärung der angeführten Aspekte und Spezifika beitragen. Sollten beim Leser keine Vorkenntnisse oder Berührungspunkte vorhanden und grundlegende Begriffe wie „photovoltaischer Effekt“, „solares Strahlungsspektrum“ oder „pn-Übergang“ bisweilen unbekannt sein, ist der Einstieg im Kapitel der physikalischen Grundlagen nachdrücklich zu empfehlen. Dies schafft die Grundlage zum Verständnis der restlichen Kapitel und trägt dabei gleichwohl zur Vermeidung späterer Missverständnisse bei. Wer indessen darüber hinaus mit der Differenzierung innerhalb der Photovoltaiktechnologie in bei-

spielshalber kristalline Siliziumsolarzellen, photoaktive Schichten aus Cadmiumtellurid oder CIGS vertraut ist, kann selbst die desiderate Beschreibung der Zellentechnologien gegebenenfalls nur zur nachträglichen Erläuterung spezifischer Fragen nutzen. Experten auf dem Gebiet der Photovoltaiktechnologie hingegen, welche sowohl die Evolution der Photovoltaikmärkte samt globaler Installationshistorie, nationalen Besonderheiten und regionalem Anlagenbestand kennen als auch mit der Produktionstechnologie zur Fertigung eines kristallinen Standardsiliziumsolarmoduls sowie den rechtlichen Aspekten oder Obliegenheiten eines Recyclings jener Module vertraut sind, können sich auch einzelne Abschnitte losgelöst von der Gesamtheit der Arbeit herausgreifen.

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei der Photovoltaik um eine sich stetig weiterentwickelnde Technologie. Dies umfasst nicht nur die technologischen Ansätze oder die Modulkonzeptionen, auch die grundlegenden Produktionssequenzen verändern sich zunehmend aufgrund des Kostendrucks. Dies wirkt sich in der Konsequenz auch auf etwaige verfahrenstechnische Ansätze für das Recycling der Solarmodule sowie die ökonomischen, ökologischen und rechtlichen Rahmenbedingungen aus. Es ist daher klar nachvollziehbar, dass die vorliegende Arbeit nur ein Momentum darstellen kann. Dementsprechend sind etwaige Ergebnisse an sich eventuell ändernde Rahmenbedingungen kontinuierlich anzupassen. Dies gilt auch für einen Bezug der Ergebnisse dieser Arbeit auf Erkenntnisse oder Quellen, welche möglicherweise nach Beendigung der Rechercharbeit veröffentlicht wurden. „Stichtag“ ist der November 2015, welcher für alle Statistiken und wissenschaftlichen Publikationen gilt. Experteninterviews, Gespräche oder gezielte nachträgliche Konkretisierungen infolge substanziell geänderter Rahmenbedingungen sind indessen von dieser Restriktion nicht betroffen.

Sicher ist hingegen, dass mit den regional installierten Photovoltaikanlagen unterschiedlichster Dimensionierung und Art auch die in den einzelnen Modulen mitunter hochwertigen Funktionsmaterialien örtlich gebunden vorliegen. Stand 01.01.2014 trifft dies beispielshalber in der Region Sachsen samt deutschseitiger Anrainer inklusive Berlin auf 573.657 Photovoltaikanlagen zu. Mittels geeigneter Recyclingstrukturen können diese möglicherweise als regionales Rohstoffpotenzial angesehen werden, denn zuwider anderweitigen Behauptungen, und damit gingen alle Gesprächspartner abschließend immer konform, halten auch Photovoltaikmodule *nicht* ewig.

Die Erstellung der vorliegenden Arbeit wäre nicht ohne das Wohlwollen von Herrn Prof. Holländer und Herrn Prof. Gawel möglich gewesen. Neben der initialen Entscheidung mir im Rahmen des vom ESF geförderten Kooperationsprojektes „RegAWa: Regionale Anpassung an den globalen Wandel - Ökonomische Instrumente zur Sicherung von Nachhaltigkeit“ ihr Vertrauen zu schenken und mir so auch über die Jahre eine persönliche und fachliche Entfaltung zu ermöglichen, danke ich Ihnen dafür, dass Sie mir stets Rückhalt in einem mir unbekanntem Umfeld gegeben haben. Dazu zählen nicht vordergründig die fachlichen Ratschläge, die zwar ab und an notwendig wurden, vielmehr danke ich Ihnen vor allem für die Unterstützung über das Kooperationsprojekt „RegAWa“ hinaus. Sehr geehrter Herr Prof. Holländer, auch wenn in dieser Form unüblich, möchte ich Ihnen in persönlicher Weise danken. Was als Kleinigkeit gedeutet werden kann, hat entscheidend zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen und stellt aus meiner Sicht keine Selbstverständlichkeit dar. Dies begreift insbesondere die uneingeschränkte Nutzung und in diesem Zusammenhang auch die Duldung eines mitunter chaotisch anmutenden Arbeitsplatzes ein. Speziell aber auch der persönliche Einsatz für eine Folgefinanzierung, ohne die ein Abschluss der Arbeit kritisch zu bewerten wäre, stellt für mich keinen alltäglichen „Gefallen“ dar.

An dieser Stelle möchte ich mich auch, aber nicht nur für die finanzielle Unterstützung, bei der Friedrich-Naumann-Stiftung für die Freiheit bedanken - eine Stiftung, die den liberalen Grundgedanken nicht auferlegt, sondern lebt.

Dank gebührt auch meinen Kollegen, vor allem jedoch Herrn Minar und Herrn Frey sowie meinen ehemaligen „Tischnachbarn“ für das stets offene Ohr hinsichtlich aller von der Dissertation losgelösten Belange und der Toleranz meiner Eigenheiten.

Neben Freunden und Familie, die mir auch ein Leben abseits der Arbeit ermöglichten und mir so die benötigte Kraft und Ausdauer gaben, danke ich insbesondere meinen Eltern und ausdrücklich meiner Frau Ina.

Ihr danke ich von Herzen. Nicht nur für die unzählbaren Entbehrungen, die Sie aus Liebe zu mir eingegangen ist, auch für Ihre andauernde Unterstützung in allen Lebenslagen und -bereichen. Einzig gegen die Geheimratsecken, die mit solch einem Unterfangen anscheinend naturgemäß einhergehen, konnte auch Sie nichts machen. Trotz 217.610 geschriebener Wörter gelingt es mir nun leider nicht, meine Dankbarkeit Dir gegenüber auszudrücken. Was ich aber sagen kann, ist: Ich liebe Dich.

INHALTSÜBERSICHT

INHALTSVERZEICHNIS	XVII
TABELLENVERZEICHNIS	XXV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	XXIX
ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS	XXXVII
1. EINFÜHRUNG.....	1
1.1 UNTERSUCHUNGSSCHWERPUNKTE	2
1.2 FORSCHUNGSBEITRAG UND AUFBAU DER ARBEIT	6
1.3 LITERATURANALYSE UND STAND DER WISSENSCHAFT	10
1.4 BESTÄTIGUNG DER FORSCHUNGSLÜCKE UND METHODIK.....	23
2. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN.....	27
2.1 HALBLEITER	29
2.2 EXTRATERRESTRICHE SONNENSTRAHLUNG	50
2.3 VERÄNDERUNG DES SONNENSPEKTRUMS IN DER ERDATMOSPHERE.....	53
2.4 GLOBALSTRAHLUNG.....	61
2.5 LICHTABSORPTION.....	67
3. SOLARZELLENTechnologien.....	77
3.1 DER PHOTOVOLTAISCHE EFFEKT	79
3.2 ÜBERBLICK DER VERSCHIEDENEN TECHNOLOGIEN.....	85
3.3 EVOLUTION DER KRISTALLINEN SILIZIUMSOLARZELLE.....	88
3.4 DÜNNsCHICHTZELLENTechnologie.....	117

4. PRODUKTION	149
4.1 GESCHICHTE DER PHOTOVOLTAIK.....	153
4.2 MÄRKTE FÜR PHOTOVOLTAIK.....	157
4.3 ANTEILE DER TECHNOLOGIEN.....	194
4.4 ABGRENZUNG DES WEITEREN UNTERSUCHUNGSRAHMENS	201
4.5 VOM SILIZIUMDIOXID ZUM KRISTALLINEN STANDARDSILIZIUMSOLARMODUL.....	206
4.6 KRITISCHE ROHSTOFFE	301
4.7 ÜBERSICHT PRODUZENTEN	311
5. RECYCLING	321
5.1 RELEVANTE EUROPÄISCHE GESETZGEBUNG UND NATIONALE GESETZLICHE RESTRIKTIONEN	326
5.2 PROGNOSE DES MÖGLICHEN ALTMODULAUFKOMMENS	369
5.3 TECHNOLOGISCHE ANSÄTZE UND ERPROBTE VERFAHREN.....	456
5.4 ÖKONOMISCHE ASPEKTE.....	510
5.5 KONSTRUKTIONSBEDINGTE BEEINFLUSSUNGEN DER ÖKONOMISCHEN ASPEKTE	611
5.6 OPTIMIERUNGSANSÄTZE DER BESCHAFFUNGSLOGISTIK.....	629
6. IDENTIFIZIERTE HERAUSFORDERUNGEN UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF	645
6.1 PROBLEMATIK DER ZEITVERSCHIEBUNG ZWISCHEN PRODUKTIONS- UND RECYCLINGTECHNOLOGIEN.....	647
6.2 PROBLEMATIK DER FEHLENDEN VOLUMINA.....	651
6.3 WEITERE IDENTIFIZIERTE HEMMNISFAKTOREN UND HERAUSFORDERUNGEN...	655
6.4 REGIONALER NUTZEN AUS DER ETABLIERUNG EINES RECYCLINGNETZWERKES	675
6.5 VOLKSWIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE.....	683
7. ZUSAMMENFASSENDE SCHLUSSBETRACHTUNGEN	691
LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	700
ANHANG	730

INHALTSVERZEICHNIS

TABELLENVERZEICHNIS	XXV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XXIX
ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS	XXXVII
VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND AKRONYME	XXXVII
Allgemeine Kürzel	XXXVII
Technischer oder physikalischer Charakter	XXXIX
Physikalische / technische Grundlagen.....	XXXIX
Zellen- und Modultechnologie.....	XXXIX
Verfahrenstechnischer Bezug	XL
Ökonomisch / wirtschaftliche Betrachtungen	XLI
Ökologischer Bezug	XLI
Rechtliche Aspekte.....	XLII
BETRACHTETE VERORDNUNGEN UND GESETZE	XLIII
SYMBOLVERZEICHNIS, INDIZES, KONSTANTEN UND GENUTZTE EINHEITEN	XLV
Physikalische Symbole und Formelzeichen.....	XLV
Symbole und Formelzeichen mit ökonomischen Bezug	XLVII
Allgemeine Indizes.....	L
Tiefgestellt	L
Hochgestellt	L
Konstanten.....	LI
Standardmäßig verwendete Einheiten.....	LI
VERZEICHNIS DER CHEMISCHEN ELEMENTE UND VERBINDUNGEN	LIII
1. EINFÜHRUNG	1
1.1 UNTERSUCHUNGSSCHWERPUNKTE	2
1.1.1 Technologische Grundlagen	3
1.1.2 Recycling unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten.....	4
1.1.3 Regionale Fragestellungen.....	5
1.2 FORSCHUNGSBEITRAG UND AUFBAU DER ARBEIT.....	6

1.3	LITERATURANALYSE UND STAND DER WISSENSCHAFT	10
1.3.1	Physikalische Grundlagen	10
1.3.2	Solarzellentechnologien	13
1.3.3	Modul- und Anlagentechnik.....	15
1.3.4	Produktionstechnologien.....	17
1.3.5	Recycling kristalliner Siliziumsolaraltmodule	19
1.3.6	Zusammenfassung und weitere Aspekte	21
1.4	BESTÄTIGUNG DER FORSCHUNGSLÜCKE UND METHODIK.....	23
2.	PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN.....	27
2.1	HALBLEITER	29
2.1.1	Bändermodell	30
2.1.2	Bereitstellung von Ladungsträgern in Halbleitern	33
2.1.2.1	Eigenleitung	33
2.1.2.2	Störstellenleitung	35
2.1.2.2.1	Störstellenleitung in n-dotierten Halbleitern	36
2.1.2.2.2	Störstellenleitung in p-dotierten Halbleitern	39
2.1.3	Ladungstransport.....	41
2.1.3.1	Feldströme.....	41
2.1.3.2	Diffusionsstrom.....	44
2.1.3.3	Gesamtstrom	45
2.1.4	pn-Übergang und Bildung der Raumladungszone	46
2.2	EXTRATERRESTRISCHE SONNENSTRAHLUNG	50
2.3	VERÄNDERUNG DES SONNENSPEKTRUMS IN DER ERDATMOSPHÄRE.....	53
2.3.1	Absorption in der Erdatmosphäre	53
2.3.2	Reflexion	55
2.3.3	Rayleigh-Streuung.....	55
2.3.4	Mie-Streuung.....	56
2.3.5	Gesamttextinktion	57
2.3.6	Air Mass	58
2.4	GLOBALSTRAHLUNG.....	61
2.4.1	Modell der Sonnen-Volllaststunden	64
2.4.2	Standardtestbedingungen	65
2.5	LICHTABSORPTION.....	67
2.5.1	Antireflexionsbeschichtungen	72
2.5.2	Photoeffekt	75

3. SOLARZELLENTechnologien	77
3.1 DER PHOTOVOLTAISCHE EFFEKT	79
3.2 ÜBERBLICK DER VERSCHIEDENEN TECHNOLOGIEN	85
3.3 EVOLUTION DER KRISTALLINEN SILIZIUMSOLARZELLE	88
3.3.1 Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1960er	88
3.3.2 Die frühe 1970er „violet cell“	91
3.3.3 Chemically textured non-reflecting „black cell“	93
3.3.4 Hocheffizienzzellen	98
3.3.4.1 Buried-Contact-Zelle	98
3.3.4.2 Rückkontaktzelle	99
3.3.4.3 PERL-Zelle	102
3.3.5 Betrachtungen zum Wirkungsgrad kristalliner Siliziumsolarzellen	106
3.3.5.1 Historische Entwicklung	106
3.3.5.2 Theoretische Begrenzung	108
3.4 DÜNNsCHICHTZELLENTechnologie	117
3.4.1 HIT-Zelle	117
3.4.2 Zellen aus amorphem Silizium	119
3.4.2.1 Eigenschaften amorphes Silizium	120
3.4.2.2 pin-Struktur	124
3.4.2.3 Stapelzellen (Tandem- und Tripelzellen)	128
3.4.2.4 Zellen aus mikrokristallinem Silizium	132
3.4.3 Cadmiumtelluridzellen	135
3.4.4 Zellen aus der Gruppe CIS/CIGS – Cu(In,Ga)Se ₂	140
3.4.5 Serienverschaltung	145
4. PRODUKTION	149
4.1 GESCHICHTE DER PHOTOVOLTAIK	153
4.1.1 Allgemeine historische Daten	153
4.1.2 Terrestrische Applikation	154
4.2 MÄRKTE FÜR PHOTOVOLTAIK	157
4.2.1 Globale Betrachtungen	157
4.2.2 Europäische Erhebungen	163
4.2.3 Besonderheiten des deutschen Marktes	168
4.2.4 Regionale Entwicklungen	176
4.2.5 Zusammenfassung der Marktentwicklung	192
4.3 ANTEILE DER TECHNOLOGIEN	194
4.4 ABGRENZUNG DES WEITEREN UNTERSUCHUNGSRAHMENS	201

4.5	VOM SILIZIUMDIOXID ZUM KRISTALLINEN STANDARDSILIZIUMSOLARMODUL	206
4.5.1	Vorbetrachtungen	206
4.5.1.1	Modulbestandteile und Konzeption	206
4.5.1.2	Allgemeine stoffliche Zusammensetzung Standardmodul	211
4.5.2	Siliziumaufreinigung und Ingoterstellung	216
4.5.2.1	Theoretische Grundlagen der Siliziumraffination	216
4.5.2.1.1	Carbothermische Reduktion – MGS-Qualität	216
4.5.2.1.2	Trichlorsilan und Siemensverfahren – EGS-Qualität	218
4.5.2.1.3	Weitere Verfahren – SGS- und UMG-Qualität	223
4.5.2.2	Grundlagen der Ingoterstellung	226
4.5.2.2.1	Monokristallines Silizium	226
4.5.2.2.2	Multikristallines Silizium	229
4.5.2.3	Stoffliche und energetische Betrachtungen zur Siliziumaufreinigung und Ingoterstellung	234
4.5.2.3.1	Siliziumaufreinigung	234
4.5.2.3.2	Ingoterstellung	238
4.5.2.3.3	CZ-Verfahren	240
4.5.2.3.4	Kokillengussverfahren	241
4.5.3	Waferfertigung	242
4.5.3.1	Theoretische Grundlagen	242
4.5.3.1.1	Ingotpräparation	242
4.5.3.1.2	Vereinzelung zu Wafern	244
4.5.3.2	Stoffliche und energetische Betrachtungen	249
4.5.4	Produktion kristalliner Siliziumsolarmodulen	251
4.5.4.1	Theoretische Grundlagen	251
4.5.4.2	Stoffliche und energetische Betrachtungen	268
4.5.5	Fertigung Standardsolarmodul	271
4.5.5.1	Theoretische Grundlagen	272
4.5.5.2	Stoffliche und energetische Betrachtungen	278
4.5.6	Zusammenfassende Betrachtungen zur Produktion von Standard-solarmodulen auf Basis der kristallinen Siliziumsolartechnologie	280
4.5.6.1	Stoffliche Zusammensetzung des definierten Standardsolarmoduls	287
4.5.6.2	Weitere Beziehungen zwischen der Produktion und der stofflichen Zusammensetzung eines Standardsolarmoduls	296
4.6	KRITISCHE ROHSTOFFE	301
4.6.1	Umwelteffekte und Gesundheitsgefährdungspotenziale	301
4.6.2	Verfügbarkeit und Importabhängigkeit	305
4.7	ÜBERSICHT PRODUZENTEN	311

5. RECYCLING	321
5.1 RELEVANTE EUROPÄISCHE GESETZGEBUNG UND NATIONALE GESETZLICHE RESTRIKTIONEN	326
5.1.1 Richtlinie 2008/98/EG und KrWG	327
5.1.2 WEEE2 und ElektroG2	336
5.1.3 RoHS und ElektroStoffV	364
5.1.4 Abfallverbringungsverordnung und -gesetz	365
5.1.5 Weitere relevante Gesetzestexte	367
5.2 PROGNOSE DES MÖGLICHEN ALTMODULAUFKOMMENS	369
5.2.1 Theoretische Grundlagen	370
5.2.1.1 Produktionsausschuss und -abfall	371
5.2.1.2 Abfallaufkommen kurz vor und während der Nutzungsphase	378
5.2.1.3 Altmodule am Ende der Nutzungsphase	406
5.2.2 Prognose der jährlichen Altmodulströme	412
5.2.2.1 Prozentuale Betrachtungen	412
5.2.2.2 Absolute Betrachtungen	416
5.2.2.3 Sensitivitätsanalyse ausgewählter Parameter	436
5.2.2.4 Regionale Betrachtungen	444
5.2.2.5 Weitere Empfehlungen und Effekte eines Bestands- respektive Recyclingpotenzialkataster	454
5.3 TECHNOLOGISCHE ANSÄTZE UND ERPROBTE VERFAHREN	456
5.3.1 Status quo des Recyclings kristalliner Siliziumsolarmodule	462
5.3.2 Recyclingverfahren der SolarWorld AG	464
5.3.3 Recyclingansatz nach Park <i>et al.</i> 2016	473
5.3.4 Recyclingansatz der Loser Chemie GmbH	474
5.3.5 Recyclingverfahren der LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG	475
5.3.6 Recyclingansatz der Accurec Recycling GmbH	478
5.3.7 Recyclingansatz der Saperatec GmbH	480
5.3.8 Weitere Recyclingverfahren und -ansätze	481
5.3.9 Zusammenfassende Betrachtungen der Recyclingverfahren und -ansätze	487
5.4 ÖKONOMISCHE ASPEKTE	510
5.4.1 Einführende Betrachtungen und Funktionsherleitung	511
5.4.2 Erlösseite	514
5.4.2.1 Marktpreise und resultierender Einzelerlös	515
5.4.2.2 Absatzmärkte Sekundärrohstoffe	522

5.4.3	Kostenseite	526
5.4.3.1	Verfahrenskosten	526
5.4.3.2	Sammel- und Transportkosten	535
5.4.4	Mengenspezifik	554
5.4.4.1	Weitergabe von Produktionsabfällen	555
5.4.4.2	Zweitmarkt	557
5.4.4.3	Kapazitäten der Recyclingaktivitäten	559
5.4.5	Übergreifende Betrachtungen.....	566
5.4.5.1	Statisches Modell	575
5.4.5.2	Dynamisches Modell.....	579
5.4.5.3	Nettogegegenwartswert	592
5.4.6	Ergebnisanalyse.....	607
5.5	KONSTRUKTIONSBEDINGTE BEEINFLUSSUNGEN DER ÖKONOMISCHEN ASPEKTE.....	611
5.5.1	Recyclingorientiertes Moduldesign.....	611
5.5.1.1	Einsatz von Zwischenfolien	613
5.5.1.2	Modifikation der Modulrahmung.....	613
5.5.1.3	Substitution des Verkapselungsmaterials.....	615
5.5.1.4	Regionalspezifische Modulkonzeption	616
5.5.2	Potenzielle Materialsubstitutionen und Reduktion spezifischer Ingredienzien	618
5.5.2.1	Zellen und Verbinder	618
5.5.2.2	Verkapselungsmaterial	624
5.5.2.3	Glas	625
5.5.3	Produkttypung	627
5.6	OPTIMIERUNGSANSÄTZE DER BESCHAFFUNGSLOGISTIK	629
5.6.1	Kurz- und mittelfristige Planungsphase	629
5.6.1.1	Sweep-Algorithmus	630
5.6.1.2	Savings-Verfahren	631
5.6.1.3	Zirkelmethode	632
5.6.1.4	Neuere Ansätze und weitere Aspekte	632
5.6.2	Langfristige Planungspahse.....	633
5.6.2.1	Erhöhung der Anlagenzahl.....	634
5.6.2.2	Integrierung einer Sortieranlage.....	636
5.6.2.3	Nutzung eines Zwischenlagers.....	637
5.6.2.4	Weitere Aspekte	639
5.6.3	Regionales Recyclingnetzwerk und sonstige Effekte	640

6. IDENTIFIZIERTE HERAUSFORDERUNGEN UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF	645
6.1 PROBLEMATIK DER ZEITVERSCHIEBUNG ZWISCHEN PRODUKTIONS- UND RECYCLINGTECHNOLOGIEN.....	647
6.2 PROBLEMATIK DER FEHLENDEN VOLUMINA.....	651
6.3 WEITERE IDENTIFIZIERTE HEMMNISFAKTOREN UND HERAUSFORDERUNGEN..	655
6.3.1 Rechtliche Ebene	655
6.3.1.1 Fehlende stoffliche Anreize.....	655
6.3.1.2 Erweiterte Kennzeichnung	657
6.3.1.3 Produktverantwortung	659
6.3.1.4 Sonstige Aspekte	661
6.3.2 Technische Ebene	662
6.3.2.1 Verfahrensinput	662
6.3.2.2 Verfahrenoutput	665
6.3.2.3 Sonstige Aspekte	667
6.3.3 Ökonomische Ebene	668
6.3.3.1 Nettogegenwartswert	668
6.3.3.2 Recyclingnetzwerk	671
6.3.3.3 Sonstige Aspekte	673
6.4 REGIONALER NUTZEN AUS DER ETABLIERUNG EINES RECYCLINGNETZWERKES	675
6.4.1 Stärkung des ostdeutschen PV-Produktionsclusters	678
6.4.2 Schaffung einer Rohstoffsenke durch gezielten Altmodulimport	680
6.5 VOLKSWIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE.....	683
7. ZUSAMMENFASSEND E SCHLUSSBETRACHTUNGEN.....	691
LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	700
KAPITEL 1	700
KAPITEL 2	703
KAPITEL 3	705
KAPITEL 4.....	709
KAPITEL 5	718
KAPITEL 6.....	728
ANHANG.....	730

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Bandabstände verschiedener Halbleiter in Elektronenvolt.	32
Tabelle 2-2: Eigenleitungsichte verschiedener Halbleiter bei 300 Kelvin.	34
Tabelle 2-3: Dotierung eines Siliziumkristalls mit Arsen und die Besetzung der Orbitale.	36
Tabelle 2-4: Abstand der Energieniveaus der Donatoren von der Unterkante des Leitungsbandes in eV.	37
Tabelle 2-5: Abstand der Energieniveaus der Akzeptoren von der Oberkante des Valenzbandes in eV.	40
Tabelle 2-6: Zuordnung Majorität- und Minoritätsträger in Abhängigkeit der Dotierung.	41
Tabelle 2-7: Wichtige Parameter des Systems Sonne – Erde.	51
Tabelle 2-8: Albedowerte in % für verschiedene Oberflächen.	55
Tabelle 2-9: Gegenüberstellung verschiedenen Halbleitermaterialien nach Art, Bandlücke und Absorptionskoeffizienten.	71
Tabelle 3-1: Wirkung des elektrischen Feldes an der Raumladungszone auf die Majoritäts- und Minoritätsträger.	80
Tabelle 3-2: Beitrag eines freien Elektrons zum photovoltaischen Effekt in Abhängigkeit vom Absorptionsort.	81
Tabelle 3-3: Beitrag eines Lochs zum photovoltaischen Effekt in Abhängigkeit vom Absorptionsort.	81
Tabelle 3-4: Diffusionslängen ausgewählter Halbleiter.	83
Tabelle 3-5: Geläufige Bezeichnungen verschiedener Dotierkonzentrationen.	86
Tabelle 3-6: Mittlere Reflexionsraten R für Silizium in Abhängigkeit der Oberflächenbehandlung.	95
Tabelle 3-7: Technische Errungenschaften zur Minderung der Verlustarten nach Abbildung 3-17, unter Zuordnung zum Zellenkonzept mit dem sie eingeführt wurden.	113
Tabelle 3-8: Versatzmaterialien für hydriertes amorphes Silizium.	124
Tabelle 3-9: Akzeptor- und Donatorartige Defektzustände, wobei die Energieniveaus für die Akzeptoren von der Valenzbandoberkante und für die Donatoren von der Leitungsbandunterkante in eV angegeben sind.	136
Tabelle 3-10: Prozessschritte der integrierten Serienerschaltung einer pin-Zelle in Superstratekonfiguration.	146
Tabelle 4-1: Die 10 globalen Zubaurekorde bis 2013.	159
Tabelle 4-2: Die 10 größten Märkte des jährlichen Kapazitätszubaues von 2010 bis 2013 im globalen Vergleich, Ländercode nach ISO 3166 Alpha-3 code.	159
Tabelle 4-3: Nationen mit kumulierter Kapazität von mindestens 1 GW _p	161
Tabelle 4-4: Neuinstallationen der Jahre 2012 und 2013 für innereuropäische Märkte mit einer kumulierten Kapazität von mehr als 1 GW _p im Jahr 2013.	166

Tabelle 4-5: Ziele der NREAPs der EU-Mitgliedsstaaten, die bis 2020 mindestens 1 GW _p kumulierte Leistung vorschreiben sowie deren kumulierte Kapazitäten 2013 und benötigte Zubauraten	167
Tabelle 4-6: Zeitraumabhängige relative Anteile installierter Kapazitäten an bundeslandspezifischen Gesamtkapazitäten mit Stand 2013.	181
Tabelle 4-7: Vergleich der jährlich neuinstallierten Kapazitäten in MW _p und Anlagenanzahlen der drei sächsischen Direktionsbezirke von 2009 bis 2013.	185
Tabelle 4-8: 2012 neu installierte Photovoltaikanlagen in der Stadt Leipzig samt 10 km Umland mit einer Einzelkapazität von mehr als 1 MW _p	186
Tabelle 4-9: Jährliche Neuinstallationen in MW _p und Stück der betrachteten Region für den Zeitraum 2009 bis 2013 sowie Angabe der kumulierten Kapazitäten und der Anlagenzahl Stand 2013.	190
Tabelle 4-10: Designvariablen kristalliner Siliziumsolarmodule.	212
Tabelle 4-11: Gemittelte Werte einzelner Komponenten in Massen-% eines einseitig verglasten Solarmoduls auf Basis kristalliner Siliziumsolarmodule.	213
Tabelle 4-12: Typische Verunreinigungen von MGS nach der carbothermischen Reduktion im Lichtbogenofen.	217
Tabelle 4-13: Fraktionen von Chlorsilanen mit Angabe der Siedetemperatur.	219
Tabelle 4-14: Vergleich der Mindestanforderungen an den Gehalt ausgewählter Elemente für die Solarindustrie und UMG.	225
Tabelle 4-15: Verwendbarkeit von Silizium in unterschiedlichen Industriezweigen in Abhängigkeit der Güteklassen nur aus technologischer Sicht sowie aus kombinierter technoökonomischer Sicht.	233
Tabelle 4-16: Die benötigten Stoff- und Energieströme in der MGS-Produktion.	234
Tabelle 4-17: Desiderate Stoff- und Energieströme in der Produktion von polykristallinem SGS mittels des modifizierten Siemensprozesses.	237
Tabelle 4-18: Stoff- und Energieströme in der Herstellung monokristalliner SGS-Ingots.	240
Tabelle 4-19: Stoff- und Energieströme in der Herstellung multikristalliner SGS-Ingots.	241
Tabelle 4-20: Parameter unterschiedlicher Spezifikationen des Multidrahtsägeprozesses.	247
Tabelle 4-21: Stoff- und Energieströme in der Herstellung kristalliner Siliziumrohwafer.	250
Tabelle 4-22: Stoff- und Energieströme in der Produktion kristalliner Standardsiliziumsolarmodule.	269
Tabelle 4-23: Bestandteile der Pasten für den Siebdruck der Kontakte monokristalliner und multikristalliner Standardsiliziumsolarmodule, sowie verwendete Menge der kontaktspezifischen Druckpaste.	270
Tabelle 4-24: Stoff- und Energieströme in der Fertigung kristalliner Standardsiliziumsolarmodule.	278
Tabelle 4-25: Zusammenfassende Übersicht aller benötigten Stoff- und Energieströme der einzelnen Fertigungsstufen von der MGS Herstellung bis zur Produktion einer Einheit des definierten Standardsolarmoduls sowie die Angabe der kumuliert benötigten Energie- und Stoffströme über alle Fertigungsstufen. (gerundete Werte)	281
Tabelle 4-26: Zusammenfassung aller Einzel- und kumulierten Produktionsmultiplikatoren der Surrogate der verschiedenen Fertigungsstufen in der Betrachtungsebene Silizium bezüglich einer Einheit des ausgewiesenen Endproduktes. (gerundete Werte)	285

Tabelle 4-27: Relevante Einzel- und kumulierten Inhaltsstoffmultiplikatoren der verschiedenen stoffspezifischen Einbringungsstufen in der Betrachtungsebene Silizium bezüglich einer Einheit $gSSM_{sc/mc}$288

Tabelle 4-28: Zusammenfassende Übersicht aller nach Art und Quantität in einem $gSSM_{sc/mc}$ enthaltenen, beziehungsweise in Abhängigkeit der Einbringungsstufe in ein $gSSM_{sc/mc}$ eingehende Erzeugnishauptstoffe und Erzeugnisnebenstoffe. (gerundete Werte)290

Tabelle 4-29: Zusammenfassende Übersicht der stoff- und stufenspezifischen Werte ME, MV, SE und SV sowie aller zu deren Berechnung benötigten Variablen für die Erzeugnishaupt- und Erzeugnisnebenstoffe sowie der relevanten Fertigungsstufen.299

Tabelle 4-30: Alle nach Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 kennzeichnungspflichtigen Repetierfaktoren zur Herstellung eines $gSSM_{sc/mc}$ mit den zugehörigen GHS-Piktogrammen. ..303

Tabelle 4-31: Zuordnung der Ausprägung des langfristigen Versorgungsrisikos der deutschen Wirtschaft (branchenübergreifend) mit für ein $gSSM_{msc/mc}$ produktionsrelevanten Rohstoffen verschiedener Studien.....309

Tabelle 4-32: Führende PV-Produzenten in Deutschland geordnet nach Fertigungsebene mit ihren jeweiligen Produktionskapazitäten für 2012 bis 2014 und den tatsächlich produzierten Mengen in den Jahren 2012 und 2013312

Tabelle 4-33: Führende PV-Produzenten des ostdeutschen PV-Produktionsclusters geordnet nach Fertigungsebene mit ihren jeweiligen Produktionskapazitäten für 2013 bis 2014 sowie der im Jahr 2013 tatsächlich produzierten Menge und der berechneten herstellereigenen Auslastung.317

Tabelle 5-1: Zusammengefasste und geordnete Übersicht der im Anhang V der RL 2012/19/EU aufgeführten Mindestzielvorgaben für die Verwertung jeweils der Gerätekategorie 4.....343

Tabelle 5-2: Zusammenfassung der betrachtungsrelevanten Obliegenheiten bezüglich des Inverkehrbringens, der Sammlung und Rücknahme sowie der Behandlungs- und Verwertungspflichten aller Akteure nach den Vorgaben des ElektroG2.362

Tabelle 5-3: Zusammenfassende Übersicht aller betrachtungsrelevanten Produktionsausschussraten in Prozent.377

Tabelle 5-4: Zusammenfassung aller für das Abfallaufkommen kurz vor und während der Nutzungsphase eines kristallinen Siliziumsolarmoduls geschätzten prozentualen Eintrittswahrscheinlichkeiten der zeitraumspezifischen Defektarten, die einen Austausch betroffener Module zeitigen.405

Tabelle 5-5: Datenbasis mit Bezugspunkt und Fortgang für die Diskussion der absoluten Abfallprognose.....417

Tabelle 5-6: Gegenüberstellung der Angaben aus [PV CYCLE 2016] und Abbildung 5-14.424

Tabelle 5-7: Zur Prognose der jährlichen Altmodulströme in der Beispielregion des ostdeutschen PV Produktionsclusters verwendete Postleitzahlengebiete.446

Tabelle 5-8: Zur Prognose der jährlichen Altmodulströme in der Beispielregion des Raumes Leipzig, Halle (Saale), Bitterfeld-Wolfen verwendete Postleitzahlengebiete.447

Tabelle 5-9: Aus dem Mittelwert der regionalen Abfallprognose sich ergebende Stoffströme der Einzelfractionen eines $gSSM_{alt}$ exemplarisch für die Region Sachsen samt Anrainer inklusive Berlin im Zeitraum ab 2013 und den folgenden 40 Jahren.....458

Tabelle 5-10: Ergebnisse des Recyclings der Chevetogeanlage470

Tabelle 5-11: Stärken und Schwächen der grundlegenden Verfahrensansätze zur Delaminierung kristalliner Siliziumsolarmodule.	489
Tabelle 5-12: Idealisertes maximales absolutes und prozentuales Einsparpotenzial im Falle einer Wiederverwendung des Glases, Aluminiumrahmens und der Wafer aus dem Recycling zur Wiederverwendung.	494
Tabelle 5-13: Idealisertes maximales absolutes und prozentuales Einsparpotenzial im Falle des Recyclings zur Verwertung und einer Wiederverwertung der Altzellen als SGS_p	502
Tabelle 5-14: Idealisertes maximales absolutes und prozentuales Einsparpotenzial im Falle des Recyclings zur Verwertung und einer Wiederverwertung der Altzellen als MGS.	504
Tabelle 5-15: Vergleich der idealisierten maximalen prozentualen Einsparpotenziale für die Wiederverwendung der Altzellen als kristalliner Siliziumrohwafer, deren Wiederverwertung als SGS_p und der Wiederverwertung als MGS mittels des Recyclingverfahrens der SolarWorld AG.	506
Tabelle 5-16: Einzelerlöse und potenzieller Gesamterlös aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ zur Verwendung.	517
Tabelle 5-17: Einzelerlöse und potenzieller Gesamterlös aus dem Recycling eines $gSSM_{alt}$ zur Verwertung.	520
Tabelle 5-18: Zusammenfassung adäquat verfügbarer Einzelwerte von Kosten für das Recycling kristalliner Siliziumsolarmodule inklusive Quelle, Umrechnung und Vergleichswerten.	528
Tabelle 5-19: Übersicht der potenziellen Standorte für die Standortoptimierung inklusive Kennzeichnung und Zuordnung zur Tabelle 4-33 sowie Angabe der Zugehörigkeit zur jeweiligen Knotenmenge.	540
Tabelle 5-20: Entfernungsmatrix aller Knoten der beiden Knotenmengen q und r in km.	542
Tabelle 5-21: Charakteristische Werte kristalliner Siliziumsolarmodule für verschiedene Regionalisierungen.	561
Tabelle 5-22: Auslastung beziehungsweise Anzahl potenzieller Recyclingaktivitäten in Abhängigkeit der regionalen Bezugsgrenzen und der zugrunde liegenden jährlichen Anlagenkapazität.	563
Tabelle 5-23: Sammel- und Transportkosten in € je Jahr für jeden potenziellen Recyclingstandort in Abhängigkeit der annualen Bezugsmenge und der Auslegung des Fuhrparks.	586
Tabelle 5-24: Abgezinsten Zahlungsströme in Einzelwerten für $r_K = 3\%$ bezogen auf das entsprechende Betriebsjahr für 20 Jahre.	597
Tabelle 5-25: Kapitalwert in Abhängigkeit der Laufzeit einer Investition in Höhe von 2.500.000 € bei einem Kalkulationszinssatz von $r_K = 3\%$ für 20 Jahre.	597
Tabelle 5-26: Kapitalwert in Abhängigkeit der Laufzeit bei einem Kalkulationszinssatz von $r_K = 3\%$ und variierender Investitionssumme exemplarisch für eine Betriebszeit von 15 Jahren.	598
Tabelle 5-27: Maximale Investitionssummen für einen positiven Nettogegenwartswert in Abhängigkeit des Kalkulationszinssatzes für den Fall der ewigen Rente sowie einer geplanten Laufzeit der Investition von 10 und 5 Jahren.	605

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Silizium in der vereinfachten Pauling-Schreibweise.	29
Abbildung 2-2: Energiebänder als elektromagnetische Wechselwirkung von n Energieniveaus.	30
Abbildung 2-3: Vereinfachte Darstellung der Energiebänder in einem Kristall.	31
Abbildung 2-4: Vereinfachte Darstellung der Energiebänder von Isolatoren, Halbleitern und Metallen.	32
Abbildung 2-5: Bandlücke von Ge, Si und GaAs als Funktion der Temperatur mit Wertetabelle.	33
Abbildung 2-6: Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit σ von sehr reinem (eigenleitenden) Ge und Si.	35
Abbildung 2-7: Eigenleitungskonzentration einiger Halbleiter als Funktion der Temperatur.	35
Abbildung 2-8: Arsendotierung eines Siliziumkristalls.	36
Abbildung 2-9: Vereinfachte Darstellung der Energiebänder bei einer n-Dotierung.	37
Abbildung 2-10: Ladungsträgerkonzentration Abhängigkeit der Temperatur.	38
Abbildung 2-11: Abhängigkeit der Leitfähigkeit σ von As-dotierten Si bei $T = 300 \text{ K}$ von der Arsenkonzentration N_D	38
Abbildung 2-12: Bordotierung eines Siliziumkristalls.	39
Abbildung 2-13: Vereinfachte Darstellung der Energiebänder bei einer p-Dotierung.	40
Abbildung 2-14: Temperaturabhängigkeit der Elektronen- und Löcherbeweglichkeit von Silizium für verschiedene Dotierkonzentrationen.	42
Abbildung 2-15: Bildung der Raumladungszone in einem pn-Übergang (Teil 1).	46
Abbildung 2-16: Bildung der Raumladungszone in einem pn-Übergang (Teil 2).	47
Abbildung 2-17: Unsymmetrische Ausdehnung der Raumladungszone infolge ungleicher Dotierungen des pn-Übergangs.	48
Abbildung 2-18: Erstes und zweites Keplersche Gesetz, nicht Maßstabsgetreu.	50
Abbildung 2-19: Extraterrestrisches Strahlungsspektrum und Spektrum eines schwarzen Strahlers einer Temperatur von 6.000 K	52
Abbildung 2-20: Hauptabsorptionsgase in der Erdatmosphäre mit den jeweiligen Absorptionswirkungen in Abhängigkeit der Wellenlänge und der Gesamtabsorptionswirkung.	54
Abbildung 2-21: Veränderung des extraterrestrischen Strahlungsspektrums beim Durchgang durch die Erdatmosphäre.	57
Abbildung 2-22: Abhängigkeit der Weglänge der solaren Strahlung durch die Erdatmosphäre vom Sonnenhöhenwinkel φ	59
Abbildung 2-23: Extinktionsintensität in Abhängigkeit des Sonnenhöhenwinkels.	60
Abbildung 2-24: Durchschnittlicher Jahresgang der Diffus-, der Direkt- und der Globalstrahlung an einem süddeutschen Standort.	61
Abbildung 2-25: Globalstrahlung in Deutschland als mittlere Monatssummen für März, Juli und November im Zeitraum 1981 bis 2010.	63

Abbildung 2-26: Jahressumme der Globalstrahlung für Deutschland im Jahr 2012	64
Abbildung 2-27: Direkte und indirekte Halbleiter im Bändermodell	68
Abbildung 2-28: Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Eindringtiefe nach dem Absorptionsgesetz	70
Abbildung 2-29: Materialspezifischer Absorptionskoeffizient in Abhängigkeit der Wellenlänge für verschiedenen Halbleiter	70
Abbildung 2-30: Reflexionsraten in Abhängigkeit der Wellenlänge für unbeschichtetes Silizium, eine Siliziumoxidbeschichtung und eine Beschichtung mit Siliziumnitrid.	74
Abbildung 3-1: Trennung des entstandenen Ladungsträgerpaares durch das in der Raumladungszone vorherrschende elektrische Feld.....	80
Abbildung 3-2: Lichtinduzierte Ladungsträgertrennung und die Anreicherung von Elektronen und Löchern in den jeweiligen Schichten.	82
Abbildung 3-3: Einteilung der Solarzellentechnologien.	85
Abbildung 3-4: Detailausschnitt des Aufbaus einer Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1960er.....	89
Abbildung 3-5: Lage der Störstellenenergieniveaus in Abhängigkeit des jeweiligen Fremdatoms in einem Siliziumkristall. Gefüllte Striche repräsentieren Donatorenlevel; hohle Striche Akzeptorenlevel. Level über der Mitte der Bandlücke geben die Differenz zum Leitungsband an, die unterhalb der Bandlückenmitte die Differenz zum Valenzband.	90
Abbildung 3-6: Detailausschnitt des Aufbaus einer Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1970er "violet cell".....	92
Abbildung 3-7: Rasterelektronenmikroskopaufnahme einer durch anisotropes Ätzen zufällig texturierten Zellenoberfläche. Abbildung aus [Szlufcik <i>et al.</i> 2003, S. 158].	93
Abbildung 3-8: Wirkung einer texturierten Zellenoberfläche auf den reflektierten Strahlungsanteil.	94
Abbildung 3-9: Light Trapping in einer texturierten Siliziumsolarzelle mit optischen Reflektor an der Zellenrückseite.	95
Abbildung 3-10: Detailausschnitt des Aufbaus einer chemically textured non-reflecting "black cell".	96
Abbildung 3-11: Detailausschnitt des Aufbaus einer Buried-Contact-Zelle.	98
Abbildung 3-12: Detailausschnitt des Aufbaus einer Rückkontaktzelle.	100
Abbildung 3-13: Detailausschnitt des Aufbaus einer PERL-Zelle.	102
Abbildung 3-14: Evolution des Wirkungsgrades kristalliner Siliziumsolarzellen im Labormaßstab unter Standardtestbedingungen bis Ende 2014.....	108
Abbildung 3-15: ASTM G173-03 Referenzspektrum inklusive der Darstellung des durch die Technologie der kristallinen Siliziumsolarzellen nutzbaren Anteils, der Transmissions- und Thermalisierungsverluste sowie der materialspezifischen Grenzwellenlänge.	109
Abbildung 3-16: Theoretische Wirkungsgradgrenzen verschiedener Halbleiter.....	110
Abbildung 3-17: Übersicht der Mechanismen in der kristallinen Siliziumsolartechnologie, die eine Reduktion des Wirkungsgrades zeitigen.	111
Abbildung 3-18: Gegenüberstellung der Detailausschnitte des Aufbaus der Standardsiliziumsolarzelle der frühen 1960er und der PERL-Zelle.	116

Abbildung 3-19: Gegenüberstellung des dreidimensionalen und des zweidimensionalen Detailausschnittes des Aufbaus einer HIT-Zelle.....	117
Abbildung 3-20: Zweidimensionale Darstellung der Atomstruktur von einkristallinem Silizium und hydriertem amorphem Silizium mit Kennzeichnung einer Mikropore und SiH ₂ -Konfigurationen.	121
Abbildung 3-21: Zweidimensionaler Detailausschnitt des Aufbaus einer Standardeinschicht-a-Si:H-Zelle als pin-Struktur in Superstratekonfiguration.	125
Abbildung 3-22: Zweidimensionaler Detailausschnitt einer Superstrate Tandemzelle.....	129
Abbildung 3-23: Zweidimensionaler Detailausschnitt einer a-Si:H / a-SiGe:H / a-SiGe:H Tripelzelle als Substratekonfiguration in nip-Struktur.....	130
Abbildung 3-24: Externe Quanteneffizienz der Tripelzelle aus Abbildung 3-23 Die einzelnen Zellen sind für die jeweiligen Wellenlängen ausgelegt.....	131
Abbildung 3-25: Kristallisationsformen während des PECVD-Verfahrens in Abhängigkeit des Wasserstoffverdünnungsverhältnisses bei einem typischen Druck von 2 bis 3 mmHg und einer Plasmaanregungsfrequenz von 13,56 MHz.....	132
Abbildung 3-26: Links: Zweidimensionaler Detailausschnitt einer mikromorphen Tandemzelle. Rechts: Abbildung mittels eines Mikroelektronenmikroskops	134
Abbildung 3-27: Zweidimensionaler Detailausschnitt einer Cadmiumtellurid-Superstratzelle inklusive einer REM-Bruchkantenaufnahme der Schichtstruktur.....	136
Abbildung 3-28: Darstellung der Schnittstelle zwischen CdTe- und CdS-Schicht entlang der [1120]-Zonenachse mittels hochauflösender Transmissionselektronenmikroskopie. Links: mit Gitterfehlpassungen. Rechts: ohne Gitterfehlpassungen	138
Abbildung 3-29: Effizienzen von CdTe-Zellen mit verschiedenen Rückkontaktierungen direkt nach der Fertigung und infolge einer Erhitzung auf 200 °C.....	139
Abbildung 3-30: Bandlücken verschiedener Legierungen der Chalkopyrite und zugehörige Gitterkonstante.....	141
Abbildung 3-31: Zweidimensionaler Detailausschnitt einer Standard-ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se ₂ -Zelle inklusive einer REM-Bruchkantenaufnahme der Schichtstruktur.....	142
Abbildung 3-32: Degradationsverhalten von Modulen der CIGS-Gruppe mit verschiedenen Verkapselungstechniken	145
Abbildung 4-1: Globale Neuinstallationen von 2000 bis 2013 in MW _p / MO: Mittlerer Osten.....	157
Abbildung 4-2: Vergleich der Gesamtmarktanteile 2011 bis 2013 in %.....	158
Abbildung 4-3: Globale kumulierte Kapazitäten von 2000 bis 2013 in MW _p / MO: Mittlerer Osten....	160
Abbildung 4-4: Chancen der Photovoltaik in den Staaten des Sonnengürtels.	162
Abbildung 4-5: Kumulierte und neuinstallierte Kapazitäten der EU-27-Staaten im Jahr 2012 in MW _p . Orange Zahlen: kumulierte Kapazitäten bis einschließlich 2012 / blaue Zahlen: Neuinstallationen 2012.	165
Abbildung 4-6: Deutschlandweite Neuinstallationen in MW _p von 1990 bis 1999 mit Standardabweichungen	169
Abbildung 4-7: Deutschlandweite Neuinstallationen in MW _p von 1990 bis 2013 mit relativen und absoluten Standardabweichungen und Detailausschnitt für die Jahre 1990 bis 1999.	173

Abbildung 4-8: Kumulierte Kapazitäten in Deutschland von 1990 bis 2013 in MW _p mit relativen und absoluten Standardabweichungen und Detailausschnitt für die Jahre 1990 bis 2001.....	174
Abbildung 4-9: Bundeslandspezifische jährliche Neuinstallationen in MW der Jahre 2011 bis 2013....	178
Abbildung 4-10: Prozentuale Anteile der bundeslandspezifischen jährlichen Neuinstallationen an den gesamtdeutschen jährlichen Neuinstallationen der Jahre 2011 bis 2013 in %. Werte berechnet aus Daten der Abbildung 4-9.	178
Abbildung 4-11: oben: Anteile der Bundesländer an national installierter Gesamtkapazität der Jahre 2001, 2008 und 2013. / unten: kumulierte Kapazitäten je Bundesland der Jahre 2001, 2008 und 2013.....	180
Abbildung 4-12: Geographische Verteilung der infolge des 1.000-Dächer-Programmes installierten 150 sächsischen PV-Anlagen.	183
Abbildung 4-13: Darstellung der für die regionale Betrachtung relevanten Gebiete.	189
Abbildung 4-14: Technologieanteile von kristallinem Siliziumzellen und Dünnschichtzellen am Markt nach Jahren zwischen 1999 und 2012.	197
Abbildung 4-15: Nationaler jährlicher Kapazitätszubau gesamt und nach Technologieanteil in MW _p zwischen 1999 und 2012.	197
Abbildung 4-16: Analyse der Kosteneffizienz der verschiedenen Technologiepfade. I: kristallines Silizium / II: Dünnschichttechnologie ohne Stapelzellen / III: Neuer Konzepte inklusive Stapelzellen.	200
Abbildung 4-17: Marktanteile innerhalb der Klasse der kristallinen Siliziumtechnologie exklusive HIT-Zellentechnologie.	203
Abbildung 4-18: Jährlich neuinstallierte Kapazitäten reduziert auf die mono- und multikristalline Siliziumtechnologie für Deutschland und Sachsen samt deutschseitiger Anrainer (inklusive Berlin). / a: Schätzung des Marktanteils von bandgezogenem Silizium auf Basis der vorangegangenen Jahre zu 0,5 %.	204
Abbildung 4-19: Schematische Darstellung eines Solarmoduls mit 36 kristallinen Siliziumsolarzellen und einer partiellen Verschattung.	207
Abbildung 4-20: Querschnitt eines Glas-Folien-Moduls auf Basis kristalliner Siliziumsolarzellen. Abbildung nicht Maßstabsgetreu.....	209
Abbildung 4-21: Teilverschattung eines Solarmoduls durch falsch ausgelegten Aluminiumrahmen.	210
Abbildung 4-22: Lichtbogenofen zur carbothermischen Reduktion von Siliziumdioxid zu elementarem Silizium.....	216
Abbildung 4-23: Effizienz von Solarzellen in Abhängigkeit der Konzentration spezifischer Verunreinigungen.	218
Abbildung 4-24: Schema der Gewinnung von hochreinem Trichlorsilan mit zwei Rektifizier-Kolonnen bei 20 °C und 40 °C.....	220
Abbildung 4-25: Siedediagramm der Chlorsilane und Erzeugung von hochreinem Trichlorsilan SiHCl ₃ (TCS) mit zwei Rektifizier-Kolonnen bei 20 °C und 40 °C. rot: Output / blau: Input.	220
Abbildung 4-26: Schematischer Aufbau eines typischen Siemensreaktors.	221
Abbildung 4-27: Schematischer Aufbau eines typischen Wirbelschichtreaktors für die Herstellung von polykristallinen Siliziumgranulat.	224
Abbildung 4-28: Impfkristall im CZ-Verfahren und Auslaufen der Kristallstörungen infolge des dünnen Kristallhalses.	227

Abbildung 4-29: Herstellungsverfahren für monokristalline Siliziumstäbe. links: CZ-Verfahren / rechts: FZ-Verfahren.....	229
Abbildung 4-30: Kokillengussverfahren zur Herstellung multikristalliner Ingots. links: Kokillengussverfahren / rechts: Struktur multikristalline Zufallsordnung und kolumnar erstarrte Ordnung.	230
Abbildung 4-31: Übersicht der verschiedenen Siliziumklassen nach Reinheit und Kristallqualität sowie der zugehörigen Produktionsrouten.	231
Abbildung 4-32: Grobe Einordnung der Herstellungskosten der verschiedenen Siliziumgüteklassen. ..	232
Abbildung 4-33: Gesamte Polysiliziumproduktion der Jahre 2007 und 2011 prozentual nach Technologie.	235
Abbildung 4-34: SGS-Herstellung ohne STC-Recycling.....	236
Abbildung 4-35: SGS-Herstellung mit prozessinternem Recycling.....	237
Abbildung 4-36: Betrachtungsrelevante Produktionsrouten für monokristallines und multikristallines SGS.	239
Abbildung 4-37: Kennzeichnung monokristalliner Ingots mittels Flats.....	242
Abbildung 4-38: Pseudoquadratische Form monokristalliner Ingots mit Kennzeichnung der Nenngröße.....	242
Abbildung 4-39: Prozessabfolge der Waferfertigung von der Ingotpräparation bis zum Rohwafer.	243
Abbildung 4-40: Schema der Wafervereinzelnung mittels einer Multidrahtsäge.	245
Abbildung 4-41: Topologie der Schnittoberfläche eines unbehandelten Wafers.	248
Abbildung 4-42: Typische Sequenz der Herstellung einer Standardsiliziumsolarzelle aus einem kristallinen Siliziumrohwafer.....	252
Abbildung 4-43: Prinzipskizze des Batchprozesses zur Emittiererzeugung in einem p-dotierten kristallinen Siliziumwafer durch den Einsatz von POCl_3 im Innenraum eines horizontalen Quarzrohrofens.	255
Abbildung 4-44: Schema der Erzeugung eines selektiven Emitters durch Siebdruck einer phosphorhaltigen Paste und unterschiedlicher Diffusionsraten aus der Paste und der Gasphase.	256
Abbildung 4-45: Schritte des Siebdruckverfahrens zur Erzeugung der Front- und Rückkontakte einer Standardsiliziumsolarzelle.	260
Abbildung 4-46: Beispielhafte Rückansicht einer monokristallinen Siliziumsolarzelle nach dem Siebdruck der Rückkontakte.	262
Abbildung 4-47: Beispielhafte Frontkontaktarchitektur nach dem Siebdruckverfahren mit Detailausschnitt der Sammelschienen und der Kontaktfinger.	263
Abbildung 4-48: Produktionssequenz Standardmodul aus kristallinen Siliziumsolarzellen.	273
Abbildung 4-49: Grundprinzip der Verschaltung von 28 Solarzellen zu 2 Teilstrings mit 2 Bypassdioden.	275
Abbildung 4-50: Stoffspezifische Massenanteile in einem $\text{gSSM}_{\text{sc/me}}$ unterteilt in Inhaltsstoffe mit einem Anteil von mehr als 1 Massen-% und von weniger als 1 Massen-%.....	294
Abbildung 4-51: Lokalisierung der führenden nationalen PV-Produzenten der Siliziumsurrogate nach Tabelle 4-32.....	314

Abbildung 5-1: Symbol zur Kennzeichnung von Elektro- und Elektronikgeräten nach Anhang IX der RL 2012/19/EU.	346
Abbildung 5-2: Bräunliche Verfärbung von Zellenrändern infolge unsauberer Produktionsschritte.	382
Abbildung 5-3: Druck auf die überstehende Kante des Aluminiumrahmens durch Schneelast in Abhängigkeit des Installationswinkels α	384
Abbildung 5-4: Prozentuale Verteilung der spezifischen Defektarten, die einen Modulaustausch im Zeitraum bis zwei Jahre nach der Anlageninstallation zeitigen.	392
Abbildung 5-5: Prozentuale Verteilung der spezifischen Defektarten, die einen Modulaustausch im Zeitraum zwischen zwei und zehn Jahren nach der Anlageninstallation zeitigen.	393
Abbildung 5-6: Prozentuale Verteilung der spezifischen Defektarten, die einen Modulaustausch nach bis zu 4,9 Jahren nach der Anlageninstallation zeitigen.	394
Abbildung 5-7: Defekte an 272 Photovoltaikmodulen nach über 15 Jahren Betriebszeit.	395
Abbildung 5-8: Jährliche Durchfallquoten kristalliner Siliziumsolarmodule durch die Prüfsequenz nach IEC 61215 für die Jahre 2007 bis 2013.	397
Abbildung 5-9: Absterbekurven (Weibullverteilungen) nach Formel 5-1 für kristalline Siliziumsolarmodule unterteilt in die Installationszeiträume bis Ende 2012 und ab 2013 inklusive der zugrunde liegenden Form- und Lageparameter sowie der sich jeweils ergebenden annuellen Absterbewahrscheinlichkeiten.	410
Abbildung 5-10: Jährliche Defekt- beziehungsweise Ausfallraten kristalliner Siliziumsolarmodule nach den einzelnen Lebensabschnitten beginnend mit dem Transport und der Anlageninstallation bis hin zum Erreichen des technischen Lebensendes für Module, die bis Ende 2012 installiert wurden.	413
Abbildung 5-11: Korrigierte jährliche Abfallraten kristalliner Siliziumsolarmodule über die gesamte Nutzungsdauer (inklusive Transport- und Installationsschäden) getrennt für installierte Module bis Ende 2012 und ab 2013.	414
Abbildung 5-12: Korrigierte Absterbekurven über die gesamte Nutzungsdauer kristalliner Siliziumsolarmodule beginnend mit dem Transport der Module und der Anlageninstallation bis zum Erreichen des technischen Lebensendes für Installationen bis Ende 2012 und ab 2013.	416
Abbildung 5-13: Technologiebereinigte jährliche Neuinstallationen und Schatteninstallationen von 1990 bis 2070.	419
Abbildung 5-14: Prognose absoluter Abfallströme aus Altmodulen für Deutschland.	422
Abbildung 5-15: Gegenüberstellung des berechneten Abfallstroms; des Anteils an Transportschäden, Installationsschäden und der Kinderkrankheiten; sowie der jährlichen Neuinstallationen für Deutschland zwischen 2000 und 2015.	426
Abbildung 5-16: Auswirkung der annuellen Neuinstallationen (inklusive Schatteninstallationen) in Form jährlich anfallender Altmodule in Deutschland als Farbcodierung der Einzelbeiträge.	428
Abbildung 5-17: Darstellung der für Deutschland initial berechneten Prognose absoluter annueller Altmodulströme zusammen mit zwei Prognosevariationen infolge der Parametermodifikation und den daraus resultierenden Konfidenzintervallen für den langfristigen Planungshorizont ab dem Jahr 2028.	441
Abbildung 5-18: Prognose jährlicher Altmodulströme für die drei Beispielregionen Sachsen samt deutschseitiger Anrainer; ostdeutsches PV-Produktionscluster sowie den Raum Leipzig, Halle (Saale) und Bitterfeld-Wolfen.	449

Abbildung 5-19: Prognose jährlicher Altmodulströme für die Bundesländer Sachsen und Thüringen.....	451
Abbildung 5-20: Grobschema des Recyclingverfahrens der SolarWorld AG.....	465
Abbildung 5-21: Grobschema des Recyclingverfahrens der LOBBE Industrieservice GmbH & Co. KG.....	476
Abbildung 5-22: Grobschema des Recyclingverfahrens der Accurec Recycling GmbH.....	479
Abbildung 5-23: Marktpreis multikristalline Siliziumsolarrohwafer zwischen 01.05.2013 und 28.12.2016.	518
Abbildung 5-24: Marktpreis polykristallines SGS zwischen 01.01.2014 und 01.12.2016.....	521
Abbildung 5-25: Darstellung der kalkulierten Wertepaare von aktivitätsspezifischen Verfahrenskosten in [€/a] und zugehörigem Arbeitspunkt in [t/a] sowie der beiden ermittelten Näherungsfunktionen.....	531
Abbildung 5-26: Darstellung der kalkulierten Wertepaare von aktivitätsspezifischen Verfahrenskosten als Stückkosten in [€/t] und dem zugehörigen Arbeitspunkt in [t/a] sowie der beiden angepassten Näherungsfunktionen.	532
Abbildung 5-27: In den aufgeführten Quellen angegebene Schätzungen zu Mindestkapazitäten für einen rentablen Betrieb eines Recyclingverfahrens für kristalline Siliziumsolaraltmodule.	533
Abbildung 5-28: Kartographische Darstellung der betrachtungsrelevanten Region des ostdeutschen PV-Produktionsclusters samt Autobahn- und Bundesstraßennetz und Lokalisierung der potenziellen Recyclingstandorte der Knotenmenge r.....	541
Abbildung 5-29: Summe der knotenspezifisch benötigten Transportleistungen in Tonnenkilometern und Kennzeichnung der optimalen Standorte für die definierten Rahmenbedingungen.	543
Abbildung 5-30: Gegenüberstellung der knotenspezifisch benötigten Gesamttransportleistungen in Tonnenkilometern für die Ausgangssituation und beide Modifikationen.	545
Abbildung 5-31: Abhängigkeit der tatsächlich zurückzulegenden Gesamtstrecke in Kilometern von der Ausgestaltung des Fuhrparks in Form der Wahl der zulässigen Nutzlast der Transportfahrzeuge.	546
Abbildung 5-32: Exemplarische Kosten der Beschaffungslogistik bei Auslagerung für eine Bandbreite an Frachtkosten zwischen 2,00 und 2,50 € je Fahrzeugkilometer für die definierten Rahmenbedingungen.	550
Abbildung 5-33: Graphische Darstellung der Verfahrenskosten als abhängige Variable vom Funktionsargument der erzielbaren Erlöse auf Basis der Gewinnschwellermittlung.	570
Abbildung 5-34: Graphische Darstellung der Verfahrenskosten als abhängige Variable vom Funktionsargument der Kostenrubrik Sammel- und Transportkosten auf Basis der Gewinnschwellermittlung.	572
Abbildung 5-35: Darstellung der Gewinnschwelle für die statische Problemstellung mit Kennzeichnung der Ausgangslage und der Variation einzelner Parameter in Anlehnung an Abbildung 5-34.....	576
Abbildung 5-36: Maximale allgemeine Transportkosten in Abhängigkeit der annuellen Bezugsmenge kristalliner Siliziumsolaraltmodule zur Erreichung des Break-even nach Formel 5-13.....	580
Abbildung 5-37: Graphische Darstellung der von der Bezugsmenge x abhängigen Sammel- und Transportkostenfunktionen für die definierten Rahmenbedingungen und einen Fuhrpark mit Fahrzeugen von 5,5 Tonnen sowie 28 Tonnen zulässiger Nutzlast.	587

Abbildung 5-38: Darstellung der Einzeltermen der Formel 5-16 im kartesischen Koordinatensystem inklusiver der Gesamtkostenkurve für die definierten Systemgrenzen.	589
Abbildung 5-39: Detailausschnitt Abbildung 5-38 für $0 \leq x \leq 1.000$ Tonnen je Jahr.	590
Abbildung 5-40: Gewinn und Verlust in Abhängigkeit der Bezugsmenge x nach Formel 5-17.	591
Abbildung 5-41: Kapitalwert in Abhängigkeit der Laufzeit bei einem Kalkulationszinssatz von $r_K = 3\%$ und variierender Investitionssumme dargestellt mittels Interpolation der Werte aus Tabelle 5-26.	598
Abbildung 5-42: Break-even der Kapitalwerte nach Laufzeit der Investition für verschiedene Kalkulationszinssätze in Abhängigkeit der Investitionshöhe.	600
Abbildung 5-43: Break-even der Kapitalwerte aller drei Szenarien in Abhängigkeit der initialen Investitionssumme und des Kalkulationszinssatzes.	603
Abbildung 5-44: Konsolidierung der Haupttransportströme über Zwischenlager.	637
Abbildung 5-45: Konsolidierung der Transportleistung und Verteilung der regionalen Altmodulaufkommen mittels eines Zentrallagers oder zentralen Sortierbetriebes.	638
Abbildung 5-46: Konsolidierung der Transportleistung und Verteilung der regionalen Altmodulaufkommen über Nabe-Speiche Netzwerke.	638

ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

Die nachstehenden drei Abkürzungen sind gesondert aufgeführt, da sie die zentralen Begrifflichkeiten der vorliegenden Arbeit darstellen.

gSSM	geprüftes kristallines Standardsiliziumsolarmodul, produziert nach der im Anhang 4-11 definierten Fertigungssequenz
gSSM_{alt}	geprüftes kristallines Standardsiliziumsolarmodul, produziert nach der im Anhang 4-11 definierten Fertigungssequenz, dem die Abfalleigenschaft obliegt
PV	Photovoltaik

Allgemeine Kürzel

AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Japan)
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNL	Brookhaven National Laboratory
BSW	Bundesverband Solarwirtschaft e.V.
CABRISS-Projekt	Implementation of a CirculAr economy Based on Recycled, reused and recovered Indium, Silicon and Silver materials for photovoltaic and other applications - Projekt
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (Französisches Commissariat für Atomenergie und alternative Energien)
CSR	Corporate Social Responsibility
Cu-PV-Projekt	Cradle-to-Cradle sustainable PV modules Projekt
Czech RE Agency	Tschechische Agentur für erneuerbare Energien
DGS	Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
EU	Europäische Union
Fraunhofer ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

Fraunhofer THM	Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien
FRELP-Projekt	Full Recovery End-of-Life Photovoltaic Projekt
HHI	Herfindahl-Hirschman-Index
IDW	Institut der Wirtschaftsprüfer
IEA PVPS	International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme
IEA	International Energy Agency
IMEC	Interuniversity Microelectronics Centre
ITRI	Industrial Technology Research Institute (taiwanische Non-Profit Forschungseinrichtung)
Kap.	Kapazität
KfW	Deutsche Kreditanstalt für Wiederaufbau
kum.	kumuliert
LCD	Flüssigkristallanzeige
LKW	Lastkraftwagen
MO	Mittlerer Osten
örE	öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger
ProgRess	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
PV MOREDE	Photovoltaic Panels Mobile recycling Device
RCA	Radio Corporation of America
SSV	Stazione Sperimentale del Vetro
stiftung ear	stiftung elektro-altgeräte register
TU	Technische Universität
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UNSW	University of New South Wales
WGI	Worldwide Governance Indicators
ZKS-Abfall	Zentrale Koordinierungsstelle Abfall
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung

Technischer oder physikalischer Charakter

Physikalische / technische Grundlagen

AM	Air Mass
AM0	extraterrestrisches Strahlungsspektrum
AM1	senkrechte Einstrahlung kürzester Weg der Strahlung durch Erdatmosphäre
AM1,5	durchschnittliches Jahresspektrum bei 45° nördlicher Breite
AM2	doppelter Weg der Strahlung durch die Erdatmosphäre
ASTM G173-03	American Society for Testing and Materials Terrestrial Reference Spectra for Photovoltaic Performance Evaluation
BOS	Balance of System
DHT	Damp Heat Test (englisch für Feuchte-Hitze-Test)
LID	Lichtinduzierte Degradation
PID	Potenzialinduzierte Degradation
RLZ	Raumladungszone
STC	Standard Test Conditions
SWE	Staebler-Wronski-Effekt
TPO	thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis
TPS	thermoplastische Stärke
UV	ultraviolette Strahlung

Zellen- und Modultechnologie

a-Si	amorphes Silizium
a-Si:H	hydriertes amorphes Silizium
a-SiC:H	mit Kohlenstoff versetztes hydriertes amorphes Silizium
a-SiGe:H	mit Germanium versetztes hydriertes amorphes Silizium
a-SiN:H	mit Stickstoff versetztes hydriertes amorphes Silizium
a-SiO:H	mit Sauerstoff versetztes hydriertes amorphes Silizium
BCC	Buried-Contact-Cell
BPD	Bypassdiode
BSF	Back-Surface-Field
CIGS	Technologie der Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid-Solarmodule
CIS	Technologie der Kupfer-Indium-Diselenid-Solarmodule
c-Si	kristallines Silizium

EGS	electronic grade Silicon
EWTF	Emitter Wrap Through
FSF	Front-Surface-Field
HIT-Zelle	Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer Zelle
IBC-Zelle	Interdigitated Back Contact Zelle
INSECT	Inline Selective Emitter Concept
LBSF	local back surface field
LGBC-Zelle	Laser Grooved Buried Contact Zelle
MGS	metallurgisches Silizium
MINP-Zelle	metal-insulator-NP junction-Zelle
MWA	Emitter Wrap Around
MWT	Metallisation Wrap Through
n-Schicht	n-dotierte Schicht negativ dotierte Schicht
p-Schicht	p-dotierte Schicht positiv dotierte Schicht
PERL-Zelle	passivated emitter, rear locally-diffused-Zelle
SGS	solar grade Silicon
TCO	Transparent Conducting Oxide (transparente Elektrode aus leitendem Oxid)
UMG	upgraded metallurgical grade Silicon
μc-Si	mikrokristallines Silizium
μc-Si:H	hydriertes mikrokristallines Silizium

Verfahrenstechnischer Bezug

CZ-Verfahren	Czochralskiverfahren
FBR	Wirbelschichtreaktor
FZ-Verfahren	Zonenziehverfahren (engl: Floating Zone)
HDR	hochdisperse Kieselsäure
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition (chemische Gasphasenabscheidung unter Niederdruck)
PECVD	plasma-enhanced chemical vapour deposition (plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung)
PSG	Phosphorsilikatglas
SC-1 / SC-2	Standard Clean 1 / Standard Clean 2 (Reinigungsschritte)
VHF	very high frequency plasma deposition

Ökonomisch / wirtschaftliche Betrachtungen

CLP	Covering-Location Problem
EIM	stufenspezifischer Einzelinhaltsstoffmultiplikator
EPM	stufenspezifischer Einzelproduktionsmultiplikator
FTL	Full Truck Load
kIM	stufenspezifischer kumulierter Inhaltsstoffmultiplikator
Knotenmenge b	Gesamtheit der Altmodulbezugs-knoten (Übergabestellen)
Knotenmenge q	Gesamtheit der betrachtungsrelevanten Modulproduzentenstandorte
Knotenmenge r	Gesamtheit der potenziellen Recyclingstandorte
kPM	stufenspezifischer kumulierter Produktionsmultiplikator
KW	Kapitalwert
M1, ..., M13	Standorte Modulproduzenten
MCLP	Maximal-Covering-Location Problem
NPV	Net Present Value
R1, ..., R21	potenzielle Standorte einer Recyclingaktivität
TSP	Traveling Salesman Problem (Problem des Handlungsreisenden)

Ökologischer Bezug

ADF	Abiotic Depletion Factor (Erschöpfung abiotischer Ressourcen)
AP	Acidification Potential (Versauerungspotenzial)
CML	Centrum voor Milieukunde der Universität Leiden
ECA	Ecological Classification Factor for Aquatic Ecosystems (aquatische Ökotoxizität)
ECT	Ecological Classification Factor for Terrestrial Ecosystems (terrestrische Ökotoxizität)
EMAS	Eco- Management and Audit Scheme
EPS	Environmental priority strategy
GWP	Global warming potential (Treibhausgaspotenzial)
HC	Human Toxicological Classification Factor (Humantoxizität)
KEA	kumulierter Energieaufwand
MIPS	Material-Inputs pro Serviceeinheit
NP	Nitrification Potential (Eutrophierungspotenzial)

ODP	Ozon Depletion Potential (stratosphärisches Ozonabbaupotenzial)
SE	Schadschöpfungseinheiten
SPI	Sustainable Process Index
UBP	Umweltbelastungspunkte

Rechtliche Aspekte

AEUV	Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union
BefErIV	Beförderungserlaubnisverordnung
EEA	Elektro- und Elektronik-Altgeräte
EEG	Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (kurz: Erneuerbare-Energien-Gesetz)
ElektroGGebV	Elektro- und Elektronikgerätegesetz-Gebührenverordnung
EN	Europäische Norm
GHS	Global harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien
H-Sätze	Gefahrenhinweise im Rahmen des global harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien
IEC	Norm der "International Electrotechnical Commission"
IP-Zertifizierung	Zertifizierung nach den „International Protection Codes“
NREAP	National Renewable Energy Action Plan
P-Sätze	Sicherheitshinweise im Rahmen des global harmonisierten Systems zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien
REACH	Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe

Betrachtete Verordnungen und Gesetze

AbfAEV - Verordnung über das Anzeige- und Erlaubnisverfahren für Sammler, Beförderer, Händler und Makler von Abfällen vom 05. Dezember 2013

AbfVerbrG - Gesetz zur Ausführung der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Juni 2006 über die Verbringung von Abfällen 1) und des Basler Übereinkommens vom 22. März 1989 über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung 2)

BruchgV - Verordnung (EU) Nr. 1179/2012 der Kommission vom 10. Dezember 2012 mit Kriterien zur Festlegung, wann bestimmte Arten von Bruchglas gemäß der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates nicht mehr als Abfall anzusehen sind

ElektroG2 - Gesetz zur Neuordnung des Rechts über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG) vom 20. Oktober 2015

ElektroStoffV - Verordnung zur Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten vom 19. April 2013

KrWG - Gesetz zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts vom 24. Februar 2012

NachwV - Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen vom 20. Oktober 2006

REACH - Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission

Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien

Richtlinie 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt

RoHS2 - Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (Neufassung)

Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006

VVA - Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Juni 2006 über die Verbringung von Abfällen

WEEE2 - Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik Altgeräte (Neufassung)

Symbolverzeichnis, Indizes, Konstanten und genutzte Einheiten

Physikalische Symbole und Formelzeichen

Symbol	Definition	primär verw. Einheiten
A	Fläche / Querschnitt	m ² , km ²
a	Ganzzahlige Laufvariable	-
c	Lichtgeschwindigkeit im stofflichen Medium	m/s
D	Diffusionskoeffizient	cm ² /s, m ² /s
d	Schichtdicke	nm, μm
d_{AR}	Schichtdicke Antireflexionsschicht	nm
dc/dx	Konzentrationsgradient	mol/m ⁴
E_A	Akzeptorenniveau	eV
E_D	Donatorniveau	eV
E_F	Elektrische Feldstärke	V/cm, V/m
E_L	Energieniveau untere Leitungsbandkante	eV
E_{PH}	Energie eines Photons	eV
E_V	Energieniveau obere Valenzbandkante	eV
E₁, ..., E_n	Energetische Zustände	eV
ΔE_G	Energiedifferenz zwischen Leitungs- und Valenzband	eV
f	Frequenz	Hz
F_{Dot}	Dotierkonzentration	Anzahl/Anzahl
\vec{F}_G	Gewichtskraft	N
\vec{F}_H	Hangabtriebskraft	N
\vec{F}_N	Normalkraft	N
g	Reelle Laufvariable	-
I	Strahlungsintensität	W/m ²
j	Diffusionsstromdichte	m ⁻² s ⁻¹
j_F	Feldstromdichte	A/m ²
L	Diffusionslänge	μm
l	Länge / Ausdehnung	mm, cm, m, km
M	Molare Masse	g/mol
m	Masse	μg, g, kg, t
m_{Bor}	Benötigte Masse Bor für die Dotierung	mg
m_{Dot}	Zu dotierende Masse	kg

Symbol	Definition	primär verw. Einheiten
N	Anzahl freie Elektronen	Anzahl
n	Dichte Elektronen	cm ⁻³
\dot{N}	Stoffstrom	kmol/s
N_A	Dichte Akzeptoratome	cm ⁻³
n_A	Anzahl Atome	Anzahl
N_B	Anzahl Boratome	Anzahl
N_C	Zustandsdichte Leitungsband	cm ⁻³
N_D	Dichte Donoratome	cm ⁻³
n_i	Intrinsische Leitfähigkeit	cm ⁻³
N_{Si}	Anzahl Siliziumatome je Kubikzentimeter	Anzahl/cm ³
N_{Si,Dot}	Anzahl Siliziumatome der zu dotierenden Masse	Anzahl
N_V	Zustandsdichte Valenzband	cm ⁻³
n₀	Brechungsindex Luft	-
n₁	Brechungsindex Antireflexionsschicht	-
n₂	Brechungsindex Halbleitermaterial	-
p	Dichte Defektelektronen	cm ⁻³
p_L	Luftdruck	mbar
P_s	Abgestrahlte Leistung der Sonne	W
Δp	Impuls	(kg·m)/s
q	Elementarladung	C
R	Reflexionsrate, reflektierter Anteil der Strahlung	%
r	Radius	km
R_H	Wasserstoffverdünnungsverhältnis	-
T	Temperatur	K oder °C
t	Zeit / Zeitpunkt / Zeitspanne / Betriebszeit	μs, s, a
U	Spannung	V
U_D	Diffusionsspannung	V
V	Volumen	m ³ , cm ³
v_L	Leitungsgeschwindigkeit	cm/s
v_{Mittel,E}	Mittlere Bahngeschwindigkeit der Erde	km/s
w	für photovoltaischen Effekt nutzbare Fläche	mm
W_A	Austrittsarbeit	eV
W_{RLZ}	Gesamtausdehnung Raumladungszone	μm
Δw	Nicht für photovoltaischen Effekt nutzbare Fläche	mm
x	Allgemeine Variable	-

Symbol	Definition	primär verw. Einheit
α	Winkel (Einfallswinkel)	°
α_{Abs}	Stoffspezifischer Absorptionskoeffizient	cm ⁻¹
α_i	Installationswinkel	°
β	Winkel (Ausfallswinkel)	°
η_{ext}	Externer Quantenwirkungsgrad	Anzahl/Anzahl
λ	Wellenlänge	nm, μm
λ_G	Materialspezifische Grenzwellenlänge	μm
μ	Beweglichkeit Ladungsträger	cm ² /(V·s)
ρ	Dichte	g/cm ³
ρ_B	Dichte Bor	g/cm ³
ρ_{Si}	Dichte Silizium	g/cm ³
σ	Leitfähigkeit	$\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$, $\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
τ	Ladungsträgerlebensdauer	μs
φ	Sonnenhöhenwinkel	°

Symbole und Formelzeichen mit ökonomischen Bezug

Symbol	Definition	primär verw. Einheit
a	Ganzzahlige Laufvariable	-
b	Formparameter Weibullverteilung allgemein	-
b₁	Formparameter der Weibullverteilung von Modulen, die vor 2013 installiert wurden	-
b₂	Formparameter der Weibullverteilung von Modulen, die ab 2013 installiert wurden und werden	-
f	Stufenindikator	-
F_a	Abwertungsfaktor der Bezugsmenge	-
g	Reelle Laufvariable	-
I_i	Vermarktungsfähige Outputfraktionen aus dem Recycling	-
I₀	Initiale Investitionssumme	€
GV	aktueller Gewinn oder Verlust	€

Symbol	Definition	primär verw. Einheit
$K_{g,m}$	Analagenkapazität, die beim ausgewiesenen Altmodulaufkommen im geschlossenen Definitionsbereich (Maximalbereich) gesichert ausgelastet werden kann	t/a
K_r	Altmodulaufkommen als Reserve zum risikofreien oder gesicherten Wert	t/a
K_{rf}	Analagenkapazität, die beim ausgewiesenen Altmodulaufkommen risikofrei ausgelastet werden kann	t/a
$K_{rf,m}$	Analagenkapazität, die beim ausgewiesenen Altmodulaufkommen im geschlossenen Definitionsbereich (Maximalbereich) risikofrei ausgelastet werden kann	t/a
K_{80}	Altmodulaufkommen zur kurzfristigen Auslastung von 80 % der aktivitätsspezifischen vorgehaltenen Recyclingkapazitäten	t/a
KW	Kapitalwert	€
ME	Stoffspezifische Materialeffizienz	%
MV	Stoffspezifischer Materialverlust	%
N_{Tr}	Nutzlast Transportfahrzeug	t
P_i	Marktpreise der vermarktungsfähigen Outputfraktionen aus dem Recycling	€/Einheit
P_1, \dots, P_n	Punkte im kartesischen Koordinatensystem / Arbeitspunkt einer potenziellen Recyclingaktivität	-
r_K	Kalkulationszinssatz	%
S_E	Sicherheitsfaktor	-
SE	Stufeneffizienz	%
SK	gesamte Kosten aus der Rubrik der sonstigen Kosten	€
Sk	Stückkosten der Rubrik der sonstigen Kosten	€/Stk
SSF	Stoffspezifischer Stufenfaktor	-
SV	Stufenverlust	%
S_1, \dots, S_n	Schnittpunkte / Funktionsargumente	-
t	Zeit / Zeitpunkt / Zeitspanne / Betriebszeit	s, h, a
T_f	Festgelegte Zeitspanne	a
t_i	Bezugsjahr als Differenz aus Installationszeitpunkt und Betriebsjahr	a
TL	Lageparameter Weibullverteilung allgemein	-

Symbol	Definition	primär verw. Einheit
t_{Start}	Startjahr als Bezugszeitpunkt	-
t_v	verschobene Lebensdauer	a
T_1	Lageparameter der Weibullverteilung von Modulen, die vor 2013 installiert wurden	-
T_2	Lageparameter der Weibullverteilung von Modulen, die ab 2013 installiert wurden und werden	-
TK	gesamte Kosten aus der Rubrik der Sammel- und Transportkosten	€
Tk	Stückkosten der Rubrik der Sammel- und Transportkosten	€
TK_G	Sammel- und Transportgrenzkosten zur Erreichung der Gewinnschwelle bei geringem Erlösniveau	€
$TK_{G,i}$	Maximale Sammel- und Transportkosten zur Erreichung der Gewinnschwelle bei geringem Erlösniveau und veränderten Verfahrenskosten	€
TK_M	Maximale Sammel- und Transportkosten zur Erreichung der Gewinnschwelle bei gegebenen Rahmenbedingungen	€
VK	gesamte Kosten aus der Rubrik der Verfahrenskosten	€
Vk	Stückkosten der Rubrik der Verfahrenskosten	€/Stk
VK_G	Grenzverfahrenskosten zur Erreichung der Gewinnschwelle bei geringem Erlösniveau	€
$VK_{G,i}$	Maximale Verfahrenskosten zur Erreichung der Gewinnschwelle bei geringem Erlösniveau und veränderten Sammel- und Transportkosten	€
$VK_{S_4,i}$	Grenzverfahrenskosten zur Erreichung der Gewinnschwelle bei gegebenen Argument S_4 und festgelegten Sammel- und Transportkosten	€
W_1, \dots, W_n	Wertepaare aus verfügbarem Altmodulstrom und Sammel- und Transportkosten	-
x	Anzahl recycelter Altmodule / Bezugsmenge	Anzahl, Stk

Allgemeine Indizes

Tiefgestellt

E	Erde
f	Stufenindikator
fix	fix (fixe Kosten)
fl	flüssig
G	Gesamt
gas	gasförmig
i	Laufvariable
M	Maximum / maximal
mc	multikristallin
Mittel	Durchschnitt
mod	modifiziert
N	Normal / Normalsituation
n	Elektron
O	Oberfläche
opt	optimal
p	polykristallin
R	Rein
r	Reserve
RLZ	Raumladungszone
S	Sonne
sc	monokristallin
SGS	solar grade silicon
t	Bezugszeitpunkt
u	Defektelektron
v	variabel
VN	Verwendung (verfahrenstechnischer Ansatz des Recyclings)
VR	Verwertung (verfahrenstechnischer Ansatz des Recyclings)
Wafer	Wafer
0	Start / Initiierung
2013 oder sonstige Jahreszahlen	Bezugsjahr

Hochgestellt

[M1], ..., [Mn]	Kennzeichnungslogik identifizierter Mängel aus der Literatur mit Bezug zum nachfolgenden Text
------------------------	---

Konstanten

AE	Astronomische Einheit: 149.597.870.700 m
c₀	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum: $2,9979 \cdot 10^8$ m/s
e	Eulersche Zahl: 2,71828182846
E_S	Solarkonstante: 1367,17 W/m ²
h	Planck'sches Wirkungsquantum: $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s
k	Boltzmannkonstante: 8,617 eV/K
N_{Av}	Avogadrokonstante: $6,022136 \cdot 10^{23}$ mol ⁻¹
q	Elementarladung: $1,602 \cdot 10^{-19}$ C

Standardmäßig verwendete Einheiten

LE – Längeneinheiten

nm	Nanometer:	10⁻⁹ m
µm	Mikrometer:	10⁻⁶ m
mm	Millimeter:	10⁻³ m
m	Meter:	10⁰ m (Basis)
km	Kilometer:	10³ m

FE – Flächeneinheiten

nm²	Quadratnanometer:	10⁻¹⁸ m²
µm²	Quadratmikrometer:	10⁻¹² m²
mm²	Quadratmillimeter:	10⁻⁶ m²
m²	Quadratmeter:	10⁰ m² (Basis)
km²	Quadratkilometer:	10⁶ m²

VE – Volumeneinheiten

nm³	Nanometer:	10⁻²⁷ m³
µm³	Mikrometer:	10⁻¹⁸ m³
mm³	Millimeter:	10⁻⁹ m³
m³	Meter:	10⁰ m³ (Basis)
km³	Kilometer:	10⁹ m³

GE – Gewichtseinheiten

ng	Nanogramm:	10⁻⁹ g
µg	Mikrogramm:	10⁻⁶ g
mg	Milligramm:	10⁻³ g
g	Gramm:	10⁰ g (Basis)
kg	Kilogramm:	10³ g
t	Tonne:	10⁶ g

ZE – Zeiteinheiten

ns	Nanosekunden:	10^{-9} s
μs	Mikrosekunden:	10^{-6} s
ms	Millisekunden:	10^{-3} s
s	Sekunden:	10^0 s (Basis)
min	Minuten:	$6 \cdot 10^1$ s (60 s)
h	Stunden:	$6^2 \cdot 10^2$ s (3.600 s)
d	Tage	$4 \cdot 6^3 \cdot 10^2$ s (86.400 s)
a	Jahre	$146 \cdot 6^3 \cdot 10^3$ s (31.536 · 10 ³ s)

PE – Prozeenteinheiten

%	Prozent
Gew.-%	Gewichtsprozent
Ma-%	Massenprozent
Vol-%	Volumenprozent

ME – Mengeneinheiten

Anzahl	Gesamtzahl, Menge, Quantität eines Betrachtungsgegenstandes
Stk	Stückzahl, abgezählte Menge
mol	Stoffmenge, Teilchenäquivalente

EE – Elektrische Einheiten

A	Ampere	
C	Coulomb	[A·s]
eV	Elektronenvolt	[kg·m ² ·s ⁻²]
Hz	Hertz	[1/s]
J	Joule	[kg·m ² ·s ⁻²]
S	Siemens	[A ² ·s ³ ·kg ⁻¹ ·m ⁻²]
V	Volt	[kg·m ² ·A ⁻¹ ·s ⁻³]
W	Watt	[kg·m ² ·s ⁻³]
Wh	Wattstunde	[3600·kg·m ² ·s ⁻²]
W_p	Watt peak	[kg·m ² ·s ⁻³]
Ω	Ohm	[kg·m ² ·A ⁻² ·s ⁻³]

WE – Währungseinheiten

DM	Deutsche Mark
\$	Amerikanische Dollar
€	Euro

SE – Sonstige Einheiten

bar	Bar (Druck)
K	Kelvin
N	Newton
°C	Grad Celcius
°	Grad (Winkelmaß)

Verzeichnis der chemischen Elemente und Verbindungen

Ag - Co

Ag	Silber
AgNO₃	Silbernitrat
Al	Aluminium
AlCl₃	Aluminiumchlorid
AlMg₃	Aluminium-Magnesium-Legierung mit 3 % Magnesiumanteil
As	Arsen
AsH₃	Arsin
Au	Gold
B	Bor
B₂H₆	Diboran
BCl₃	Bortrichlorid
Br	Brom
C	Kohlenstoff
C₂H₄O₂	Essigsäure
C₃H₈O	Isopropanol
C₇H₁₆O₃	Dipropylglycolmethylether (DPM)
Ca	Kalzium
CaCl₂	Kalziumchlorid
CaTiO₃	Kalziumtitanat
Cd	Cadmium
CdCl₂	Cadmiumchlorid
CdS	Cadmiumsulfid
CdSe	Cadmiumselenid
CdTe	Cadmiumtellurid
CF₄	Tetrafluormethan
CH₄	Methan
CH₄O₃S	Methansulfonsäure
Cl	Chlor
Co	Cobalt

CO - I

CO	Kohlenstoffmonoxid
CO₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cd₂SnO₄	Cadmiumzinnoxid (CTO)
Cu	Kupfer
CuAlSi₂	Kupferaluminiumdisulfid
CuAlSe₂	Kupferaluminiumdiselenid
CuFeS₂	Kupferkies
CuGaSe₂	Kupfergalliumdiselenid
CuInS₂	Roquesit
CuInSe₂	Kupferindiumdiselenid
EVA	Ethylenvinylacetat
F	Fluor
Fe	Eisen
FeCl₂	Eisen(II)-chlorid
Ga	Gallium
GaAs	Galliumarsenid
GaP	Galliumphosphid
Ge	Germanium
H₂	molekularer Wasserstoff
H₂O	Wasser
H₂O₂	Wasserstoffperoxid
H₃PO₄	Phosphorsäure
HCl	Salzsäure
HF	Flusssäure / Fluorwasserstoff
HgCdTe	Quecksilber-Cadmium-Tellurid
HNO₃	Salpetersäure
I	Iod

In - Sb

In	Indium
In₂S₃	Indiumsulfid
InAs	Indiumarsenid
InP	Indiumphosphid
InSb	Indiumantimonid
ITO	Indium-Zinn-Oxid
KOH	Kaliumhydroxid
Li	Lithium
MgF₂	Magnesiumfluorid
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
MoSe₂	Molybdändiselenid
N₂	molekularer Stickstoff
N₂O	Distickstoffmonoxid
Na	Natrium
Na₂S	Natriumsulfid
Na₂Se	Natriumselenid
NaF	Natriumfluorid
NaOH	Natriumhydroxid
Nb	Niob
NH₃	Ammoniak
Ni	Nickel
O	Sauerstoff
O₂	molekularer Sauerstoff
O₃	Ozon
P	Phosphor
Pb	Blei
PCl₃	Phosphortrichlorid
PEG	Polyethylenglycol
PET	Polyethylenterephthalat
PH₃	Phosphin
POCl₃	Phosphoroxychlorid
PVB	Polyvinylbutyral
S	Schwefel
Sb	Antimon

Sb₂Te₃ - Zn₂SnO₄

Sb₂Te₃	Antimontritellurid
Se	Selen
SF₆	Schwefelhexafluorid
Si	Silizium
Si₃N₄	Siliziumnitrid
SiC	Siliziumcarbid
SiCl₄	Siliziumtetrachlorid (STC)
SiF₄	Siliziumtetrafluorid
SiH₂Cl₂	Dichlorsilan (DCS)
SiH₃Cl	Monochlorsilan (MCS)
SiH₄	Monosilan (MS)
SiHCl₃	Trichlorsilan (TCS)
SiO	Siliziumoxid
SiO₂	Siliziumdioxid
Sn	Zinn
Ta	Tantal
Ta₂O₅	Tantalpentoxid
Te	Tellur
TEG	Triethylenglycol
Ti	Titan
TiO₂	Titandioxid
V	Vanadium
W	Wolfram
ZnIn₂Se₄	Zinkindiumselenid
ZnO	Zinkoxid
ZnS	Zinksulfid
ZnSe	Zinkselenid
Zr	Zirkonium
Zn₂SnO₄	Zinkzinnoxid (ZTO)