



Hochschule **RheinMain**
University of Applied Sciences
Wiesbaden Rüsselsheim

Fachbereich Ingenieurwissenschaften

Studiengang Umwelttechnik

BACHELORARBEIT

**Aktueller Stand und Ausblick zur Erfassung, Wiederverwendung
und Verwertung von Photovoltaikanlagen**

Name: Roswitha Hoffmann

Matrikelnummer: 1106110

Referent/-in: Prof. Dr. Ursula Katharina Deister

Korreferent/-in: Dipl.- Ing. (FH) Volker Kummer

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben.

Zunächst gebührt mein Dank Frau Prof. Dr. Ursula Katharina Deister und Herrn Dipl. – Ing. (FH) Volker Kummer, die meine Bachelorarbeit betreut haben. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit bin ich ihnen außerordentlich verbunden.

Mein Dank gilt außerdem allen Befragten der verschiedenen Unternehmen. Sowohl ihre Auskunftsbereitschaft als auch ihre interessanten Beiträge und Antworten auf meine Fragen trugen maßgeblich zum Gelingen der Arbeit bei.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Krause (HME Hamburger Müllentsorgung Rohstoffverwertungsgesellschaft mbH), Herrn Fislake (Reiling Glas Recycling GmbH & Co. KG) und Herrn Staudt-Fischbach (First Solar GmbH).

Auch bei meiner Familie und meinem Freund möchte ich mich sehr für die konsequente Unterstützung und den liebevollen Rückhalt bedanken.

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst habe.

Die aus den fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Texte, Gedankengänge, Konzepte usw. in meinen Ausführungen habe ich als solche eindeutig gekennzeichnet und mit vollständigen Verweisen auf die jeweilige Urheberschaft und Quelle versehen.

Alle weiteren Inhalte wie Textteile, Abbildungen, Tabellen etc. ohne entsprechende Verweise stammen im urheberrechtlichen Sinn von mir.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder im In- noch Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mir ist bekannt, dass ein Täuschungsversuch vorliegt, wenn sich eine der vorstehenden Versicherungen als unrichtig erweist.

Bodenheim, 18.09.2022 

Ort, Datum und Unterschrift Verfasserin

Vorwort

Im Rahmen des gemeinsamen Projektes der Hochschule RheinMain mit dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) soll der Status Quo der Erfassung, Wiederverwendung und der Verwertung von Photovoltaikanlagen betrachtet, Hemmnisse ermittelt und die verschiedenen Optimierungspotenziale aufgezeigt werden.

Die Aufgabenstellung wurde in einem dreimonatigen Zeitrahmen vom 20.06.2022 bis 19.09.2022 bearbeitet.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Versicherung	II
Vorwort	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XII
Zusammenfassung	1
1 Einleitung und Motivation	2
2 Aktuelle Situation und Grundlagen zur Photovoltaik	4
2.1 Aktuelle Situation und Prognosen	4
2.2 Stoffliche Zusammensetzung von Photovoltaikanlagen	7
2.2.1 Aufbau kristalliner siliziumbasierter Module	7
2.2.2 Aufbau Dünnschichtmodule	8
2.2.3 Kritische Rohstoffe	10
2.2.4 Potenzielle Schadstoffe	12
2.3 Funktionsweise von Photovoltaikmodulen	12
2.4 Rechtliche Grundlagen	13
2.4.1 Waste of Electrical and Electronic Equipment	13
2.4.2 Kreislaufwirtschaftsgesetz	13
2.4.3 Elektro- und Elektronikgerätegesetz	15
2.4.4 CENELEC - Normen	16
2.4.5 Behandlungsverordnung für Elektro- und Elektronik-Altgeräte	16
2.4.6 Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall	17
3 Erfassung von Photovoltaikaltmodulen	18
3.1 Gründe für die Entsorgung von Photovoltaikmodulen	18
3.2 Marktstammdatenregister	19
3.3 Rücknahmemöglichkeiten	19
3.3.1 Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger	19

3.3.2	Vertreiber und Gewerbetreibende	20
3.3.3	Hersteller/Bevollmächtigte und Dritte	20
3.3.4	Erstbehandlungsanlagen	21
3.4	Lagerung und Transport	22
3.5	Sammelmengen	25
3.5.1	Berichterstattung und zur Erstbehandlung angenommene Mengen.....	25
3.5.2	Umfrage an die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger in Hessen.....	28
3.5.3	Erfasste Mengen in Hessen.....	29
4	Wiederverwendung von Photovoltaikmodulen.....	30
4.1	Wiederverwendung in der Praxis	31
4.2	Vorbereitung zur Wiederverwendung nach ElektroG und LAGA	32
4.3	Vorbereitung zur Wiederverwendung in der Praxis	33
4.3.1	Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger in Hessen	33
4.3.2	Erstbehandlungsanlage - HME Hamburger Müllentsorgung Rohstoffverwertungsgesellschaft mbH.....	33
4.3.3	Weitere Erstbehandlungsanlagen und andere	34
4.4	Abweichende Abfallmengen und Exporte ins Ausland	35
5	Technische Möglichkeiten zur Rohstoffrückgewinnung.....	37
5.1	Stand der Technik und Anforderungen an eine adäquate Behandlung	38
5.1.1	Rechtliche Vorgaben	38
5.1.2	Behandlungsanforderungen und Motivation.....	39
5.2	Aufbereitungstechniken	44
5.3	Technische Verfahren aus der Praxis	47
5.3.1	Erstbehandlungsanlage - Reiling Glas Recycling GmbH & Co. KG.....	47
5.3.2	Technologieunternehmen - FLAXRES GmbH.....	48
5.3.3	Erstbehandlungsanlage - First Solar GmbH.....	49
5.3.4	Weitere Aufbereitungsverfahren	50
5.3.5	Überblick	52
6	Forschungsprojekte	54
6.1	Projekte	54
6.1.1	ReSi-Norm.....	54
6.1.2	ReProSolar.....	54

6.1.3	PHOTORAMA	54
6.2	Ältere Forschungsprojekte	55
6.2.1	NICE-Technologie	55
6.2.2	Gemeinsame Aufbereitung verschiedener PV-Modultechnologien.....	55
7	Hemmnisse	57
7.1	Erfassung	57
7.1.1	Sammelquote und Rückgabemöglichkeiten	57
7.1.2	Transport und Lagerung	58
7.2	Vorbereitung zur Wiederverwendung.....	59
7.3	Behandlungsverfahren.....	60
7.3.1	Rohstoffrückgewinnung	61
7.3.2	Rechtliche Vorgaben	62
7.3.3	Bau spezialisierter PV-Recyclinganlagen.....	62
8	Optimierungspotenziale	64
8.1	Erfassung	64
8.1.1	Sammelquote und Rücknahmemöglichkeiten	64
8.1.2	Transport und Lagerung	65
8.2	Vorbereitung zur Wiederverwendung.....	66
8.3	Recycling.....	67
8.3.1	Rohstoffrückgewinnung	67
8.3.2	Rechtliche Vorgaben	68
8.3.3	Design for Recycling.....	68
9	Fazit und Ausblick	70
	Literaturverzeichnis.....	XIII
	Anhang	XXVI

Abkürzungsverzeichnis

µm	Mikrometer
a	Jahr
Abs.	Absatz
Ag	Silber
AHK	Abholkoordination
Al	Aluminium
AP	Acidification Potential; Einheit [kg SO ₂ -Äq.]
a-Si	Amorphes Silizium
b2b	business to business
b2c	business to consumer
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
Be	Beryllium
BMUV	Bundesumweltministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BstatG	Bundesstatistikgesetz
BSW	Bundesverband Solarwirtschaft e.V.
Cd	Cadmium
CdTe	Cadmium-Tellurid
CELENEC	(französisch: Comité Européen de Normalisation Électrotechnique) Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
CIS	Kupfer-Indium-Diselenid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
c-Si	Kristallines Silizium
Destatis	Statistisches Bundesamt
DfR	Design for Recycling
EAG	Elektro- und Elektronikaltgeräte
EAG-BehandV	Behandlungsverordnung für Elektro- und Elektronikaltgeräte

EBA	Erstbehandlungsanlage
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ElektroG	Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz)
EoL	End-of-Life
EoL-RIR	End-of-Life-Recycling-Einsatzquote
EP	Eutrophication Potential; Einheit [kg Phosphat-Äq.]
ER	Eigenrücknahme
EU	Europäische Union
EVA	Ethylvinylacetat
F	Fluor
FE-Metalle	Eisenhaltige Metalle
Fraunhofer ISE	Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme
Ga	Gallium
Ge	Germanium
GW _p	Gigawattpeak
GWP	Global Warming Potential; Einheit [kg CO ₂ -Äq.]
HEPA-Filter	High Efficient Particulate Air-Filter
HME	HME Hamburger Müllentsorgung Rohstoffverwertungsgesellschaft mbH
IEA PVPS	International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme
In	Indium
IRENA	International Energy Agency
KOM	EU-Kommission
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kW _p	Kilowattpeak
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
MaStR	Marktstammdatenregister
mg	Milligramm
Mio.	Million
NE-Metalle	Nichteisenhaltige Metalle

Opt	Optierung
örE	öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger
Pb	Blei
PED, n. ern.	Primary Energy Demand from Non-renewable Energy Sources; Referenzeinheit [Megajoule]
PERC	Passivated Emitter and Rear Contact
PET	Polyethylenterephthalat
PIB	Polyisobutylene
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential oder auch photochemical oxidation potential; Einheit [kg Ethen-Äq.]
ppm	Parts per million, 1 ppm = 0,0001 %
ProgRess	Ressourcenschutzeffizienzprogramm
PV	Photovoltaik
PVB	Polyvinylbutyral
PVF	Polyvinylfluorid
S.	Satz
Sb	Antimon
Se	Selen
SG	Sammelgruppe
Si	Silizium
stiftung ear	stiftung elektro-altgeräte register
t	Tonnen
TCO	transparent conductive oxide
TPE	Standardtransporteinheiten
UBA	Umweltbundesamt
UStatG	Umweltstatistikgesetz
VzWv	Vorbereitung zur Wiederverwendung
WEEE	Waste of Electrical and Electronic Equipment
Wiederverwendung _{AA}	Wiederverwendung außerhalb des Abfallregimes
Wiederverwendung _{IA}	Wiederverwendung innerhalb des Abfallregimes
W _p	Wattpeak
Zn	Zinn

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: PV-Technologien, angelehnt an Benedek et al. (2014).....	4
Abbildung 2: Berechnete Abfallmengen an PV-Altmodulen für Deutschland von 2016 bis 2050 nach IRENA (2016), zitiert (und übersetzt) nach Heitmann (2017).....	5
Abbildung 3: Abfallpotenzial von PV-Altmodulen im Jahr 2020, angelehnt an Sander et al. 2018	6
Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines PV-Moduls auf Basis von c-Si (Kernbaum und Hübner 2013)	8
Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines PV-Moduls auf Basis von CdTe (Kernbaum und Hübner 2013)	9
Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung der Rücknahmewege von PV-Altmodulen nach ElektroG, eigene Darstellung	22
Abbildung 7: Bei EBA angenommene PV-Modulmengen und deren Herkunft, eigene Darstellung nach Destatis (2022b).....	27
Abbildung 8: Verwertungswege der gesammelten PV-Altmodule, eigene Darstellung nach Destatis (2022b)	28
Abbildung 9: Erfasste Mengen bei örE in Hessen für die Jahre 2018 bis 2021	29
Abbildung 10: Abgrenzung der Wiederverwendung innerhalb und außerhalb des Abfallregimes, eigene Darstellung, angelehnt an Schomerus et al. (2014)	31
Abbildung 11: PV-Technologie-Anteile von 1998 bis 2020, eigene Darstellung nach Sander et al. (2016), Anteile der c-Si-Module ergänzt durch Wolf et al. (2017).....	37
Abbildung 12: Bauteile und Werkstoffe verschiedener PV-Module und die möglichen enthaltenen Wertstoffe, angelehnt an Rechenberg et al. (2019)	39
Abbildung 13: Wertbezogene Betrachtung der Rohstoffinhalte eines c-Si-Moduls nach Raithel (2014), zitiert nach (und angelehnt an) IRENA (2016)	40
Abbildung 14: Ergebnisse des c-Si PV-Modulrecyclings, relative Darstellung, abgeändert nach Hengstler et al. (2021)	42
Abbildung 15: Wirkungsabschätzung des CdTe-PV-Modulrecyclings nach Hengstler et al. (2021).....	43

Abbildung 16: Recyclingprozesse für PV-Module nach Tao und Yu (2015), übersetzt von Dirr (2016)	44
Abbildung 17: Verwendete Prozesse für verschiedene Modultypen (LuxChemtech GmbH 2021)	50
Abbildung 18: Verfahrenskonzept für die gemeinsame Aufbereitung verschiedenartiger PV-Module zur Wertstoffrückgewinnung nach Lohmann und Scholz (2019) ...	56
Abbildung 19: Mengen der erfassten PV-Module in Hessen in den Jahren 2018 bis 2021	XXIX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abfallpotenzial der ressourcenrelevanten Stoffe, angelehnt an Sander et al. (2018).....	6
Tabelle 2: Stoffliche Zusammensetzungen verschiedener PV-Technologien, Angaben in %.....	10
Tabelle 3: Kritische Rohstoffe in PV-Modulen und deren EoL-RIR sowie Importabhängigkeit, angelehnt an Europäische Kommission (2020).....	11
Tabelle 4: Einteilung der Gerätekategorien, eigene Darstellung nach § 2 Abs. 1 bzw. Anlage 1 ElektroG	15
Tabelle 5: Behältnisse für die SG 6, eigene Darstellung nach stiftung ear (2022b)	23
Tabelle 6: Vergleich der Rücknahmemengen privater Haushalte aus verschiedenen Statistiken, Angabe in t.....	26
Tabelle 7: Grenzwerte für die Behandlung von silizium- und nicht-siliziumbasierten-Modulen, eigene Darstellung nach § 10 EAG-BehandV	38
Tabelle 8: Übersicht der Behandlungsverfahren (Stand 2012), abgeändert nach Beckmann (2012)	45
Tabelle 9: Vor- und Nachteile der grundlegenden Verfahrensansätze zur Delaminierung c-Si-Module, angelehnt an Heckler (2017).....	46
Tabelle 11: Outputmengen der First Solar GmbH (Staudt-Fischbach 2022a).....	52
Tabelle 12: Übersicht der aktuellen Behandlungsverfahren (Stand 2022), eigene Darstellung	53
Tabelle 13: Aufbereitungsverfahren für PV-Module.....	XXXVI
Tabelle 14: Inputmengen	XXXVII
Tabelle 15: Zurückgewonnene Rohstoffe.....	XXXVII
Tabelle 16: Output	XXXIX

Zusammenfassung

Photovoltaikanlagen sind für die Energiewende aufgrund der emissionsfreien Stromerzeugung von großer Bedeutung. Wegen der enthaltenen Wertstoffe und kritischen Rohstoffe gilt es Module so lange wie möglich zu nutzen oder im Falle eines Recyclings möglichst viele Materialien zurückzugewinnen. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde in Zusammenarbeit mit dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie eine Situationsanalyse zum Stand der Erfassung, Wiederverwendung und Verwertung in Deutschland durchgeführt.

Das Sammelsystem muss flächendeckend qualitativ verbessert werden, um ausreichende Annahmestellen für Altmodule zur Verfügung zu stellen. Zusätzlich müssen Informationen über Rückgabemöglichkeiten übersichtlicher und möglichst zentral für Endnutzer verfügbar sein. Ergänzend dazu sollten Endnutzer zur Nachweispflicht für die Entsorgung von Photovoltaikmodulen herangezogen werden. Ferner sind Erweiterungen im Bereich der Personal- und Platzkapazitäten notwendig, um die zukünftigen Mengen annehmen zu können.

Befragungen und Recherchen zeigen, dass die Vorbereitung zur Wiederverwendung im Bereich der Photovoltaikmodule bislang bei öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern und Erstbehandlungsanlagen wenig umgesetzt wurde, was auf fehlende Kenntnisse, Kapazitäten und derzeit geringe anfallende Mengen zurückgeführt werden kann. Darüber hinaus schränkt die unsachgemäße Handhabung bei der Erfassung eine potenzielle Wiederverwendung ein. Hierbei ist es notwendig, dass die Vorbereitung zur Wiederverwendung in der Praxis stärker umgesetzt wird und dafür weitere Anreize, wie z. B. eine separate Vorbereitung zur Wiederverwendungs-Quote, gesetzt werden. Für die beschädigungsfreie Handhabung der Module sind die Akteure in der gesamten Entsorgungskette zu schulen.

Nach derzeitigem Stand sind in Deutschland nur zwei Recyclinganlagen im Normalbetrieb tätig, bei welchen die Behandlung von amorphen- und kristallinen siliziumbasierten sowie bestimmten Cadmium-Tellurid-Photovoltaikmodulen möglich ist. Die Recherche hat gezeigt, dass das Recycling der Materialien von ökologischer und ökonomischer Bedeutung ist. Bislang erfolgte hauptsächlich die Rückgewinnung von Glas, Aluminium, Kupfer, Cadmium, Tellur und Kunststoffen. Die Rückgewinnung von Silizium, Silber, Indium und Gallium wurde bisher in verschiedenen Maßstäben erforscht, aber noch nicht im großtechnischen Maßstab wirtschaftlich umgesetzt. Zudem kann das Glasprodukt derzeit noch nicht in der Behälter- oder Flachglasproduktion eingesetzt werden. Die Rückgewinnung reiner Fraktionen gestaltet sich durch die Verbunde in den Modulen schwierig. Ein wesentlicher Aspekt für die Verbesserung der Recyclingquote ist ein recyclinggerechtes Design, um eine hochwertige Rückgewinnung der Materialien zu ermöglichen und Recyclingprozesse zu vereinfachen.

1 Einleitung und Motivation

Im Rahmen der nachhaltigen Gestaltung unserer Zukunft bekommt die Photovoltaik (PV) eine immer zentralere Bedeutung innerhalb der regenerativen Energien. Neben der emissionsfreien Stromerzeugung liegt mit dem Sonnenlicht eine fast unendliche Quelle vor. Durch das Inkrafttreten des 100.000 Dächerprogramms und des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)¹ kam es seit dem Jahr 2000 zu einem starken Wachstum der Installation neuer Anlagen. Bei einer Lebensdauer von ca. 20 - 30 Jahren (Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021) ist ein signifikanter Anstieg der zu behandelnden Mengen in den nächsten Jahren zu erwarten.

Die Vorbereitung zur Wiederverwendung (VzWv) von Photovoltaikmodulen ist vor einem Recycling zu präferieren. Dies ist vor allem aus ökologischen Punkten sinnvoll, da die Nutzungsdauer von PV-Modulen durch die Wiederverwendung verlängert wird und damit Abfälle, der Einsatz von Primärressourcen sowie entstehende Emissionen durch die Produktion neuer Module vermieden werden.

Für die nachhaltige Gestaltung der Zukunft ist es wichtig, dass regenerative Energien, wie die Photovoltaik, auch in ihrer End-of-Life (EoL)-Phase der Wertschöpfungskette zur Ressourcenschonung beitragen. Mit dem Ressourcenschutzeffizienzprogramm (ProgRess) gibt es seit 2012 erste Ziele, Leitideen und Handlungsansätze zum Schutz der natürlichen Ressourcen in Deutschland. Zu den Leitprogrammen gehören unter anderem die Vorhaben, die Wirtschafts- und Produktionsweisen in Deutschland schrittweise von Primärrohstoffen unabhängiger zu machen, vermehrt Sekundärrohstoffe in der Produktion einzusetzen und somit die Kreislaufwirtschaft auszubauen und weiterzuentwickeln (BMUV 2020a). Aus diesem Grund ist die thermische Verwertung von Photovoltaikmodulen überholt, da bei dieser die enthaltenen kritischen Wertstoffe, wie z. B. Silizium (Si) sowie Indium (In) und Gallium (Ga) verloren gehen, was im Weiteren zu einer Abhängigkeit an Primärrohstoffen führt und mit Versorgungsengpässen verbunden ist. Deshalb ist eine Entwicklung und eine Anpassung des PV-Modul-Recyclings in der Zukunft von großer Bedeutung (Benedek et al. 2014). Zu den wichtigsten Parametern für die Kritikalität eines Rohstoffes gehören die wirtschaftliche Bedeutung und das Versorgungsrisiko. Dies spricht für die Diversifizierung der Versorgung aus primären und sekundären Quellen und für die Erhöhung der Recyclingquote (Europäische Kommission 2017, 2020).

¹Ziel der Einführung des EEG war durch die Massenproduktion von PV-Modulen eine Preisreduktion herbeizuführen (Mertens 2020). Ziel des Gesetzes war unter anderem, eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen und den Beitrag Erneuerbarer Energien an der Stromversorgung nachdrücklich zu erhöhen (§ 1 EEG vom 01.04.2000)

In dieser Arbeit soll der aktuelle Stand und der Ausblick der Erfassung, Wiederverwendung sowie die Verwertung von PV-Altmodulen in Deutschland näher betrachtet werden. Dazu werden eine umfassende Literaturrecherche sowie Befragungen von Akteuren aus den jeweiligen Bereichen durchgeführt, um den Status Quo in Deutschland im Rahmen dieser Arbeit wiedergeben zu können und um aktuelle Hemmnisse sowie Potenziale für die Zukunft aufzuzeigen.

Zu Beginn werden die aktuelle Situation sowie Grundlagen der Photovoltaik zum kurzen Einstieg in das Thema dienen. Für den Bereich der Erfassung soll über eine Internet- und Literaturrecherche festgestellt werden, inwieweit das Erfassungssystem, mit Berücksichtigung des aktuellen rechtlichen Rahmens, für PV-Module etabliert ist. Es folgt anschließend die Datenerhebung zu den erfassten Mengen in Deutschland und zusätzlich eine Umfrage bei den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern (örE) für die in Hessen erfassten Mengen der letzten Jahre. Da in der Abfallhierarchie der VzWv eine höhere Wertigkeit zugesprochen wird als dem Recycling, sollen über eine Literaturrecherche der Status Quo und die Potenziale der VzWv der PV-Module im aktuellen Erfassungssystem dargestellt werden. Anschließend folgen die hauptsächlich in Deutschland zur Verfügung stehenden Behandlungstechniken in verschiedenen Maßstäben für diverse PV-Modultypen und die Rückgewinnung von kritischen Rohstoffen und Wertstoffen. Über Fachgespräche und Literaturrecherche aus den jeweiligen Bereichen werden Hemmnisse sowie Möglichkeiten für die Zukunft eruiert. Zum Schluss werden Optimierungspotenziale dargelegt. Durch ein Fazit soll der aktuelle Stand zusammengefasst und ein Ausblick für die Zukunft gestellt werden.

2 Aktuelle Situation und Grundlagen zur Photovoltaik

In den folgenden Abschnitten wird neben der aktuellen Situation zur Photovoltaik in Deutschland auch die Zusammensetzung von PV-Modulen vorgestellt. Im Weiteren werden die rechtlichen Grundlagen beschrieben, die den Rahmen in den Bereichen der Erfassung, Wiederverwendung und Verwertung festlegen.

2.1 Aktuelle Situation und Prognosen

Das PV-Aufkommen wird in der Regel durch die ans Netz angeschlossene Peakleistung² dargestellt (Kernbaum und Hübner 2013). Im März 2022 waren in Deutschland PV-Module mit einer Netto-Leistung zur Stromerzeugung von ca. 58,4 GW_p installiert, welche auf derzeit insgesamt 2,2 Mio. Anlagen verteilt ist (Destatis 2022a).³

Die Zusammensetzung der verwendeten Halbleiter bestimmen den Wirkungsgrad der PV-Module. In Abbildung 1 werden die verschiedenen Generationen mit den jeweiligen Halbleitertechnologien angegeben. Neben den erwähnten Technologien gibt es noch weitere Arten von PV-Modulen, die auf dem Markt in marginaler Menge vertreten sind und deshalb nicht aufgezählt werden.

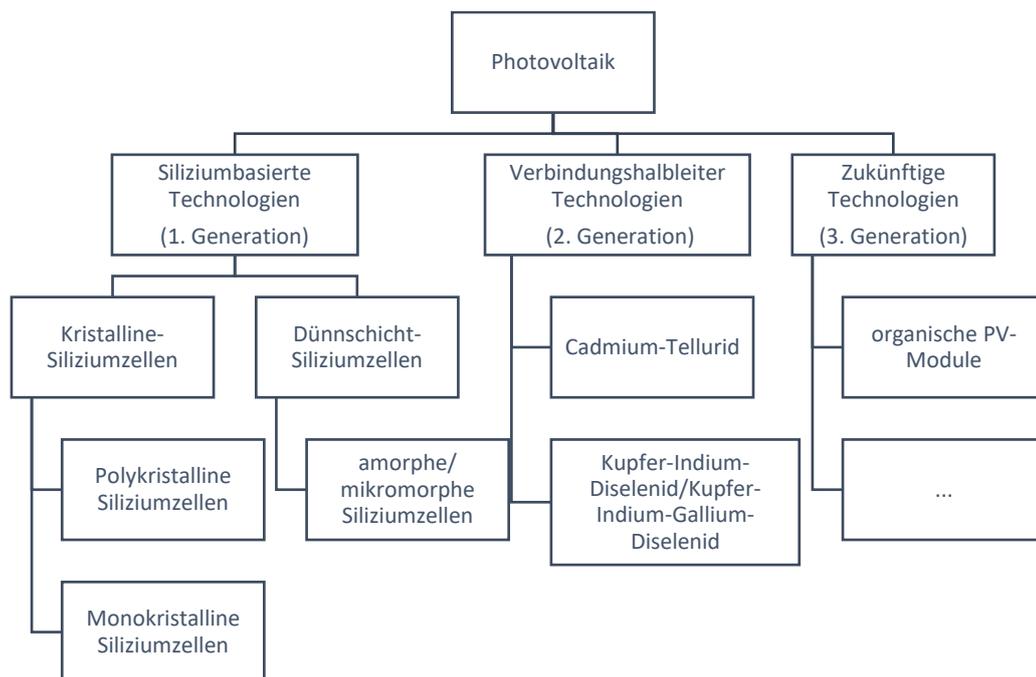


Abbildung 1: PV-Technologien, angelehnt an Benedek et al. (2014)

Abbildung 2 stellt die prognostizierten Abfallmengen von PV-Altmodulen in den Jahren 2016 bis 2050 dar. Für die Berechnung wurden Formparameter berücksichtigt, die einen normalen

² Die unter Standard-Testbedingungen erzeugbare Leistung wird als Peakleistung bezeichnet.

³ Die in Hessen installierte Leistung lag im Jahr 2021 bei 2.683 MW_p (Statista 2022).

Ausfall und einen frühzeitigen Ausfall berücksichtigen. Nutzungsdauer, Produktionsmenge oder technologiespezifisches Gewicht beeinflussen die prognostizierte Abfallmenge (IRENA 2016). Für das Jahr 2020 wurde durch das statistische Bundesamt eine erfasste Menge in Höhe von 15.400 t ermittelt (Destatis 2022b).

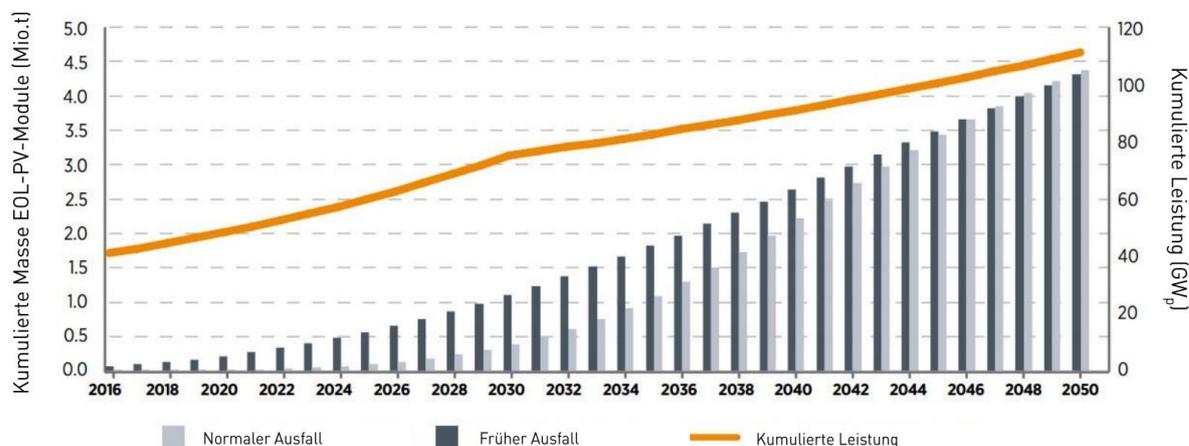


Abbildung 2: Berechnete Abfallmengen an PV-Altmodulen für Deutschland von 2016 bis 2050 nach IRENA (2016), zitiert (und übersetzt) nach Heitmann (2017)

Abbildung 3 stellt die kalkulierten Mengenanteile und die jeweiligen Angaben in Tonnen der PV-Technologien des Entsorgungsaufkommens für das Jahr 2020 dar. Daraus geht hervor, dass kristalline Silizium (c-Si)-Module bei dem Entsorgungsaufkommen mit 79 % überwiegend vertreten sind. Danach folgen amorphe-Silizium (a-Si)-Altmodule und Cadmium-Tellurid (CdTe)-Altmodule mit jeweils 10 % und 8 % (Sander et al. 2018). Die Umweltbundesamt (UBA)-Prognose berücksichtigt eine große Zeitspanne sowie globale Daten, allerdings basiert die Prognose auf Marktwerten und es sind Abweichungen durch die Hochrechnung möglich (Lohmann und Scholz 2019). Der vom UBA prognostizierte Mengenanteil der c-Si-Modultechnologien stimmt mit dem realen Mengenaufkommen überein (Lohmann und Scholz 2019).

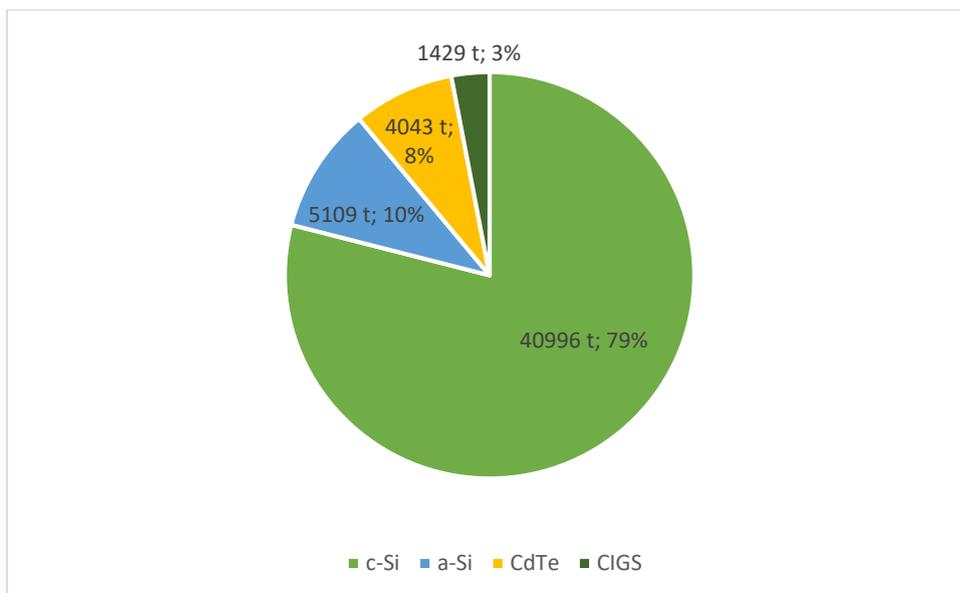


Abbildung 3: Abfallpotenzial von PV-Altmodulen im Jahr 2020, angelehnt an Sander et al. 2018

Unter der Berücksichtigung von früheren Ausfällen (Formparameter: 2,4928 IRENA (2016)) von PV-Modulen ergibt sich das Abfallpotenzial der ressourcenrelevanten Stoffe für das Jahr 2020 in Tabelle 1 (Sander et al. 2018).

Tabelle 1: Abfallpotenzial der ressourcenrelevanten Stoffe, angelehnt an Sander et al. (2018)

Element	Menge für das Jahr 2020 [t]
Silizium	1.565
Indium	0,9
Cadmium	2,5
Tellur	3
Gallium	0,1
Summe	1.571

Die gesammelten Mengen an PV-Modulen in Deutschland und deren weitere Verwertungswege und Stoffflüsse sowie die Datenerhebung für die Rücknahmemengen werden in Abschnitt 3 näher betrachtet.

2.2 Stoffliche Zusammensetzung von Photovoltaikanlagen

Es ist anzumerken, dass bei den nachfolgend beschriebenen Zusammensetzungen der Aufbau von PV-Modultypen nur exemplarisch dargestellt wird. Der Aufbau der Module und die Zusammensetzungen der Materialien sind abhängig von Hersteller und Produktionszeitraum.

2.2.1 Aufbau kristalliner siliziumbasierter Module

Für c-Si-Module werden Wafer verwendet, die entweder aus monokristallinem oder polykristallinem Si bestehen und eine Dicke von 160 bis 200 μm aufweisen (Kernbaum und Hübner 2013). Für das verwendete Si ist ein hoher Reinheitsgrad notwendig (Mertens 2020). Die Si-Wafer werden bei der Herstellung der Solarzellen dotiert und mit Front- und Rückkontakten sowie einer Antireflexschicht versehen (Kernbaum und Hübner 2013). Für die Rückseitenkontakte und für die Vorderseitenkontaktierung wird bei den Lötkontaktflächen eine Silberpaste verwendet. Die Zellen werden mit verzinneten Kupferstreifen zu einem Zellstring in Serie geschaltet (Mertens 2020). Die zusammengeschalteten Solarzellen werden in einer Laminierfolie aus Ethylvinylacetat (EVA) oder Polyvinylbutyral (PVB) eingebettet, um diese zu schützen. Das Modul ist an der Vorderseite mit einer eisenarmen ca. 4 mm starken Glasscheibe versehen (Mertens 2020; Quaschnig 2020). Die Rückseite wird entweder durch Glas oder ein widerstandsfähiges Backsheet abgeschlossen, auch Tedlar⁴ genannt, welches das PV-Modul vor Umwelteinflüssen schützt. In einem Laminator wird die Schichtung auf bis zu 150 °C erhitzt, wodurch das EVA-Material aufweicht, die Zellen umschließt und anschließend aushärtet (Kernbaum und Hübner 2013; Mertens 2020). In dem Backsheet können fluorhaltige Kunststoffe enthalten sein (Kernbaum und Hübner 2013). Die Module werden zur einfacheren Montage von einem Aluminiumrahmen umschlossen und mit einer Gummidichtung zwischen Rahmen und Frontglasscheibe versehen (Quaschnig 2022).

Alternativ zu den Glas-Folien-PV-Modulen gibt es Glas-Glas-PV-Module, bei welchen zur Erhöhung der mechanischen Stabilität anstelle eines Metallrahmens eine zweite Glasscheibe verwendet wird. Diese sind nicht schwerer als ein herkömmliches Modul, zudem sorgt die rückseitige Glasscheibe für eine dampfdichte und unempfindliche Versiegelung des Moduls (Mertens 2020).

In Abbildung 4 ist der schematische Aufbau eines kristallinen Moduls dargestellt.

⁴ Tedlar ist der Handelsname der Firma DuPont für Polyvinylfluorid (PVF).

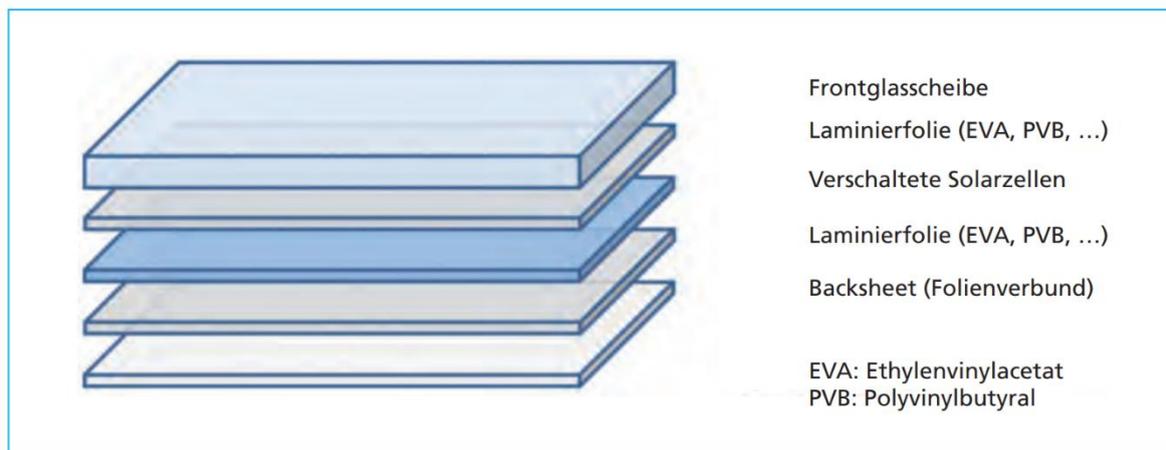


Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines PV-Moduls auf Basis von c-Si (Kernbaum und Hübner 2013)

Neben der emissionsfreien Stromerzeugung sollte zudem der Energieaufwand und die verwendeten Rohstoffe für die Produktion der PV-Module berücksichtigt werden. Auch der CO₂-Fußabdruck kann für die Bewertung der Nachhaltigkeit herangezogen werden, welcher die erzeugte Menge an CO₂ pro erzeugtem W_p angibt. Monokristalline PV-Module weisen im Vergleich mit polykristallinen und amorphen siliziumbasierten Modulen den höchsten Energieaufwand bei der Herstellung auf⁵ (Wild-Scholten 2013).

2.2.2 Aufbau Dünnschichtmodule

Die Halbleiter von Dünnschichtzellen bestehen z. B. aus a-Si, CdTe oder Kupfer-Indium-(Galium)-Diselenid bzw. -sulfid (CI(G)S). Im Laufe der Jahre haben Dünnschichtzellen an Bedeutung gewonnen. Vorteilhaft ist der geringere Materialeinsatz, die geringen Herstellungskosten und die insgesamt günstigere Produktion (Benedek et al. 2014). Nachteilig ist der niedrigere Wirkungsgrad als bei kristallinen Si-Zellen, was bei gleicher Leistung höhere Montagekosten und einen höheren Platzbedarf bedeutet. Der maximale Zellwirkungsgrad von CdTe-Modulen im Labormaßstab liegt bei 22,1 %, der Flächenbedarf für 1 kW_p bei 6,3 m². Bei monokristallinen Si-Modulen liegt der maximale Zellwirkungsgrad im Labormaßstab bei 26,7 % und der Flächenbedarf für 1 kW_p bei 5,3 m² (Quaschnig 2020).

Die Halbleiterschichten bei Dünnschichtmodulen sind wenige Mikrometer dick und werden auf einer Glasscheibe abgeschieden. Der Auftrag der unterschiedlichen Schichten erfolgt durch Verfahren der physikalischen Gasabscheidung. Abbildung 5 zeigt den schematischen Aufbau eines CdTe-Moduls. Die auf einer Flachglasscheibe aufgetragene durchsichtige und leitende Oxidschicht besteht aus Zinkoxid, Indiumzinnoxid oder aus mit Fluor dotiertem Zinnoxid und

⁵ Der Energieaufwand für ein monokristallines Siliziummodul liegt bei $25.210 \frac{MJ}{kW_p}$, der CO₂- Fußabdruck bei $1.217,6 \frac{kgCO_2eq}{kW_p}$.

wird als TCO-Schicht⁶ bezeichnet. Die TCO-Schicht besitzt eine Dicke von ca. 0,5 bis 1 μm . Der n-Halbleiter Cadmiumsulfid wird mit einer Dicke von 0,1 μm und der p-Halbleiter Cadmiumtellurid mit 2 bis 4 μm aufgebracht. Molybdän wird häufig als Rückkontakt, mit einer Schichtdicke von 0,5 bis 1 μm verwendet. Eine Laminierfolie und eine Rückglasscheibe schließen die Schichten ein, die zum Schutz vor Umwelteinflüssen dienen. Die angegebenen Schichtdicken unterscheiden sich je nach Hersteller und Modell (Kernbaum und Hübner 2013).

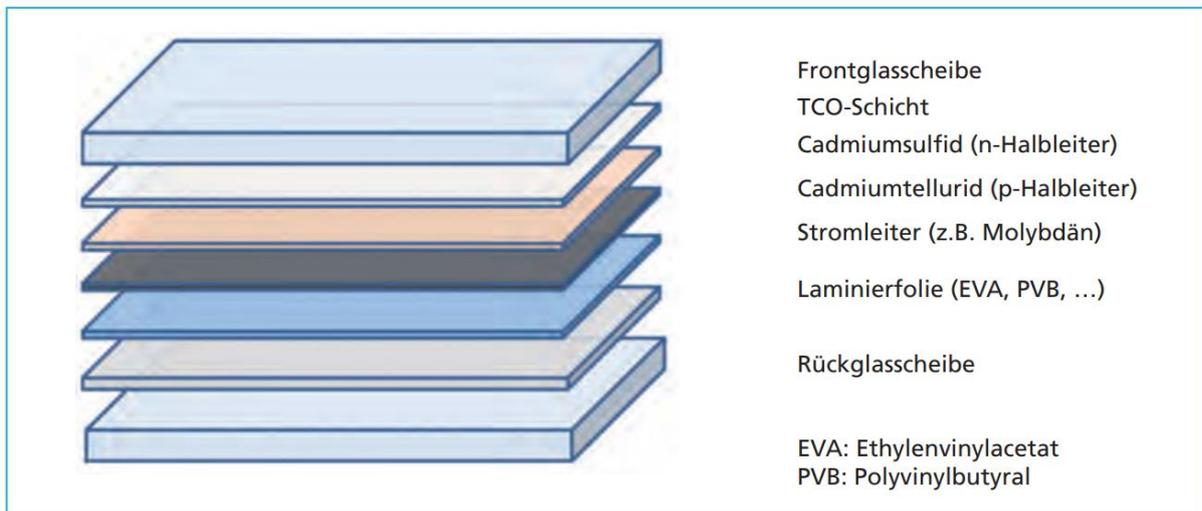


Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines PV-Moduls auf Basis von CdTe (Kernbaum und Hübner 2013)

Im Gegensatz zu kristallinen Modulen werden bei CdTe-Modulen keine Rahmen bei der Herstellung genutzt, stattdessen wird mehr Glas verwendet. Die EVA-Folie und Klebestreifen an den Randbereichen werden für den Zusammenhalt des Modulverbundes genutzt (Kernbaum und Hübner 2013).

⁶ TCO steht für „transparent conductive oxide“

Tabelle 2 zeigt beispielhaft die Mengenanteile, die pro Tonne diverser PV-Modultypen verarbeitet sind. Dabei ist anzumerken, dass die Anteile der Materialien abweichen können.

Tabelle 2: Stoffliche Zusammensetzungen verschiedener PV-Technologien⁷, Angaben in %

	c-Si	a-Si	CIS	CdTe
Glas	70 - 75	90	85	95
Aluminium	10 - 15	10	12	<0,01
Silizium	2,5 - 5	< 0,1		
Polymere	Rest	10	6	3,5
Zink		< 0,1	0,12	0,01
Blei		< 0,1	< 0,1	< 0,01
Kupfer	0,5 - 1		0,85	1
Indium			0,02	
Selen			0,03	
Tellur				0,07
Cadmium				0,07
Silber	0,05 - 0,1			<0,01
Zinn	0,05 - 0,1			

Aus Berichten aus den Jahren 2004 und 2007 wird ersichtlich, dass sich der Massenanteil an Glas erhöht und an Aluminium (Al) reduziert hat. Auch der Anteil an Silber (Ag) ist deutlich zurückgegangen, was auf die ökonomische Relevanz von Ag zurückzuführen ist (Sander et al. 2004; Sander et al. 2007).

2.2.3 Kritische Rohstoffe

Die EU-Kommission veröffentlicht seit dem Jahr 2011 alle drei Jahre eine Liste mit kritischen Rohstoffen. Für die Kritikalität eines Stoffes spielt die wirtschaftliche Bedeutung und das Versorgungsrisiko eine Rolle. Dabei bezieht sich die wirtschaftliche Bedeutung auf die Zuordnung der Endverwendungszwecke von Rohstoffen, auf der Grundlage von industriellen Anwendungen. Das Versorgungsrisiko berücksichtigt die Konzentration der globalen Produktion der Primärrohstoffe, die Lieferung in die EU auf Länderebene, die Regierungsführung der Lieferländer, Umweltaspekte, den Beitrag von Sekundärrohstoffen, die Substitution sowie die Abhängigkeit der EU von den Importen und Handelsbeschränkungen in Schwellen- und Entwicklungsländern. Die Organisation der Lieferketten war während der Covid-19-Krise in vielen Regionen der Welt mit kritischen Auseinandersetzungen verbunden - vor allem an den Orten, an

⁷ Daten für c-Si, angelehnt an Fraunhofer-ISE 2022b; Daten für a-Si, CIS, CdTe, angelehnt an Sander et al. 2007, zitiert nach BINE Informationsdienst 2010.

welchen sich die Bezugsquelle für Rohstoffe und Zwischenprodukte auf wenige Länder konzentrierte, was mit einem höheren Risiko der Versorgungsunterbrechung begleitet wurde. Vor allem für die Energiewende und die sichere Versorgung von Energie ist eine Verbesserung der Resistenz der kritischen Lieferketten notwendig. Unter anderem können diese Ziele durch die Reduzierung der Abhängigkeit von Importen und den Ausbau der Kreislaufwirtschaft und durch die verstärkte Nutzung von Sekundärrohstoffen durch einen stabilen EU-Markt erreicht werden. Die sekundäre Produktion von Rohstoffen, wie In, Ga und seltene Erden, die in erneuerbaren Energien verwendet werden, leistet aktuell nur einen kleinen Beitrag, was einen Verlust an potenziellem Wert für die EU-Wirtschaft und eine vermeidbare Quelle für Umweltbelastungen bedeutet.

In Tabelle 3 sind die in den PV-Modulen enthaltenen kritischen Rohstoffe und deren End-of-Life-Recycling-Einsatzquote (EoL-RIR) sowie die Importabhängigkeit aufgelistet (Europäische Kommission 2020).

Tabelle 3: Kritische Rohstoffe in PV-Modulen und deren EoL-RIR sowie Importabhängigkeit, angelehnt an Europäische Kommission (2020)

Kritischer Rohstoff	EoL-RIR ⁸ [%]	Importabhängigkeit ⁹ [%]
Gallium	0	31
Indium	0	0
Siliziummetall	0	63
Antimon	28	100
Beryllium	0	– ¹⁰
Germanium ¹¹	2	31

PV-Module werden zusammen mit Bildschirmen bei den Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG) die relevanteste Quelle für In und die größte Einzelquelle für Ga sowie die einzige Quelle für c-Si zur Kreislaufführung sein (Sander et al. 2018).

⁸ Der Prozentsatz der Gesamtnachfrage, welcher durch Sekundärrohstoffe gedeckt werden kann, wird als EoL-RIR bezeichnet (Europäische Kommission 2020).

⁹ Errechnet sich aus: Einfuhr – Ausfuhr / (Inlandsproduktion + Einfuhr - Ausfuhr) (Europäische Kommission 2020).

¹⁰ Importabhängigkeit von Be kann nicht berechnet werden, da in der EU weder die Produktion noch der Handel mit Berylliumerzen und -konzentraten stattfinden (Europäische Kommission 2020).

¹¹ Germanium (Ge) kommt in geringen Mengen in a-Si-Modulen als Dotierung vor (Sander et al. 2007).

2.2.4 Potenzielle Schadstoffe

Neben der Verfügbarkeit der Stoffe ist auch die Umweltrelevanz zu berücksichtigen. Die in den PV-Modulen enthaltenen potenziellen Schadstoffe erfordern einen fachgerechten und gewissenhaften Umgang in der gesamten Entsorgungskette. Über längere Zeiträume können potenziell schädliche Substanzen aus den PV-Modulen eluiert werden, was durch unterschiedliche Beschädigungen hervorgerufen werden kann. Der pH-Wert und die Temperatur beeinflussen dabei die Auswaschrates. Aus den genannten Gründen gehören PV-Module nicht in den Restmüll und nicht auf Deponien und sollten bei Beschädigungen nicht über längere Zeit der Witterung ausgesetzt bleiben (Fraunhofer-ISE 2022a).

Zu den potenziell gefährlichen Stoffen gehören Antimon (Sb), Beryllium (Be), Selen (Se), Fluor (F), Cadmium (Cd) und Blei (Pb). Stoffe die als Halbleiterschicht eingesetzt werden, weisen ein höheres Risiko auf als Metalle, die als Legierungselemente verwendet werden oder in die Glasmatrix eingebunden sind. Beryllium wird in den Kontakten verwendet. Blei wird in den Loten, Verbindungselementen und als Bleioxid in den Glasfritten der Module eingesetzt und ist in stark saurer oder basischer Umgebung löslich (Sander et al. 2018). Bei einigen waferbasierten Modulen ist F in den Folien vorhanden. Das in Dünnschichtmodulen vorhandene Cd wird als sehr giftig und gesundheitsschädlich eingestuft und kann als Staub oder an Partikel gebunden inhaliert werden. Kupfer-Indium-Diselenid-Solarzellen enthalten Se, welches z. B. nach Bränden, abhängig von der aufgenommenen Menge, toxisch wirken kann. Im Solarglas der Module wird durch die Zugabe von Sb bei der Produktion die Lichttransmission erhöht. Des Weiteren kann es auch in den Folien vorkommen. Werden die Module auf Deponien gelagert, kann Sb in das Grundwasser gelangen (Fraunhofer-ISE 2022a; Sander et al. 2018).

2.3 Funktionsweise von Photovoltaikmodulen

Das Si wird nach dem Herstellungsprozess mit Bor dotiert. Silizium enthält in der Außenschale vier Elektronen, die eine Verbindung mit chemischen Elementen eingehen. Bor besitzt auf der äußeren Schale drei Elektronen. In einem atomaren Gitter bestehend aus Bor und Si, liegen Elektronenlücken vor, weshalb die Zelle positiv dotiert (p-dotiert) ist. Für den Elektronenspender wird die obere Siliziumschicht mit beispielsweise Phosphor besetzt, welches mehr reaktive Elektronen enthält als Si und dadurch zum Elektronenspender wird. Phosphor beherbergt in der Außenschale fünf Elektronen. Die Siliziumscheibe ist somit auf einer Seite negativ dotiert (n-Schicht). In der Raumladungszone (Grenzbereich zwischen negativer und positiver Schicht) bewegen sich die überschüssigen Elektronen aus dem Phosphor und binden sich an die freien Fehlstellen aus der unteren Schicht. Die Fehlstellen werden durch Elektronen im Valenzband besetzt, wodurch eine elektrisch neutrale Zone gebildet wird, welche auch als „p-n-Übergang“

bezeichnet wird. Durch den Elektronenüberschuss und die Elektronenfehlstellen und den damit verbundenen natürlichen Ausgleich dieser bildet sich ein ständig vorhandenes elektrisches Feld. Durch Licht werden die Elektronen aus den Bindungen herausgelöst und befinden sich als frei bewegliche Teilchen in der Zelle. Die Elektronen werden in das Leitungsband gehoben und sind frei verfügbar. Durch Rekombination verschwinden einige der Elektronenlochpaare wieder, was zur Folge hat, dass die freien Elektronen wieder in die Elektronenlöcher fallen, wenn die Photonenenergie nicht ausreicht. Einige Ladungsträger driften jedoch zu den Frontkontakten an der Oberseite der Zelle, die Elektronen werden von den Löchern getrennt und driften nach oben, die Löcher dagegen nach unten. Sofern weitere Photonen freie Ladungsträger erzeugen, entsteht elektrische Spannung (Schröder 2021).

2.4 Rechtliche Grundlagen

Im Folgenden wird der rechtliche Rahmen für die Bereiche aufgezeigt. Dabei werden die EU-weiten und die nationalen Regelungen erläutert. Ab Abschnitt 3 werden die jeweiligen Gesetzesregelungen zu den jeweils passenden Themen näher betrachtet.

2.4.1 Waste of Electrical and Electronic Equipment

Für die einheitliche Regelung einer ordnungsgemäßen Entsorgung von EAG in Europa, welche zu Abfällen geworden sind, existiert seit 2003 die EAG-Richtlinie (Richtlinie 2002/96/EG), die auch als Waste of Electrical and Electronic Equipment (WEEE)-Richtlinie bekannt ist. Die EU-Richtlinie wurde im Juli 2012 neu gefasst. Die aktuelle Fassung ist die Richtlinie 2012/19/EU (Umweltbundesamt 2022). Durch die WEEE-Richtlinie (2012/19/EU) werden Vorgaben für die Entsorgung von EAG festgelegt (BMUV 2022; Europäische Union 2012).

2.4.2 Kreislaufwirtschaftsgesetz

Das Ziel des Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) ist die Förderung der Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen und die Sicherstellung des Schutzes von Menschen und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen (§ 1 Abs. 1 KrWG). Durch das KrWG sollen die Zielvorgaben der EU-Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG), die zuletzt durch die Richtlinie 2018/851/EU geändert worden ist, gefördert werden (§ 1 Abs. 2 KrWG) (Deutscher Bundestag 24.02.2012).

Ein Gegenstand oder ein Stoff wird nach § 3 Abs. 1 KrWG dann als Abfall bezeichnet, wenn der Besitzer sich derer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Nach § 5 Abs. 1 KrWG endet die Abfalleigenschaft eines Stoffes erst, wenn dieser ein Recycling oder ein anderes Verwertungsverfahren durchlaufen hat und folgendermaßen beschaffen ist:

Wenn...

1. er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
2. ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
3. er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie
4. seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt führt.

In § 6 des KrWG wird folgende Maßnahmenhierarchie festgelegt:

1. Vermeidung¹²,
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung,¹³
3. Recycling,¹⁴
4. Sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung,¹⁵
5. Beseitigung

Bei der Abfallhierarchie ist die Reihenfolge von oben nach unten zu präferieren. Bei PV-Modulen gibt es verschiedene Verfahrenswege. Nach dem Kauf von PV-Modulen kann eine Vermeidung von Abfällen durch eine lange Nutzungsdauer erreicht werden oder im Weiteren durch eine Wiederverwendung nach einer VzWv. Falls eine VzWv nicht in Frage kommt, sollte die höchstwertige Verwertung angestrebt werden, in dem Fall das Recycling. Nach § 6 Abs. 2 KrWG soll die Maßgabe Vorrang haben, bei welcher der Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet ist. Zusätzlich soll die wirtschaftliche Zumutbarkeit, die technische Möglichkeit und die sozialen Folgen beachtet werden.

¹² Vermeidung bezeichnet jede ergriffene Maßnahme, bevor ein Produkt, Stoff oder Material zu Abfall geworden ist. Dazu gehören unter anderem die Wiederverwendung von Produkten oder die Verlängerung der Produktlebensdauer (§ 3 Abs. 20 KrWG)

¹³ Siehe Abschnitt 4.

¹⁴ Zum Recycling zählt jedes Verwertungsverfahren, bei welchem die Aufbereitung von Materialien, Stoffen oder Produkten für den ursprünglichen Zweck oder andere Zwecke erfolgt. Dazu gehören nicht die Aufbereitung von Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff geeignet sind und die energetische Verwertung (§ 3 Abs. 25 KrWG).

¹⁵ Verwertung umfasst die stoffliche Verwertung, das Recycling und die energetische Verwertung (§ 3 Abs. 23 KrWG).

2.4.3 Elektro- und Elektronikgerätegesetz

Die aktuelle gültige Fassung der WEEE-Richtlinie (Richtlinie 2012/19/EU) wurde durch die Novellierung des Gesetzes über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von EAG im Jahr 2015 in nationales Recht umgesetzt. Zum 01. Januar 2022 erfolgte die Novellierung des Elektro- und Elektronikgesetzes (ElektroG) (Umweltbundesamt 2022). Durch das ElektroG werden die Anforderungen an die Produktverantwortung nach § 23 des KrWG festgelegt. Es bildet die Grundlage für die Entsorgung von EAG in Deutschland. Zu den Zielen des Gesetzes gehört die Abfallvermeidung von EAG, die VzWv, das Recycling sowie andere Formen der Verwertung solcher Abfälle, um die zu entsorgenden Abfallmengen zu verringern und demzufolge die Effizienz der Ressourcennutzung zu verbessern. Das Marktverhalten der Verpflichteten soll über das Gesetz geregelt werden, um die genannten Ziele zu erreichen (§ 1 ElektroG).

PV-Module fallen seit dem Jahr 2015 in den Anwendungsbereich des ElektroG (BMUV 2020b). Seitdem müssen Vertreiber und Hersteller von PV-Modulen den Pflichten für deren Inverkehrbringen nachkommen. Dabei ist eine Registrierung der Hersteller bei der stiftung elektro altgeräte-register¹⁶ (stiftung ear) notwendig (Wolf et al. 2017). Die verschiedenen Kategorien für die Altgeräte werden in Tabelle 4 dargestellt. Große PV-Module gehören zur Kategorie 4, kleine PV-Module werden der Kategorie 5 zugeordnet (Anlage 1 ElektroG).

Tabelle 4: Einteilung der Gerätekategorien, eigene Darstellung nach § 2 Abs. 1 bzw. Anlage 1 ElektroG

Kategorien	Elektro- und Elektronikgeräte
1	Wärmeüberträger
2	Bildschirme, Monitore und Geräte, die Bildschirme mit einer Oberfläche von mehr als 100 cm ² enthalten
3	Lampen
4	Großgeräte (Geräte, bei denen mindestens eine der äußeren Abmessungen mehr als 50 cm beträgt)
5	Kleingeräte (Geräte, bei denen keine der äußeren Abmessung mehr als 50 cm beträgt)
6	Kleine IT- und Telekommunikationsgeräte (keine der äußeren Abmessungen beträgt mehr als 50 cm)

¹⁶Die stiftung ear ist die Gemeinsame Stelle der Hersteller nach ElektroG. Zu den Aufgaben gehören unter anderem die Registrierung von Herstellern, die Erfassung der in Verkehr gebrachten Mengen sowie die Koordinierung der Bereitstellung von Behältnissen für Übergabestellen und deren Altgeräte-Abholung bei den örE (stiftung ear 2022f).

Für die Behandlung der PV-Module (Gerätekategorie 4) gilt eine Verwertungsquote von 85 % und eine VzWv- und Recyclingquote von 80 % (§ 22 Abs. 1 ElektroG).¹⁷

Bei Elektrogeräten wird zwischen zwei Gerätearten unterschieden. Dazu gehören „business to consumer“- Geräte (b2c) und „business to business“- Geräte (b2b). Geräte aus dem b2b-Bereich sind Elektrogeräte, die ausschließlich in anderen als privaten Haushalten genutzt werden können. Dabei ist nicht der Vertriebsweg entscheidend, sondern der Ort der möglichen Nutzung. Das bedeutet, dass die Nutzung von b2b-Geräten z. B. wegen ihres Verwendungszwecks, aufgrund ihrer Größe oder wegen besonderer Voraussetzungen für ihren Einsatz im privaten Bereich unwahrscheinlich ist. Geräte, die von privaten Haushalten und von anderen Nutzern als privaten Haushalten genutzt werden, werden als „Dual-Use-Geräte“ bezeichnet. Generell werden solche Geräte als b2c-Geräte eingeordnet. Je nachdem, ob es sich um b2b- oder b2c-Geräte handelt, gelten andere Pflichten der Hersteller (stiftung ear 2022c). Auch PV-Module, die in das öffentliche Netz einspeisen, gehören zu den Geräten privater Haushalte, wohingegen PV-Module aus Solarparks, aufgrund ihrer Menge, zu Altgeräten anderer Nutzer als private Haushalte fallen (LAGA 2017).

Dem Referentenentwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) ist zu entnehmen, dass das ElektroG mit der Novellierung zum 01. Januar 2022 zur Steigerung der Sammelmenge und zur Stärkung der VzWv beitragen soll, indem unter anderem das Netz der Rücknahmestellen ausgeweitet wird (BMUV 2020d). Weitere Anforderungen an die Behandlung von PV-Modulen, die durch das erneuerte ElektroG geregelt werden, werden in den jeweiligen Abschnitten verwendet.

2.4.4 CENELEC - Normen

Das europäische Komitee für elektrotechnische Normung (französisch: Comité Européen de Normalisation Électrotechnique (CENELEC)) ist eine europäische Normungsorganisation. Die Normen können durch Gesetze oder Verordnungen rechtsverbindlich werden. CENELEC-Normen der EN 50625-Serie können nach Kummer et al. (2020) für weitere Behandlungsempfehlungen für PV-Module genutzt werden.

2.4.5 Behandlungsverordnung für Elektro- und Elektronik-Altgeräte

Die Behandlungsverordnung für Elektro- und Elektronik-Altgeräte (EAG-BehandV) ist am 01. Januar 2022 in Kraft getreten und ergänzt das ElektroG als untergesetzliches Regelwerk (Kummer et al. 2020). Durch die EAG-BehandV werden die Anforderungen an die Behandlung

¹⁷ Anteil = Masse der Materialien der Gerätekategorie, die von EAG stammen und nach ordnungsgemäßer Erstbehandlung einem Verwertungsverfahren zugeführt werden / Masse aller getrennt erfassten EAG dieser Gerätekategorie (§ 22 Abs. 2 ElektroG)

von EAG geregelt. Die Verordnung bezieht sich auf die Tätigkeiten, die nach der Übergabe von EAG an eine Erstbehandlungsanlage (EBA) erfolgen. Zu diesen Tätigkeiten gehören (§ 1 Abs. 1 EAG-BehandV):

1. Entfrachtung von Schadstoffen,
2. Separierung von Wertstoffen,
3. Demontage,
4. Zerkleinern,
5. Recycling,
6. Sonstige Verwertung und
7. Vorbereitung zur Beseitigung.

In Abschnitt 5 werden die Anforderungen an die Behandlung von PV-Modulen nach der EAG-BehandV erläutert.

2.4.6 Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall

Neben dem ElektroG, welches die Pflichten von verschiedenen Akteuren festlegt, werden von der „Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall“ (LAGA) Anforderungen an die EAG-Entsorgung durch Richtlinien konkretisiert. Dabei wendet sich die LAGA M31 A an die verschiedenen Verpflichteten des ElektroG und konkretisiert und erläutert die gesetzlichen Regelungen zur Entsorgung, während sich die LAGA M31 B auf die Behandlung und Verwertung von EAG bezieht (LAGA 2017, 2018).

3 Erfassung von Photovoltaikmodulen

In den folgenden Abschnitten wird die Erfassung beschrieben, die durch das ElektroG geregelt wird. Zudem werden die Sammelmengen aus den Statistiken sowie die eigene Datenerhebung zu Sammelmengen und VzWv-Aktivitäten bei den örE in Hessen dargestellt.

3.1 Gründe für die Entsorgung von Photovoltaikmodulen

Nach Sander et al. (2007) ist die technische Lebensdauer der Zeitraum zwischen der Produktion und dem Zeitpunkt, an dem PV-Module keinen Strom mehr produzieren. Dies gilt ohne die Berücksichtigung menschlicher Einflüsse (z. B. Demontage oder Unfall).

Die häufigsten Ursachen für auftretende Fehler sind auf externe Einflüsse zurückzuführen. Folgende Fehler können beispielsweise auftreten (IEA-PVPS 2014):

- Brandflecken,
- Ablösung der Rückseitenfolie,
- Risse in den Zellen,
- Korrosion,
- Glasbrüche,
- Potenzial-induzierte-Degradation

Weitere Quellen für Defekte sind Transport-, Installations- und Wetterschäden. Bei den Gründen für eine Entsorgung von PV-Modulen spielen auch wirtschaftliche Aspekte eine Rolle. Eine Maßnahme zum Repowering¹⁸ (Kernbaum und Hübner 2013) oder das Neueindecken eines gesamten Daches können zum Austausch noch funktionierender Module führen (Sander et al. 2004). Durch die auslaufende EEG-Förderung für Ü20-Anlagen kommt es zur vermehrten Demontage von PV-Anlagen. Neben der nicht mehr finanziell attraktiven Einspeisevergütung kommen Kosten für den Weiterbetrieb der Anlage hinzu. Dazu gehören die Erneuerung des Wechselrichters und Kosten für Wartung, Instandhaltung, Reparatur und Versicherung (Solaranlagen-Portal 2022). Dirr (2016) schreibt in Bezug auf die Implikationen der Versagenswahrscheinlichkeiten, dass die Menge der PV-Module, die bis zum Jahr 2025 aufgrund von „Kinderkrankheiten“ entsorgt wird, überwiegt. Dazu gehören die Module, die das Alter von 4 Jahren nicht überschreiten. Die degradationsbedingte Entsorgungsmenge steigt ab dem Jahr 2018 stetig und dominiert ab 2025.

¹⁸ Unter Repowering wird das Ersetzen von veralteten Anlagen durch neue Anlagen mit einem höheren Wirkungsgrad verstanden.

3.2 Marktstammdatenregister

Das Marktstammdatenregister (MaStR) ist ein behördliches Register für den Strom- und Gasmarkt. Es enthält Daten zu Anlagenbetreibern und Anlagen. Dazu gehören alle neuen Anlagen und bestehenden Anlagen, Anlagen zur Erzeugung von erneuerbarer und konventioneller Energie sowie Anlagen, welche Strom und Gas erzeugen. Die Daten des MaStR sind öffentlich einsehbar, sofern es sich nicht um geschützte oder vertrauliche Daten handelt. Jeder Anlagenbetreiber und jede installierte PV-Anlage sind über eine MaStr-Nr. der Einheit (komplette Anlage) eingetragen, zusätzlich wird das Datum der Inbetriebnahme, der Energieträger sowie technische Daten und Standort angegeben. Zu den Zielen gehören unter anderem die Vereinfachung der behördlichen und privatwirtschaftlichen Meldungen und die Steigerung der Datenqualität und Transparenz (Bundesnetzagentur 2018).

3.3 Rücknahmemöglichkeiten

Wenn sich ein Besitzer von PV-Modulen dieser entledigen will, ist dieser verantwortlich für die gesetzeskonforme Entsorgung der PV-Module. Die Pflichten für die Entsorgung tragen zum einen die Hersteller und zum anderen die örE (geteilte Produktverantwortung) (Umweltbundesamt 2022). Dies bedeutet, dass die Rücknahme zum Teil über die Kommunen und teils über die Modulhersteller finanziert wird (Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021).

Nur örE, Vertreiber, Hersteller/Bevollmächtigte und Betreiber von EBA dürfen Geräte aus privaten Haushalten annehmen. Die erwähnten Akteure dürfen für die Rücknahme auch Dritte beauftragen (§ 12 Abs. 1 und 2 ElektroG).

3.3.1 Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger

Nach § 13 Abs. 1 und 4 ElektroG sind örE verpflichtet Sammelstellen einzurichten, an welchen Altgeräte aus privaten Haushalten aus dem jeweiligen Gebiet unentgeltlich angeliefert werden können (Bringsystem). Die Annahme von bestimmten Gerätegruppen kann an einzelnen Sammelstellen beschränkt werden, sofern die Annahme aller Gruppen im Entsorgungsgebiet des örE sichergestellt wird (§ 13 Abs. 2 ElektroG). Nach Absatz 3 gibt es auch die Möglichkeit eines Holsystems für private Haushalte, dies ist u. a. unter der Berücksichtigung der jeweiligen Bevölkerungsdichte festzulegen.

Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger müssen im Rahmen ihrer Erfassungspflicht auch EAG aus sonstigen Herkunftsbereichen zurücknehmen, unter der Voraussetzung, dass diese im betroffenen Gewerbe so anfallen, dass sie mit der Beschaffenheit und Menge mit in privaten Haushalten anfallenden Altgeräten vergleichbar sind. Als haushaltsübliche Menge wird eine Stückzahl von 20 – 50 PV-Module bezeichnet (LAGA 2017). Über diese Menge hinaus dürfen Geräte aus dem b2b-Bereich nicht bei den örE abgegeben werden, um eine Vermischung der

Erfassungsmengen der unterschiedlichen Herkunftsbereiche zu verhindern und die Transparenz der Stoffströme zu bewahren (LAGA 2017).

3.3.2 Vertreiber und Gewerbetreibende

Vertreiber für Elektro- und Elektronikgeräte mit einer Verkaufsfläche größer als 400 m² oder Onlinehändler mit einer Lager- und Versandfläche größer als 400 m² sind dazu verpflichtet, bei der Abgabe eines neuen Gerätes an einen Endnutzer ein Altgerät der gleichen Geräteart, welches die gleichen Funktionen wie das neue Gerät erfüllt, am Ort der Abgabe unentgeltlich bzw. in unmittelbarer Nähe zurückzunehmen (1:1 Rücknahme). Der Vertreiber muss zusätzlich den Endnutzer über die Möglichkeit der unentgeltlichen Rückgabe informieren und nach der Absicht befragen, ein Altgerät bei der Auslieferung des neuen Geräts zurückzugeben (§ 17 Abs. 1 und 2 ElektroG). Vertreiber können gemäß § 17 Abs. 3 ElektroG auch freiwillig Altgeräte zurücknehmen.

Die Abgabe von PV-Modulen von Vertreibern bei Wertstoffhöfen, herstellereigenen Rücknahmesystemen oder bei einer zertifizierten EBA ist nicht kostenfrei (PV Cycle Deutschland GmbH o.J.b).

Zudem kann eine Rücknahme von Altgeräten im Rahmen einer Drittbeauftragung durchgeführt werden (§ 12 Abs. 1 S. 2 ElektroG). Die von Vertreibern/Gewerbetreibenden angelieferten Altgeräte aus privaten Haushalten fallen in die Pflicht der Sammlung, sofern diese ihre Niederlassung in dem Gebiet des öRE besitzt. Die angelieferten Geräte gelten als Altgeräte aus privaten Haushalten (§ 13 Abs. 1 ElektroG). Dies kann durch einen durch den Kunden unterschriebenen Lieferschein nachgewiesen werden (LAGA 2017).

3.3.3 Hersteller/Bevollmächtigte und Dritte

Hersteller, die keinen Sitz in Deutschland besitzen, haben in dem Land einen jeweiligen Bevollmächtigten, der die Pflichten nach § 19 ElektroG übernimmt (§ 8 Abs. 1 ff. ElektroG).

Hersteller/Bevollmächtigte sind dazu verpflichtet die Behältnisse im Rahmen der Abholkoordination¹⁹ (AHK) abzuholen bzw. aufzustellen (§ 16 Abs. 1 und 3 ElektroG). Es gibt unterschiedliche Rückgabemöglichkeiten bei PV-Altmodulen aus dem b2b-Bereich. Dabei wird unterschieden, ob die Module vor oder nach dem 24.10.2015 in Verkehr gebracht wurden. PV-Module, die vor dem 24.10.2015 in Verkehr gebracht wurden, gelten als historische Altgeräte (§ 3 Nr. 4 ElektroG). Die Rücknahme von nicht-historischen Altgeräten aus dem b2b-Bereich erfolgt

¹⁹ Die Abholkoordination umfasst unter anderem die Sammelstellen mit der Erfassung der Sammelgruppen, die Abhol- und Aufstellungsanordnung, die sich an Hersteller/Bevollmächtigte richtet und die damit verbundenen Mengenmitteilungen (stiftung ear 2022g).

nach § 19 Abs. 1 ElektroG durch den Hersteller/Bevollmächtigten mit der Schaffung einer zumutbaren Möglichkeit zur Rückgabe. Das Rücknahmekonzept, das Hersteller mit der Novellierung des ElektroG der zuständigen Behörde vorlegen müssen, gilt für nicht-historische Altgeräte (§ 7a ElektroG). Bei historischen PV-Altmodulen ist der Endnutzer (b2b) für die ordnungsgemäße Entsorgung und deren Kosten verantwortlich (§ 19 Abs. 3 S. 3 ElektroG), sofern die Altgeräte nicht von den öRE angenommen werden. Freiwillige und kostenfreie Rücknahmekonzepte einzelner Inverkehrbringer/Hersteller gelten für historische und neue Geräte (§ 16 Abs. 5 und § 19 Abs. 3 ElektroG) (PV Cycle Deutschland GmbH o.J.b).

Die Organisation PV Cycle hat sich in der EU für die Koordination von PV-Altmodulen etabliert. Für Hersteller, die bei PV Cycle Mitglied sind, bietet das Unternehmen die kostenfreie Ausführung der von der stiftung ear verordneten Abhol- und Gestellungsanordnungen an den Wertstoffhöfen an und dazu weitere Dienstleistungen, um die Pflichten aus der WEEE-Richtlinie und des ElektroG zu erfüllen. Das Unternehmen ist europaweit mit verschiedenen Recyclinganlagen vernetzt (PV Cycle Deutschland GmbH o.J.a).

3.3.4 Erstbehandlungsanlagen

Altmodule müssen zunächst einer Erstbehandlung zugeführt werden, bevor diese zu weiteren Verwertungs- oder Beseitigungsmaßnahmen gelangen (§ 20 Abs. 1 ElektroG). Die Behandlung kann auch außerhalb von Deutschland oder außerhalb der Europäischen Union stattfinden (§ 20 Abs. 3 ElektroG).

Neben den erwähnten Rücknahmemöglichkeiten, können auch Betreiber von EBA freiwillig an der Rücknahme von EAG teilnehmen. Dabei muss der Betreiber entsprechende Rücknahmestellen einrichten und darf vom privaten Endnutzer kein Entgelt verlangen (§ 17a Abs. 1 ElektroG).

In Abbildung 6 werden die beschriebenen Rücknahmewege bzw. die Verpflichtungen der Akteure vereinfacht dargestellt. Neben den Verpflichtungen gibt es auch die Möglichkeiten der freiwilligen Rücknahme bei Vertreibern und Herstellern.

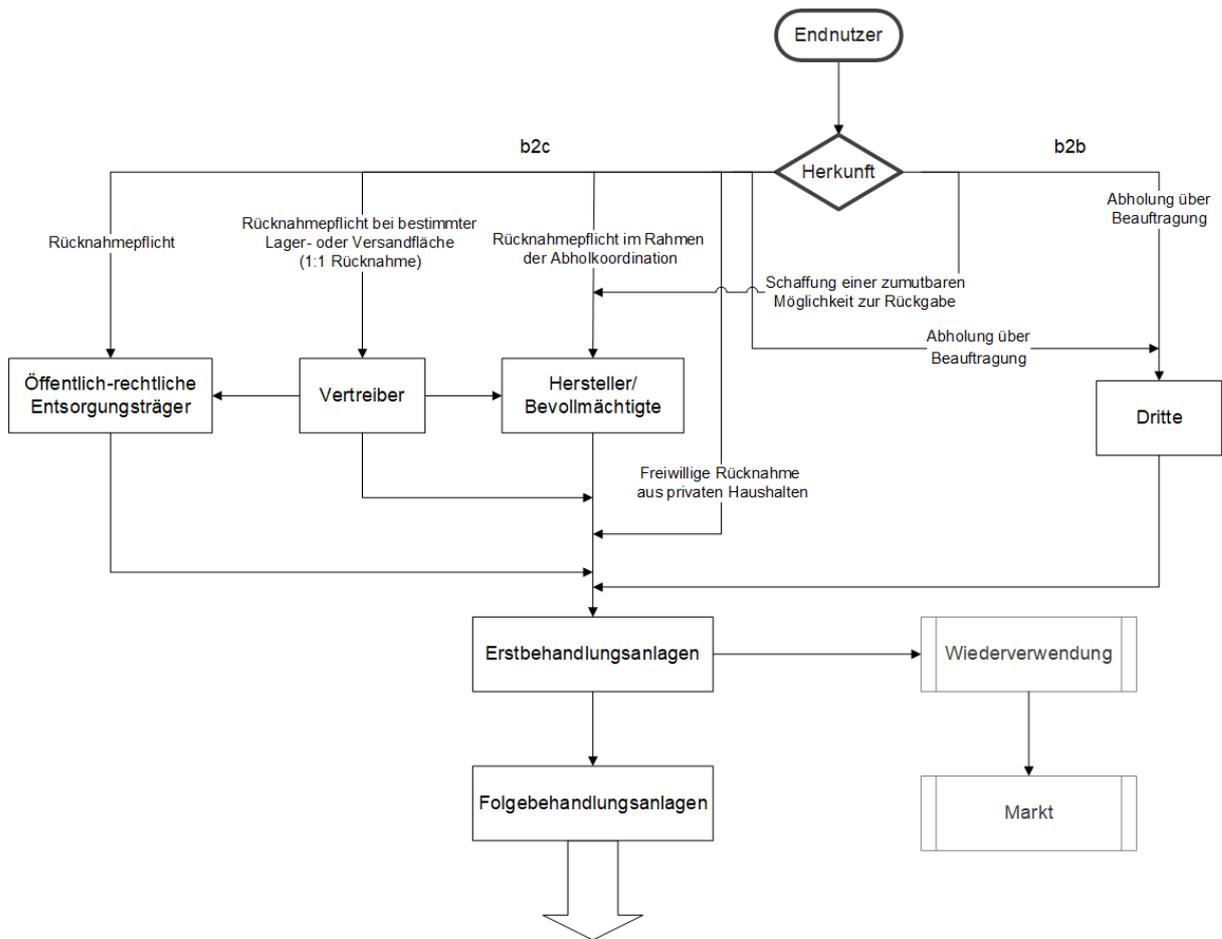


Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung der Rücknahmewege von PV-Altmodulen nach ElektroG, eigene Darstellung

3.4 Lagerung und Transport

Um eine adäquate Erfassung zu gewährleisten, müssen Altgeräte so erfasst werden, dass eine spätere VzWv, eine Demontage oder ein Recycling nicht beeinträchtigt werden (§ 10 Abs. 2 ElektroG). Durch die Behältnisse soll eine bruch sichere Sammlung der Module gewährleistet und eine sichere Handhabung ermöglicht werden (LAGA 2017). In Bezug auf die in Abschnitt 2.2.4 erwähnten Schadstoffaspekte ist eine witterungsgeschützte Lagerung unerlässlich, vor allem bei den Fraktionen, die als gefährlicher Abfall eingestuft werden. Hersteller/Bevollmächtigte müssen die Behältnisse bei den öRE-Sammelstellen aufstellen und diese abdecken (unentgeltlich) (§ 15 Abs. 1 ElektroG). Große und kleine PV-Module werden der Sammelgruppe (SG) 6 zugeordnet (LAGA 2017). Von der stiftung ear werden die in Tabelle 5 aufgelisteten Standardtransporteinheiten (TPE) für die Lagerung und den Transport festgelegt, welche auch von den öRE für die Sammlung genutzt und von Herstellerseite aus abgeholt und aufgestellt werden müssen (stiftung ear 2022b). In der Anlage 4 des ElektroG werden in Nr. 1 weitere

Anforderungen zu den Standorten für die Lagerung, einschließlich der Zwischenlagerung, angegeben. Demnach sind geeignete Bereiche mit einer wetterbeständigen Abdeckung zu nutzen.

Tabelle 5: Behältnisse für die SG 6, eigene Darstellung nach stiftung ear (2022b)

Sammelgruppe	Behältnis	Volumen in [m ³]
6	Kunststoff Palettenbox	1
	Europalette	0,75
	PV Big Bag	0,75

Die örE sind verpflichtet die Altgeräte in den jeweiligen SG in den von den Herstellern/Bevollmächtigten aufgestellten Behältnissen zu sammeln. Der Inhalt der Behältnisse darf nicht mechanisch verdichtet werden (§ 14 Absatz 2 ElektroG). Die Module sollen zudem lichtgeschützt, trocken und in geeigneter Weise für den Transport gesichert werden. Bei auftretenden Beschädigungen an Kabeln und Kontakten sollten diese abgeklebt werden (LAGA 2017). Die Separierung von Altgeräten, eine nachträgliche Entnahme aus den Behältnissen sowie die Entfernung von Bauteilen aus oder von den Altgeräten ist nach § 14 Abs. 4 ElektroG unzulässig. Es darf auch keine Veränderung des Inhalts der Behälter bis zum Eintreffen bei der EBA erfolgen, außer es besteht im Rahmen einer VzWv eine Kooperation²⁰ mit der EBA nach § 17b oder eine Optimierung (Opt)²¹ nach § 14 Abs. 5 ElektroG. Gemäß § 14 Absatz 3 ElektroG müssen örE der stiftung ear die zur Abholung bereitstehenden Behältnisse melden, wenn die Abholmenge von mindestens zweieinhalb Kubikmetern erreicht ist. Anschließend wird über eine wissenschaftlich anerkannte Berechnungsweise ermittelt, welcher der Hersteller/ElektroG-Bevollmächtigten von EAG zur Abholung verpflichtet ist (stiftung ear 2022g). Die Pflichten für die Übernahme der Kosten für die Abholung, Entsorgung und das Aufstellen leerer Behältnisse übernimmt der Hersteller (§ 16 Abs. 4 ElektroG). Die Abholung der EAG erfolgt in der Regel nicht über den Hersteller/ElektroG-Bevollmächtigten selbst, sondern über Dritte, welche zu den Entsorgern/Erstbehandlern gemäß ElektroG gehören. Die EAG müssen in eine zertifizierte EBA gelangen und die vorgegebenen Verwertungsquoten (vgl. Abschnitt 2.4.3) erreicht werden (stiftung ear 2022g).

²⁰ Seit der Novellierung zum 1. Januar 2022 möglich.

²¹ örE können sämtliche Altgeräte einer Gruppe für min. 2 Jahre von der Bereitstellung zur Abholung ausnehmen und diese selbst verwerten/vermarkten.

Sofern eine gemischte Erfassung der verschiedenen PV-Modulvarianten besteht, ist eine Separierung der verschiedenen Modultypen notwendig, da die EBA häufig nur auf bestimmte Modultypen spezialisiert sind. Für die Modultypen, die nicht an der EBA behandelt werden können, kann eine weitere Beauftragung über eine andere EBA erfolgen (LAGA 2017).

3.5 Sammelmengen

PV-Module wurden erstmals im Jahr 2016 in den Datenmeldungen des Statistischen Bundesamts (Destatis) ausgewiesen (Löhle et al. 2020). Ab dem 1. Januar 2019 muss die Mindestsammelquote 65 % betragen. Für die Berechnung der Mindestsammelquote wird das Gesamtgewicht der erfassten EAG in jedem Kalenderjahr ins Verhältnis zum Durchschnittsgewicht der in den letzten drei Jahren in Verkehr gebrachten Mengen gesetzt (§ 10 Abs. 3 ElektroG).

3.5.1 Berichterstattung und zur Erstbehandlung angenommene Mengen

EU-Mitgliedstaaten wird von der WEEE-Richtlinie vorgeschrieben, die Daten zu den Sammel- und den Verwertungsergebnissen zu erheben. Über die stiftung ear und das Destatis werden die Daten in Zusammenarbeit mit den statistischen Landesämtern erhoben und dem UBA übermittelt. Über das UBA werden die Daten ausgewertet und für die Berichterstattung zusammengefasst. Die Ergebnisse der Datenauswertung und die KOM²²-Tabellen werden an das BMUV weitergegeben. Anschließend werden die Daten nach Abstimmung mit dem BMUV an die EU-Kommission weitergeleitet (Umweltbundesamt 2021). Aktuell sind die Daten von 2006 bis 2020 verfügbar.

Meldungen zu Rücknahmemengen aus privaten Haushalten werden über die stiftung ear als Rohdaten erfasst, dazu gehören AHK über Herstellermeldungen, Opt über Meldungen optierender öRE, freiwillige Eigenrücknahmen (ER) über Herstellermeldungen und Meldungen zu Vertreiberrücknahmen (Löhle et al. 2020).

In Tabelle 6 werden die Statistiken der Rücknahmemengen aus privaten Haushalten der stiftung ear, Destatis und von BMUV aus den Jahren 2017 bis 2020 dargestellt. Jüngere Statistiken sind nicht bei allen erwähnten Einrichtungen zu finden, um sie für den Vergleich nutzen zu können.

Die Daten der Homepage weichen von den Rohdaten der stiftung ear geringfügig ab (Löhle et al. 2020). Für die SG 6 kam es in den aufgelisteten Jahren nie zur Opt, weshalb nur die Mengen über die AHK und die ER aufgelistet sind (stiftung ear 2022d). In diesem Vergleich werden nur die Mengen aus dem b2c-Bereich berücksichtigt, da die Daten der Jahres-Statistik-Mitteilung der stiftung ear nur diese enthalten.

²² Europäische-Kommission (KOM)

Tabelle 6: Vergleich der Rücknahmemengen privater Haushalte aus verschiedenen Statistiken, Angabe in t²³

Jahr	stiftung ear	Destatis	BMUV
2017	553	1.000	1.000
2018	1.520	2.300	2.259
2019	1.655	2.600	2.603
2020	1.899	4.400	4.445

Bei Betrachtung der Daten wird sichtbar, dass die Daten von Destatis nur geringfügig von denen des BMUV abweichen, was vermutlich an der Rundung der Zahlen liegt. Deshalb sind die KOM-Tabellen für die Berechnung der jeweiligen Quoten entscheidend. Die über Destatis gemeldeten Mengen sind bedeutsam höher, was auf Meldelücken bzw. Nichtmeldungen im Meldesystem der stiftung ear schließen lässt. Nach dem Meldewesen von Destatis wurden mehr EAG zur Erstbehandlung angenommen, als örE, Hersteller, Vertreiber und entsorgungspflichtige Besitzer als rückgenommene Menge über die stiftung ear meldeten (Löhle et al. 2020; stiftung ear 2022a).

In Abbildung 7 werden die bei den EBA angenommenen Mengen aus dem b2c- und aus dem b2b-Bereich berücksichtigt. Dazu wurden die erfassten Mengen der PV-Altmodule aus den Jahren 2017 bis 2020 der Homepage des Destatis entnommen. Die Statistik für das Jahr 2021 wurde vom Destatis noch nicht veröffentlicht. Die Abbildung lässt eine deutliche Tendenz in Richtung steigender PV-Modul-Rückläufer erkennen. Die Zahl der gesammelten PV-Module ist von 3.600 t im Jahr 2017 auf 7.900 t im Jahr 2018 gestiegen, was eine prozentuale Erhöhung von ca. 120 % bedeutet. Von 2018 auf 2019 beträgt die Erhöhung 70 %. Der Anstieg zum Jahr 2020 beläuft sich auf 15 % (Destatis 2022b).

²³ (stiftung ear 2022d; Destatis 2022b; BMUV 2020c)

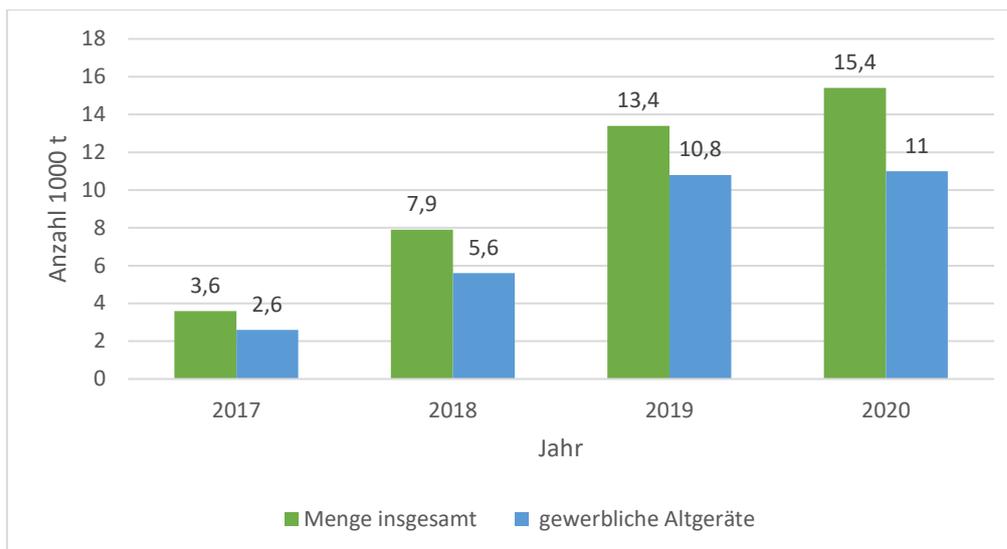


Abbildung 7: Bei EBA angenommene PV-Modulmengen und deren Herkunft, eigene Darstellung nach Destatis (2022b)

Abbildung 8 stellt die verschiedenen Verwertungswege der gesammelten PV-Module in den Jahren 2017 bis 2020 dar. Der prozentuale Anteil der energetisch und stofflich verwerteten Menge ist von 2017 auf 2018 gestiegen, wie auch der Anteil der beseitigten Mengen. Die Zahlenwerte der VzWv und der Beseitigung sind in den Jahren 2019 und 2020 mit dem Vermerk „unbekannt oder geheim zu halten“ versehen (Destatis 2022b). Die Mengen, die in die VzWv und in das Recycling gingen, werden bei der Spalte „Recycling“ zusammengefasst (BMUV 2020c).

Die Mengen der VzWv sind in den Recyclingmengen bei der stiftung ear enthalten, was auf die gemeinsame Quote für die VzWv und das Recycling der WEEE-Richtlinie zurückzuführen ist. Aus diesem Grund können die einzelnen Zahlen nicht quantifiziert werden. Den Datenquellen der stiftung ear und des Destatis kann nicht entnommen werden welche Anteile des b2c- und des b2b-Bereichs zur Wiederverwendung vorbereitet wurden (Löhle et al. 2020).

In der Berichtspflicht nach § 16 Abs. 4 der WEEE-Richtlinie, muss eine Auskunft über die im Mitgliedstaat, in einem anderen Mitgliedstaat und außerhalb der Europäischen Union behandelten Altgeräte an die EU-Kommission erfolgen. Der Ort der Behandlung wird in den Jahren 2019 und 2020 nicht differenziert. Die gesamte Menge wird mit dem Vermerk versehen, dass der Betrag Daten enthält, welche der statistischen Geheimhaltung unterliegen. Im Jahr 2018 wurden alle insgesamt gesammelten Module im Mitgliedstaat behandelt. Von den insgesamt gesammelten PV-Modulen im Jahr 2017 wurden 3.568 t im Mitgliedstaat, 26 t in einem anderen Mitgliedstaat und 1 t außerhalb der EU behandelt (BMUV 2020c).

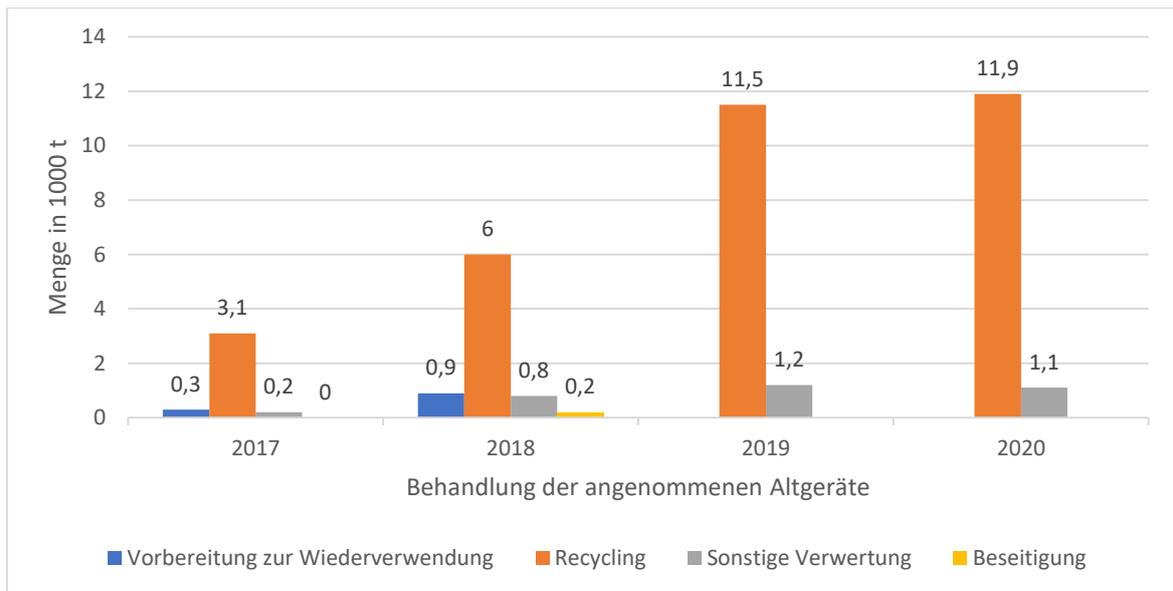


Abbildung 8: Verwertungswege der gesammelten PV-Altmodule, eigene Darstellung nach Destatis (2022b)

3.5.2 Umfrage an die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger in Hessen

Über Internet- und Literaturrecherche konnten mit Ausnahme des Jahres 2020 keine weiteren Mengen von erfassten PV-Altmodulen in Hessen ermittelt werden. Deshalb wurde eine Befragung der örE durchgeführt. Mit Hilfe dieses Fragebogens sollten die in Hessen bei den örE gesammelten PV-Altmodulmengen quantifiziert werden. Zudem sollte auch eruiert werden, ob eine Separierung nach Modultechnologien stattgefunden hat und ob geprüft wurde, inwiefern die Module für eine VzWv geeignet sind. Der unausgefüllte Fragebogen ist in Anhang A zu finden, die Auswertung dazu befindet sich in Anhang B.

Der Fragebogen wurde an die jeweiligen örE aus den Landkreisen und kreisfreien Städten geschickt. Zu den insgesamt 21 Landkreisen und 5 kreisfreien Städten wurden zudem die Stadt Maintal aus dem Main-Kinzig-Kreis und die Stadt Bad Vilbel aus dem Wetteraukreis angeschrieben. Mit einer Rücklaufquote von 79 % konnten Erkenntnisse über den derzeitigen Stand der Erfassung und Wiederverwendung erworben werden.

3.5.3 Erfasste Mengen in Hessen

Abbildung 9 zeigt die erfassten Mengen bei örE in Hessen für die Jahre 2018 bis 2021, die sich aus den Antworten von 22 Befragten ableiten (vgl. Anhang B).

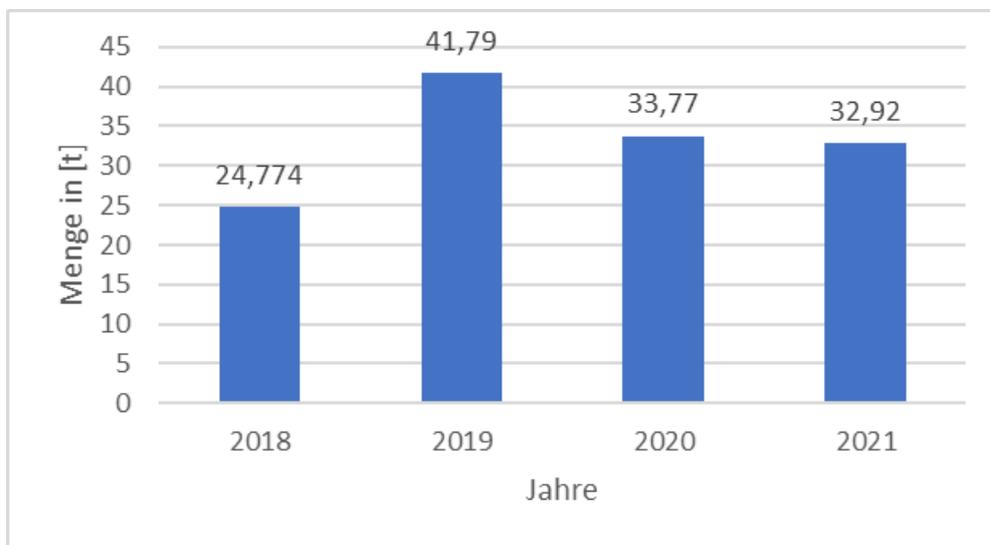


Abbildung 9: Erfasste Mengen bei örE in Hessen für die Jahre 2018 bis 2021

Die Daten der Auswertung zu den erfassten Mengen bei den befragten örE in Hessen können nicht als repräsentative Werte in dieser Arbeit genutzt werden. Grund dafür ist zum einen der nicht vollständige Rücklauf der befragten örE. Zudem weichen die kumulierten Mengen aus den Auswertungen des Jahres 2020 mit etwa 34 t beträchtlich von den Mengen aus der Abfallmengenbilanz des Landes Hessen für das Jahr 2020 mit 131 t (Hessisches Statistisches Landesamt 2021a) für PV-Module ab.

Zu der nicht ausreichenden Rücklaufquote besteht bei den Befragungen von Seiten der statistischen Landesämter eine Auskunftspflicht für die Inhaberinnen/Inhaber oder Leitungen der Unternehmen und Einrichtungen sowie der Entsorgungsträger nach § 14 Abs. 1 Umweltstatistikgesetz (UStatG) in Verbindung mit § 15 Bundesstatistikgesetz (BstatG) (Hessisches Statistisches Landesamt 2021b). Zusätzlich kann nicht garantiert werden, dass die angegebenen Mengen den ganzen jeweiligen Landkreis abdecken.

Drei Betriebe gaben an, dass trotz der Möglichkeit der Annahme, keine PV-Module angeliefert wurden. Für das Jahr 2021 konnte von einem Betrieb noch keine Angabe zu der erfassten Menge von PV-Modulen gemacht werden. In Bezug auf eine Separierung gaben alle Betriebe an, dass sie die PV-Module derzeit nicht nach Art der Technologie oder nach Eignung für eine VzWv trennen (siehe Anhang B). Eine Separierung der Geräte würde bedeuten, dass der jeweilige örE die PV-Module optiert hat.

4 Wiederverwendung von Photovoltaikmodulen

Der Begriff der Wiederverwendung ist im KrWG definiert. Wiederverwendung bezeichnet jedes Verfahren, bei welchem Erzeugnisse für den ursprünglichen Zweck, für den sie bestimmt waren, wiederverwendet werden (§ 3 Abs. 21 KrWG). Zu der VzWv gehört jedes Verwertungsverfahren der Reparatur, Prüfung und Reinigung. Die zu Abfall gewordenen Produkte werden dabei so vorbereitet, dass sie für den ursprünglichen Zweck wiederverwendet werden können (§ 3 Abs. 24 KrWG). Das bedeutet, dass Geräte, derer sich der Letztbesitzer entledigen will, bis zur Wiederverwendung eine Abfalleigenschaft besitzen. Durch die VzWv endet die Abfalleigenschaft und durch die Wiederverwendung werden die Geräte erneut zu einem Produkt, das für denselben Zweck verwendet werden kann (Schomerus et al. 2014). Gegenstände, die zu Abfall geworden sind, verbleiben so lange in der Abfalleigenschaft, bis die Voraussetzungen nach § 5 KrWG erfüllt sind (vgl. Abschnitt 2.4.2). Derzeit liegen für den Anteil von gebrauchten PV-Modulen, die in die Wiederverwendung gehen, keine Literaturdaten vor (Sander et al. 2018). Reparaturbetriebe gehören nicht zu den EBA. Bei diesen Geräten liegt im Normalfall kein Entledigungswille des Besitzers vor, vorausgesetzt, dass diese Geräte nach der Reparatur weiterverwendet werden (LAGA 2017).

Im Rahmen dieser Arbeit wird an bestimmten Stellen zwischen zwei Wiederverwendungsformen unterschieden, da es sich hierbei um verschiedene Zwischenschritte bis zur Wiederverwendung handelt. Bei der Wiederverwendung_{AA} handelt es sich um PV-Module, die durch den direkten Weiterverkauf über Gebrauchtmärkte an den nächsten Nutzer gelangen, ohne dass sie eine Abfalleigenschaft erhalten. Die Wiederverwendung_{IA} fällt unter die im KrWG erwähnte Definition. Die PV-Module, die dabei ins Abfallregime fallen und anschließend in die Wiederverwendung_{IA} gelangen, werden demnach in den Mengenmitteilungen erfasst (u. a. § 26ff. ElektroG). Befinden sich die Module zu keiner Zeit im Abfallregime und gelangen direkt in die Wiederverwendung_{AA}, erscheinen diese nicht in den Mengenmitteilungen. Dabei ist die Abfalleigenschaft und die VzWv vor der Wiederverwendung_{IA} von Bedeutung. Im Weiteren werden die Indizes verwendet, wenn der Weg bis zur Wiederverwendung entscheidend ist. Abbildung 10 verdeutlicht die Abgrenzung der beiden Begriffe.

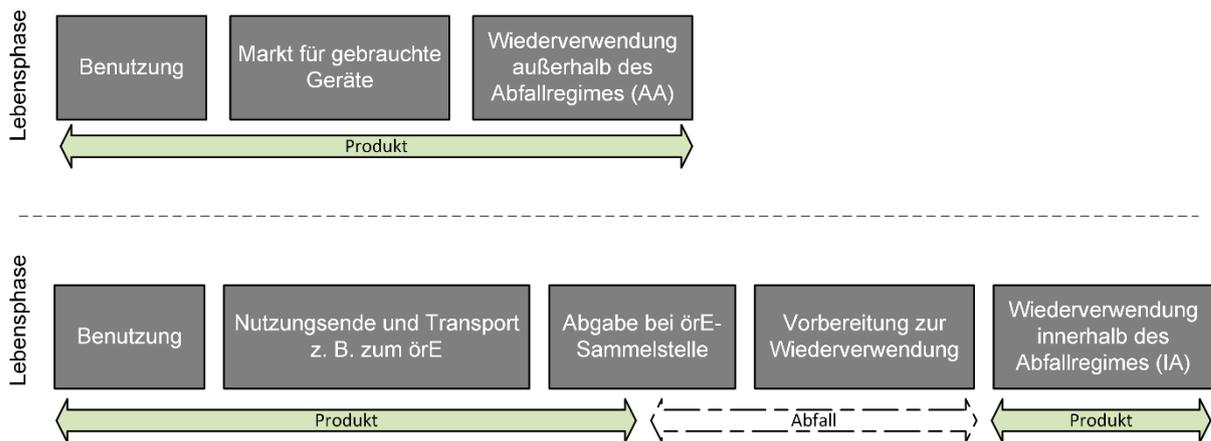


Abbildung 10: Abgrenzung der Wiederverwendung innerhalb und außerhalb des Abfallregimes, eigene Darstellung, angelehnt an Schomerus et al. (2014)

Es kommt vor, dass die bisherigen PV-Module nicht mehr die gewünschte Leistung erzielen und aufgrund eines Repowering die Anlage ausgetauscht werden soll. Da es sich dabei noch um technisch intakte Anlagen handeln kann, können diese als Produkt für den ursprünglichen Zweck, wenn auch mit geringerer Leistung, wiederverwendet werden. Durch eine verlängerte Nutzungsdauer der PV-Module kann der Energie- und Ressourcenverbrauch für die Produktion von kompletten Neugeräten und Emissionen reduziert sowie Abfälle vermieden werden.

Anschließend sollen die Möglichkeiten eines Zweitmarkts für gebrauchte Module, die in die Wiederverwendung gehen, kurz dargestellt werden.

4.1 Wiederverwendung in der Praxis

Es gibt bereits einige Händler, die gebrauchte PV-Module verkaufen. Zum Beispiel das Unternehmen SecondSol GmbH kauft und verkauft unter anderem gebrauchte PV-Module und einzelne Komponenten wie Kabel oder Wechselrichter. Das Angebot erklärte sich im Jahr 2014 unter anderem durch zahlreiche Insolvenzen von Modulherstellern, was zu einem fehlenden Ersatz für Module führte. Zudem werden bei der Plattform Module angeboten, die nicht mehr produziert werden. Des Weiteren gibt es Original Equipment Manufacturer, auch Erstausrüster genannt, welche Module produzieren aber nicht selbst in den Handel bringen. Die Produkte werden zum eigenen Verkauf an andere Firmen geliefert, welche die Produkte leicht modifizieren und unter ihrem Namen verkaufen können (Joule 2014; ruhlamat Germany). Vertreiber oder Installateure wissen nicht, welche Hersteller hinter den Namen stehen. Bei benötigtem Ersatz kommt es vor, dass der Lieferant insolvent geworden ist oder den Modultyp nicht mehr auf Lager hat. Daneben gibt es noch das Unternehmen pvXchange Trading GmbH, welches z. B. gebrauchte Module und Wechselrichter anbietet (Joule 2014). Das Unternehmen pvXchange Trading GmbH bietet zusätzlich die Möglichkeiten einer Prüfung oder einer Reparatur an. Dies kann vor Ort und im Servicecenter erfolgen. Die Qualitäts- und Leistungstests

werden durch Subunternehmen (Standort Bremen) durchgeführt. Auf der Website werden die verschiedenen Tests aufgelistet (pvXchange Trading GmbH o.J.).

Neben den erwähnten Unternehmen gibt es im Internet diverse andere Händler, die gebrauchte Module verkaufen.

Rinivasol Global Services B.V. ist ein weiteres Unternehmen, das verschiedene Dienstleistungen im Bereich der Photovoltaik anbietet. Zu den Leistungen gehört der Ankauf von gebrauchten Modulen, die Sanierung²⁴ vor Ort sowie das Recycling. Beispielsweise werden in Chile, Brasilien oder Südafrika, die PV-Module eingesammelt, saniert und wieder dem regionalen Wirtschaftskreislauf zugeführt. Nach Angaben des Unternehmens wurden mehr als eine Millionen Module aufgearbeitet und davon nur eine geringe Zahl dem Recycling zugeführt. Als weitere Dienstleistung wird das Recycling der Module mit einer Recyclingquote von nahezu 100 % angeboten, die Durchführung erfolgt mit mobilen Zerlegungseinheiten bei den Landespartnern vor Ort. In dem Prozess wird nach dem Freischlagen der Bestandteile der Module die Fraktionen anschließend sortiert (Rinivasol Global Services B. V. 2022, o.J.). Genauere Informationen über den Recyclingprozess konnten nicht ermittelt werden, weshalb das Unternehmen in Abschnitt 5 nicht weiter erwähnt wird.

4.2 Vorbereitung zur Wiederverwendung nach ElektroG und LAGA

Die VzWv gehört zu den Arten einer Erstbehandlung (§ 3 Nr. 24 ElektroG). Die Erfassung muss nach § 10 Abs. 2 ElektroG so ausgeführt werden, dass eine VzWv nicht beeinträchtigt wird. Im Abschnitt 4 „Behandlungs- und Verwertungspflichten, Verbringung“ des ElektroG wird angegeben, dass vor einer Erstbehandlung zunächst überprüft werden soll, ob das Altgerät einer VzWv zugeführt werden kann, sofern die Prüfung wirtschaftlich zumutbar und technisch möglich ist, bevor das Altgerät zu weiteren Verwertungs- oder Beseitigungsmaßnahmen gelangt (§ 20 Abs. 1 ElektroG). Das bedeutet, dass erst eine Sichtprüfung oder ähnliches erfolgen muss, bevor das Produkt einer VzWv zugeführt wird. Diese Tätigkeiten werden nicht den Tätigkeiten einer Erstbehandlung zugeordnet, sondern erfolgen davor. In der Regel erfolgen Prüftätigkeiten dieser Art bei der EBA, alternativ dazu können diese an den Rücknahmestellen nur im Fall der Opt bei örE oder bei Herstellern oder Vertreibern durchgeführt werden (LAGA 2017). Zur VzWv gehört die Reparatur, Prüfung und die Reinigung eines Erzeugnisses (§ 3 Abs. 24 KrWG). Seit der Novellierung des ElektroG zum 01. Januar 2022 können zertifizierte EBA und örE eine Kooperation zum Zweck der VzWv vereinbaren (§ 17b Abs. 1 ElektroG).

²⁴ Dazu gehören Reparatur und Refurbishing (Überholung bzw. Instandsetzung).

4.3 Vorbereitung zur Wiederverwendung in der Praxis

Mithilfe des Fragebogens aus Anhang C sollte die VzWv in der Praxis aufgezeigt werden. Die Fragen sollten Auskunft geben, welche Entscheidungskriterien bei der Überprüfung auf Wiederverwendung_{IA} maßgebend sind, wie das Prüfverfahren abläuft und welche Potenziale für die Wiederverwendung_{IA} von PV-Modulen vorhanden sind. Zudem wurde in Erfahrung gebracht, ob und welche Richtlinien in der Praxis genutzt werden, da diese den Stand der Technik festlegen. Für die Darstellung werden im Folgenden nur die relevanten Antworten zu dem Fragebogen verwendet.

4.3.1 Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger in Hessen

Bei der Auswertung der Umfrage für die örE in Hessen wurde festgestellt, dass 21 von 22 Betrieben in den Jahren 2018 – 2021 nicht geprüft haben, ob die Module für eine VzWv geeignet wären. Bei einem Betrieb, der angab die Tätigkeit auszuführen, konnte nicht in Erfahrung gebracht werden, inwiefern diese stattfindet (siehe Anhang B). Dass die meisten Betriebe in den Jahren 2018 – 2021 nicht geprüft haben, ob PV-Module für eine VzWv geeignet wären, ist auf § 14 Abs. 5 ElektroG zurückzuführen, da die Tätigkeit mit einer Separierung verbunden wäre. Diese ist nur zulässig, wenn örE die jeweilige SG optieren.

Auch in den Jahres-Statistik-Mitteilungen der stiftung ear wurden bis zum Jahr 2021 in der SG 6 keine Mengen in Folge der Opt angegeben (stiftung ear 2022d).

4.3.2 Erstbehandlungsanlage - HME Hamburger Müllentsorgung Rohstoffverwertungsgesellschaft mbH

Die HME Hamburger Müllentsorgung Rohstoffverwertungsgesellschaft mbH (HME) gehört zu der Buhck-Gruppe und zählt zu den zertifizierten EBA nach § 21 ElektroG. Das Unternehmen bietet verschiedene Dienstleistungen im Bereich Photovoltaik in ganz Deutschland an. Zu dem Rückbau und dem Transport der Anlagen gehört auch die VzWv von kompletten PV-Modulen und die Entsorgung von diesen. Die wiederverwendbaren PV-Module sollen für den Austausch einzelner defekter Module in Großanlagen genutzt oder alternativ eine ganze Anlage damit errichtet werden (HME 2022). Seit Ende 2016 werden bei der HME PV-Module behandelt, dabei gingen jährlich 500 – 1000 t in die VzWv (Krause 2022b).

Zu den Kunden gehören private Haushalte sowie Endnutzer aus anderen als privaten Haushalten. Angenommen werden Modultypen aller Art. Nach Äußerung des Entledigungswillens des Endnutzers, bietet die Firma verschiedene Dienstleistungen an. Dazu gehören unter anderem die Demontage und der Transport der Module. Um Beschädigungen zu vermeiden, bevorzugt das Unternehmen so früh wie möglich in den Rückbau und den Transportprozess

eingebunden zu werden. Je nach Rahmenhöhe und Gewicht der Module werden 25-30 Module auf eine spezielle Palette (z. B. 1,1 m x 1,8 m) gelegt, um diese vor Stößen an den Rändern zu schützen. Dabei wird darauf geachtet, dass die Rahmen der Module bündig aufeinander liegen. Der Stapel wird mit Kunststoffbändern gebändert, um ein Verrutschen der Module zu vermeiden. Durch diese Transportvorrichtung wird eine geringe Ausschussrate erzielt. Eine weitere Transportmöglichkeit bieten Ständervorrichtungen. Für die Wiederverwendung sind zwei Faktoren wichtig. Zum einen muss es für den Modultypen ausreichend Nachfrage auf dem Gebrauchtmart geben. Zum anderen spielen die Leistungsfähigkeit und das Alter eine Rolle. Zu den Voraussetzungen gehört, dass die Module nicht älter als 10 Jahre alt sind und mindestens 200 W aufweisen. Zu Beginn wird eine optische Vorkontrolle durchgeführt, um sichtbare Beschädigungen der Module zu identifizieren. Falls keine groben Beschädigungen sichtbar sind, werden die Module auf digitaler Ebene anhand des Typenschildes erfasst. Dem Datenblatt kann entnommen werden mit welchen technischen Leistungen das Modul deklariert ist, anschließend erfolgen Prüf- und Messverfahren in einer mobilen Anlage. Über einen Flash-test wird die Modulrestleistung bestimmt. Eine Elektrolumineszenz-Prüfung detektiert Mikrorisse in den Solarzellen. Um Schutz vor Fehlströmen und Überhitzung/Brandgefahr zu gewährleisten, wird ein Diodentest durchgeführt. Mithilfe eines HighPot-Tests kann der Isolationswiderstand gemessen werden, welcher Auskunft über die elektrische Sicherheit gibt. Die Ergebnisse werden für jedes Modul in einem Protokoll zusammengefasst (Krause 2022a).

Die Wiederverwendungsquote liegt bei der HME bei 70 % (Krause 2022a). Die Module gehen zur Wiederverwendung_{IA} zu diversen Vertriebern, wie z. B. Online-Plattformen oder im Falle des Recyclings zu verschiedenen Recyclinganlagen, die sich teilweise außerhalb von Deutschland befinden. In der Zukunft wird die Tätigkeit durch eine stationäre Prüfanlage ergänzt, über welche das Vier- bis Fünffache des aktuellen Durchsatzes möglich sein wird (Krause 2022b). Maßgeblich sind für die Prüfung neben dem KrWG, dem ElektroG und der LAGA M31A und B, die VDI-Richtlinie EN50614 VDE 0042-614:2021-12²⁵ (Krause 2022a).

4.3.3 Weitere Erstbehandlungsanlagen und andere

Für die Suche wurde das Verzeichnis der Betreiber von EBA der stiftung ear herangezogen, um EBA in Hessen anhand der Postleitzahlen ausfindig zu machen. Für Hessen wurden insgesamt 30 EBA im Verzeichnis gefunden.²⁶ Zum Teil wurde die Behandlung der Module durch die Beschreibung der Tätigkeiten ausgeschlossen. Die Art der Tätigkeit gab nicht bei allen

²⁵ Titel: Anforderungen an die Vorbereitung zur Wiederverwendung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE)

²⁶ Es kann nicht garantiert werden, dass zu dem Zeitpunkt der Recherche (August 2022) eine vollständige Auflistung aller Betriebe vorlag.

Betrieben ausreichend Auskunft darüber, ob PV-Module behandelt werden. Durch telefonische Anfragen²⁷ wurde festgestellt, dass sechs Betriebe PV-Module annehmen und deren weiterer Verwertungsweg über die stiftung ear bzw. durch PV Cycle geregelt wird. Insgesamt konnten über das Verzeichnis nur zwei weitere EBA anhand der Art der Tätigkeit in Deutschland ermittelt werden, bei welchen die PV-Module in die VzWv gehen. Über eine persönliche Mitteilung wurde durch eine der EBA mitgeteilt, dass die Tätigkeit nicht mehr durchgeführt wird und die Beschreibung im Verzeichnis nicht mehr aktuell sei. Bei der zweiten EBA handelt es sich um MWH Mittermeier e.K. (stiftung ear 2022e), bei welcher auf Anfragen keine weiteren Informationen über die VzWv verfügbar waren. Erst seit dem 01. Januar 2022 müssen die EBA die behandelnden Kategorien und die Tätigkeiten angeben, weshalb sich das Verzeichnis derzeit in Bearbeitung befindet und noch veraltete Einträge zu finden sind (stiftung ear 2022a).

In der EBA der First Solar GmbH und in dem Prozess²⁸ der FLAXRES GmbH ist zurzeit keine VzWv vorgeschaltet. Die Module kommen laut Herrn Staudt-Fischbach (2022a) bereits beschädigt bei der Anlage von First Solar an. Für die Zukunft ist in beiden Fällen keine VzWv vorgesehen²⁹.

Eine VzWv wird bei der Reiling Unternehmensgruppe ausschließlich an dem neuen PV-Recycling Standort Münster, welcher voraussichtlich im Juni 2023 vollends in Betrieb genommen werden soll, stattfinden. Dabei handelt es sich um eine stationäre Prüfstation, mit welcher folgende Mess- und Prüfverfahren durchgeführt werden:

- Leistungsmessung (tÜV-zertifizierter Flasher),
- Elektrolumineszenz,
- Diodentest,
- HiPot-Test,
- Grounding-Test,
- Isolationswiderstandstest

Für die VzWv wird eine sachgemäße Handhabung vorausgesetzt, um Beschädigungen zu vermeiden (Fislake 2022a).

4.4 Abweichende Abfallmengen und Exporte ins Ausland

Destatis meldete im Jahr 2020 eine erfasste Menge von 15.400 t. Die prognostizierte Menge vom UBA für das Jahr 2020 lag bei 51.600 t (siehe 2.1). Marktteilnehmer äußern einen hohen prozentualen Anteil von exportierten PV-Modulen, zu welchen auch illegale Exporte zählen

²⁷ Während des Zeitraums konnten zwei Betriebe telefonisch nicht erreicht werden.

²⁸ Es handelt sich bei der FLAXRES GmbH um mobile Anlagen. Mehr dazu in Kapitel 5.3.2.

²⁹ Staudt-Fischbach 2022a; FLAXRES GmbH 2022a.

(Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021), was durch Herrn Krause (2022b) bestätigt wurde. Nach Sander et al. (2018) gibt es zudem keine Literaturdaten zu Exportmengen von PV-Modulen, was sich durch eigene Recherchen bestätigte.

Es gibt mehrere Gründe, wieso die erfasste Menge von Prognosen abweicht. Erfassungssysteme funktionieren nicht ausreichend, die Module überschreiten ihre zu erwartende Lebensdauer, werden als funktionstüchtige Geräte exportiert oder innerhalb Deutschlands auf den Zweitmarkt gebracht und tauchen deshalb nicht in den Statistiken des Abfallregimes auf (Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021). Nach INTERPOL (2020) wurden im Jahr 2019 Dreiecksgeschäfte von Europa nach Afrika aufgedeckt, bei welcher eine große Zahl von PV-Modulen gehandelt wurden.

5 Technische Möglichkeiten zur Rohstoffrückgewinnung

Nachfolgend werden die in Deutschland aktuellen rechtlichen Vorgaben und weitere Behandlungsanforderungen, praktizierte Verfahren sowie andere Beispiele aufgelistet. Die in der Literatur auffindbaren Daten zur Entwicklung der jeweiligen PV-Technologie-Anteilen in Deutschland seit dem Jahr 1998 sind in Abbildung 11 zu sehen. Bei einigen Werten handelt es sich um prognostizierte Werte, mehr dazu ist in dem Bericht von Sander et al. (2016) zu finden. Über die Jahre wurde die c-Si-Technologie mit Abstand am häufigsten installiert. Diese wird auch laut diverser Prognosen (CENELEC 2018; Heath et al. 2018) den dominierenden Marktanteil ausmachen.

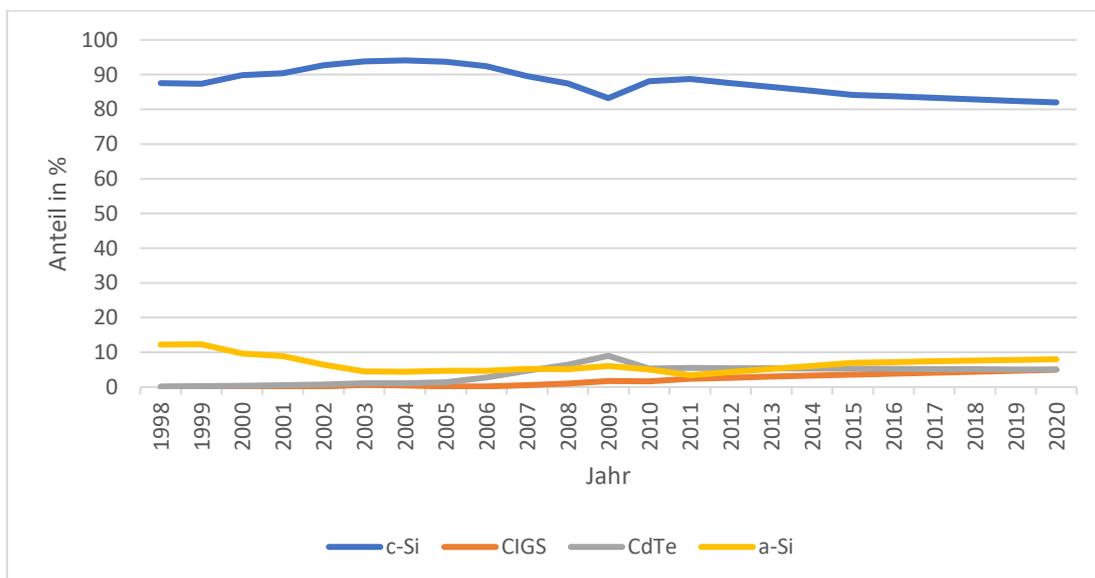


Abbildung 11: PV-Technologie-Anteile von 1998 bis 2020, eigene Darstellung nach Sander et al. (2016), Anteile der c-Si-Module ergänzt durch Wolf et al. (2017)

Aufgrund der unterschiedlichen stofflichen Zusammensetzungen der PV-Technologien wird das Recyclingsystem vor verschiedene Herausforderungen gestellt. Neben den möglichst einfachen und kostengünstigen Verfahrensschritten nach modernem Stand der Technik müssen die vorgegebenen Verwertungsquoten und Kostenziele eingehalten werden. Des Weiteren soll eine Zusatzbelastung der Umwelt durch Behandlungs- und Verwertungsverfahren vermieden werden. Darüber hinaus müssen die Verfahren flexibel sein, um mit den kommenden Abfallmengen die mögliche Durchsatzmenge zu erreichen (Sander et al. 2007).

5.1 Stand der Technik und Anforderungen an eine adäquate Behandlung

Im Folgenden werden die rechtlichen Vorgaben für die Behandlung von EAG sowie Behandlungsanforderungen unter verschiedenen Aspekten aufgezeigt.

5.1.1 Rechtliche Vorgaben

Erstbehandlung und weitere Behandlungen sind nach dem Stand der Technik³⁰ auszuführen (§ 3 Abs. 28 KrWG). Die EAG-BehandV legt spezialisierte Anforderungen für die Aufbereitung von PV-Modulen fest. In § 10 Abs. 1 ist festgelegt, dass siliziumbasierte und nicht-siliziumbasierte PV-Module getrennt voneinander zu behandeln sind. Eine gemeinsame Behandlung verschiedener Modultechnologien ist möglich, sofern die Schadstoffgrenzwerte eingehalten werden. In Tabelle 7 werden die Anforderungen an die Behandlung von PV-Modulen durch die Grenzwerte für die Schadstoffe Pb, Se und Cd nach § 10 EAG-BehandV festgelegt.

Tabelle 7: Grenzwerte für die Behandlung von silizium- und nicht-siliziumbasierten-Modulen, eigene Darstellung nach § 10 EAG-BehandV

Schadstoff	Grenzwert $\left[\frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right]$			
	siliziumbasiert		Nicht siliziumbasiert (Gilt nicht für die Halbleiterfraktion)	Silizium und nicht-siliziumbasiert (Gilt nicht für die Halbleiterfraktion)
Fraktionen	Glas	Weitere	Glas + Weitere	Glas + Weitere
Blei	100	200	10	10
Selen + Cadmium (jeweils)	1	1	1	1

Neben den Grenzwerten für die Behandlung von PV-Modulen wird in § 10 Abs. 5 EAG-BehandV vorgegeben, dass Al sowie Cd und Te getrennt und anschließend einem Recycling zugeführt werden sollen. Für den Einsatz der Glasfraktion als Rohstoff für die Behälter- oder Flachglasherstellung, darf der Gehalt an Eisen-Partikeln $2 \frac{\text{g}}{\text{t}}$ und an Nicht-Eisen-Partikeln $3 \frac{\text{g}}{\text{t}}$ nicht überschreiten (LAGA 2018). Die gemeinsame Behandlung von siliziumbasierten und nicht-siliziumbasierten Modultechnologien ist aktuell nach der EAG-BehandV zulässig, dies soll mögliche Zukunftstechnologien zur gemeinsamen Behandlung von PV-Modulen nicht verhindern. Derzeit wird eine gemeinsame Behandlung von PV-Modulen beider Typen entwickelt

³⁰ In Anlage 3 des KrWG sind die Kriterien zur Bestimmung des Standes der Technik aufgelistet. Für den Begriff wird häufig auch „Beste verfügbare Technik“ (Kurzform BVT) genutzt (Kraus et al. 2015).

(Kummer et al. 2020). Die Rückgewinnung von kritischen Stoffen wie In, Ga und Si ist rechtlich nicht vorgegeben (Sander et al. 2018).

5.1.2 Behandlungsanforderungen und Motivation

Zu den Anforderungen gehört eine möglichst vollständige und zerstörungsfreie Erfassung der Module (Sander et al. 2004). Aktuell müssen Dünnschichtmodule bei der EBA von Dickschichtmodulen getrennt werden, da es derzeit für siliziumbasierte und nicht-siliziumbasierte Module spezialisierte Anlagen gibt (Rechenberg et al. 2019), dies ist durch die Kennzeichnung und durch Fachleute über Datenblätter möglich (LAGA 2018). Für die Lagerung sollten die in Abschnitt 3.4 erwähnten Anforderungen berücksichtigt werden.

Rahmen, Backrail (sofern vorhanden) und Anschlussdose sowie Kabel sind zu entfernen und einer geeigneten Verwertung zuzuführen (LAGA 2018). In Abbildung 12 werden die in PV-Modulen enthaltenen Bauteile und Werkstoffe sowie die Wert- und Schadstoffe dargestellt, die aus diesen Bauteilen oder Werkstoffen zurückgewonnen oder entfrachtet werden können.

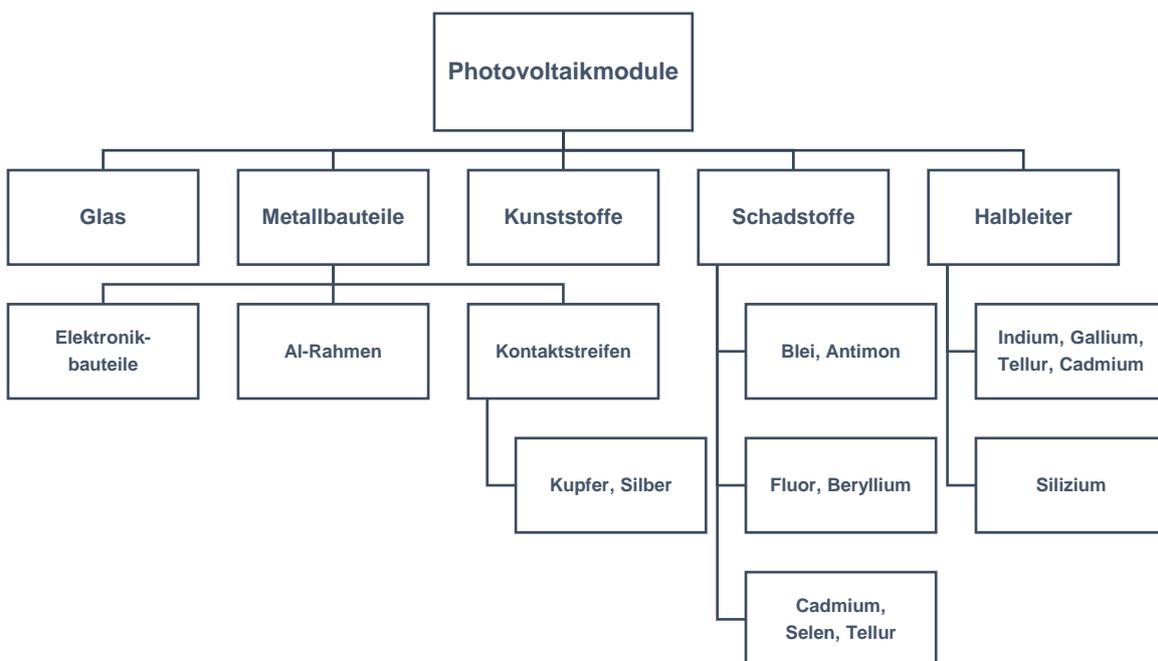


Abbildung 12: Bauteile und Werkstoffe verschiedener PV-Module und die möglichen enthaltenen Wertstoffe, angelehnt an Rechenberg et al. (2019)

Abbildung 13 zeigt beispielhaft die wertbezogene Betrachtung eines c-Si-Moduls. Dabei wird deutlich, dass die zusätzliche Rückgewinnung von Si und Ag einen bedeutenden Faktor für die Rentabilität des Kreislaufwirtschaftssystem darstellt (Dirr 2016).

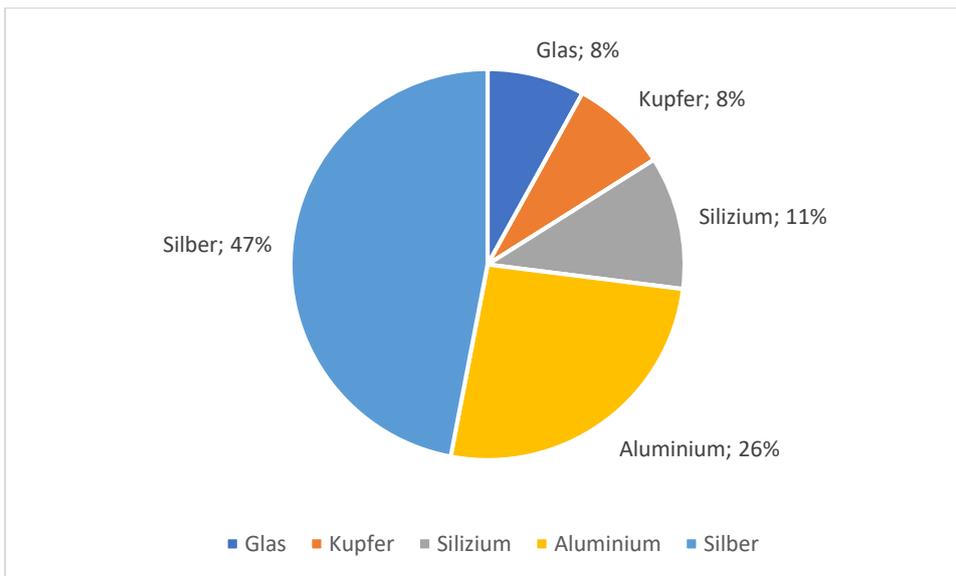


Abbildung 13: Wertbezogene Betrachtung der Rohstoffinhalte eines c-Si-Moduls nach Raithel (2014), zitiert nach (und angelehnt an) IRENA (2016)

Nach den Behandlungsanforderungen von EAG unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten des UBA soll eine vorrangige Verwertung des Glases als Flach- oder Behälterglas angestrebt werden, da durch die Substitution von Primärflachglas eine hohe GWP³¹-Entlastung erreicht werden kann. Derzeit sind häufig starke Verunreinigung in der Glasfraktion durch Folienanhaftungen, NE-Metallrückstände und Halbleiterbestandteile ein Problem, weshalb eine saubere Trennung von Glas- und nicht-Glas-Fractionen notwendig ist. Dies wird durch Verfahren erzielt, bei welchen ein schonender Aufschluss des Verbundes erfolgt (Sander et al. 2018). Zudem wird eine konzentrierte Gewinnung von potenziellen Schadstoffen mit diesen Prozessen ermöglicht (Dobra et al. 2020). Eine vergleichende Lebenszyklusanalyse der verschiedenen Verwertungswege des Glases (als Flachglas, Behälterglas oder Schaumglas etc.) wäre für weitere Diskussion zu Behandlungsanforderungen sinnvoll (Sander et al. 2018).

Durch die Demontage des Aluminiumrahmens vor der Zerkleinerung wird die hochwertigste Verwertung ermöglicht. Die Abscheidung von Al kann auch erst nach einem mechanischen Aufschluss der Module erfolgen und ist großtechnisch etabliert. Durch die Rückgewinnung des Al wird eine Primärproduktion vermieden (Sander et al. 2018).

³¹ Global warming potential (GWP) oder auch CO₂-Äquivalent

Abbildung 14 zeigt Umwelt Be- und Entlastungen, die bei einem c-Si-Modulrecycling entstehen. Bei den Szenarien werden eine Nutzung und Rücknahme in Europa angenommen. Genauere Informationen sind in Hengstler et al. (2021) und in Wambach (2017) zu finden. Die positiven Werte stehen für eine Belastung der Umwelt, die negativen für eine Entlastung. Die Wirkungsabschätzungen zeigen, dass die Gutschriften die Umweltwirkungen der Prozessmittel überwiegen. In der Studie wird von einem Primärmaterial von 100 % in der Herstellungsphase ausgegangen, was sich auf die Gutschriften bei Al und Cu auswirkt. Bei den Gutschriften ist vor allem die Rückgewinnung von Cu und Al von Bedeutung. Die Gutschriften des Kupferrecyclings wirken sich im AP und POCP positiv aus. Negativ wirkt sich die thermische Verwertung der Kunststoffe bei AP, EP und POCP durch geringe Gutschriften aus. Die CO₂-Emissionen der Kunststoffverbrennung wirken sich im GWP negativ aus. Die negativen Transporte im POCP sind durch den negativen Charakterisierungsfaktor des Stickstoffmonoxids³² auf die Abgasemission zurückzuführen. Die Ergebnisse sind bei Entscheidungsfindungen kritisch zu hinterfragen (Hengstler et al. 2021). Nach Sander et al. (2007) trägt die Rückgewinnung von Si stark zur Verringerung des Treibhausgaspotenzials sowie zur Verringerung des Abbaus der Ozonschicht und des abiotischen Abbaus bei (Kummer et al. 2020). Zu den Haupttreibern für eine hochwertige Verwertung gehören der hohe Energieaufwand bei der Produktion der c-Si-Module (vgl. Abschnitt 2.2.1) oder die enthaltenen kritischen Stoffe (vgl. Abschnitt 2.2.3).

³² Die Thematik wird in dem Bericht von Hengstler et al. 2021 auf Seite 127 genauer erläutert.

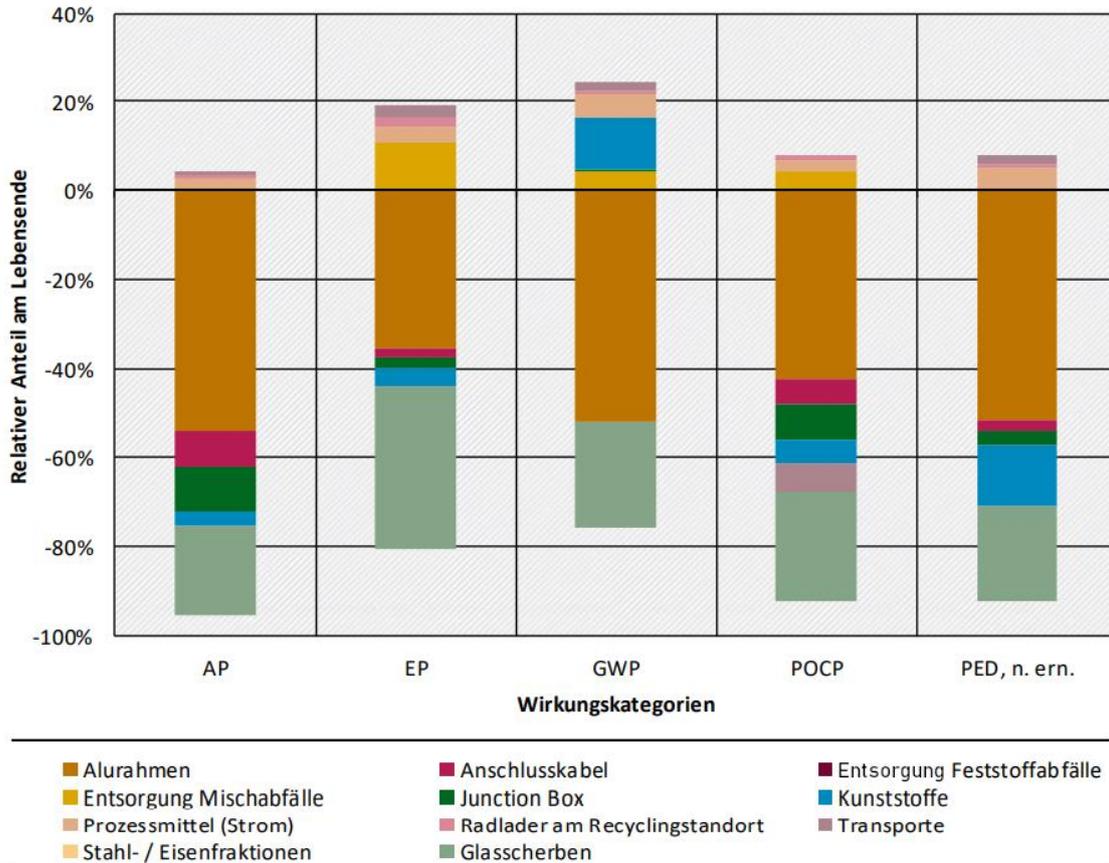


Abbildung 14: Ergebnisse des c-Si PV-Modulrecyclings, relative Darstellung, abgeändert nach Hengstler et al. (2021)^{33 34}

Die Rückgewinnung von Cd und Te aus CdTe-Modulen ist mit einem höheren Aufwand verbunden als die Verfahren, bei welchen das Glas als Massenfraktion abgetrennt wird. Für die Rückgewinnung muss erst ein Aufschluss des Modulverbundes und dann die Trennung sowie die Raffination von Cd und Te erfolgen. Die Rückgewinnung von Cd und Te wird als Stand der Technik angesehen (Sander et al. 2018). Sofern eine Verwertung der Materialien von CdTe-Modulen erfolgt, kann das Recycling zu einer Verringerung der Ökobilanzergebnisse führen. In Abbildung 15 ist die Wirkungsabschätzung des CdTe-Modulrecyclings dargestellt. Die Umweltwirkungen werden durch den Stromverbrauch und durch das Prozessmittel Wasserstoffperoxid verursacht. Die in AP, EP und GWP hohen Beiträge der Transporte sind auf die in den Sachbilanzdaten angenommenen Transportstrecken von ca. 700 km zurückzuführen. Aufgrund der negativen Wirkungsfaktoren der Stickstoffmonoxide im POCP, haben die Transporte

³³ Acidification Potential (AP), Eutrophication Potential (EP), Photochemical Ozone Creation Potential (POCP) oder auch photochemical oxidation potential, Primary Energy Demand from Non-renewable Energy Sources (PED, n. ern.)

³⁴ Quelle: Berechnungen Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP basierend auf PVPS

im POCP negative Werte, weshalb diese im POCP Charakterisierungsmodell kritisch zu hinterfragen sind (Hengstler et al. 2021).

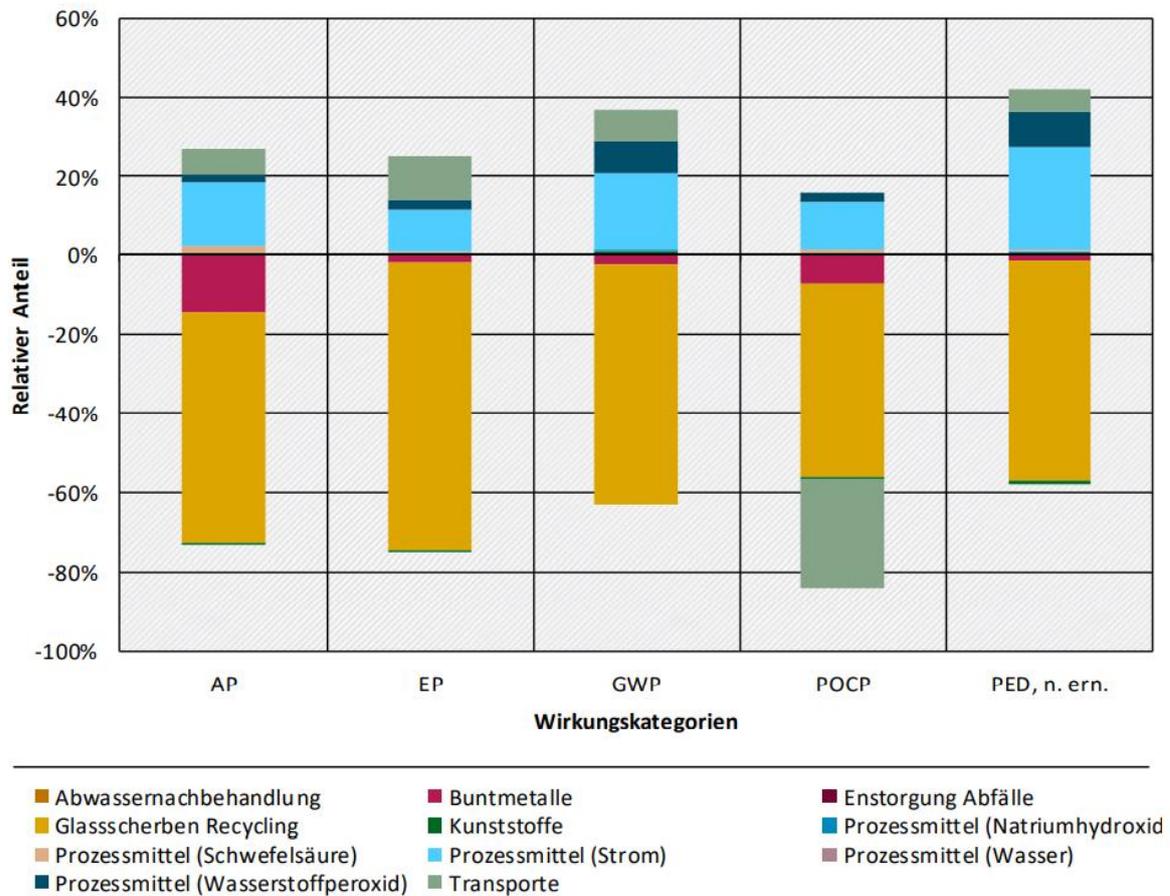


Abbildung 15: Wirkungsabschätzung des CdTe-PV-Modulrecyclings nach Hengstler et al. (2021)³⁵

Die Rückgewinnung von In, Ga und Si (vgl. Abschnitt 2.2.3) kann zur Versorgungssicherheit beitragen, da diese zu den kritischen Rohstoffen zählen.

Für ein Recycling der Kunststoffe müssten diese sortenrein wiedergewonnen werden. Die Kunststoffe der PV-Module waren viele Jahre der Witterung ausgesetzt, was Auswirkungen auf die Qualität des Rezyklates hat (Kernbaum und Hübner 2013).

Da es bei der Zerkleinerung zu Staubemissionen kommt, ist eine staubdichte Zerkleinerungsanlage mit Absaugung erforderlich, um die Sicherheit des Anlagenpersonals zu gewährleisten und Umweltbelastungen zu vermeiden (Lohmann und Scholz 2019). Es erfolgt nicht immer eine Erfassung des Staubes am Entstehungspunkt. Zum Teil werden derzeit die Module beim

³⁵ Quelle: Berechnungen Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP basierend auf PVPS

mechanischen Zerkleinerungsprozess mit Wasser befeuchtet. Zurzeit sind keine Daten zu Mengen von freigesetzten Stäuben bekannt (Kummer et al. 2020).

Für Sb und Be gelten keine besonderen Behandlungsanforderungen bzw. Anhaltspunkte (Sander et al. 2018). Die Rückgewinnung von Ge wird in den Berichten von Sander et al. (2018) und Kummer et al. (2020) nicht berücksichtigt.

5.2 Aufbereitungstechniken

Abbildung 16 stellt eine allgemeine Übersicht der erprobten und teilweise im größeren Maßstab praktizierten Recyclingprozesse für PV-Module dar. Übersichten mit Vor- und Nachteilen der im Pilot- und Industriemaßstab praktizierten Aufbereitungsverfahren in der Vergangenheit sind in den Berichten von Lunardi et al. (2018) und Tao und Yu (2015) zu finden.

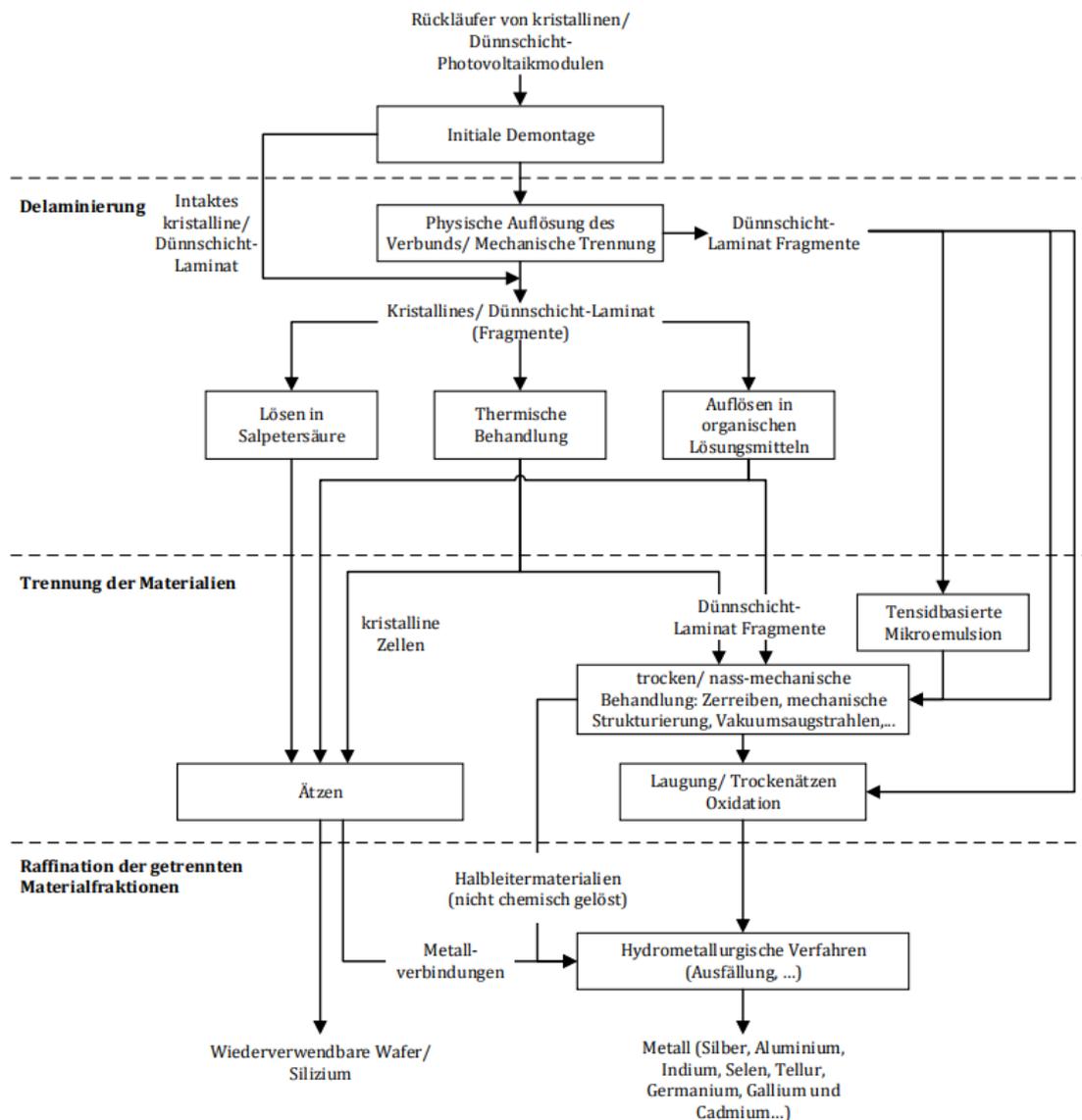


Abbildung 16: Recyclingprozesse für PV-Module nach Tao und Yu (2015), übersetzt von Dirr (2016)

In den Jahren 1995 bis 2016 gab es in verschiedenen Ländern überwiegend Patente für mechanische Verfahren (40 %) gefolgt von kombinierten (25 %), chemischen (19 %), thermischen (15 %) und optischen Verfahren (1 %) (Heath et al. 2018).

Tabelle 8 gibt eine Übersicht über damals vorkommende Behandlungsverfahren. Dabei wird deutlich, dass überwiegend Kombinationsverfahren vertreten waren. Die Verfahren von Sunicon und Saperatec³⁶ konnten aufgrund der geringen Mengen an PV-Altmodulen und Produktionsabfällen nicht wirtschaftlich betrieben werden, weshalb die Anlagen eingestellt wurden (Wolf et al. 2017). Solarcycle wurde im Jahr 2014 aufgelöst und die von Lobbe geplante Pilotanlage für 2013 auf unbestimmte Zeit verschoben (Heckler 2017). Die Verfahren von First Solar und Reiling werden nach wie vor praktiziert.

Tabelle 8: Übersicht der Behandlungsverfahren (Stand 2012), abgeändert nach Beckmann (2012)

	Modultyp für Recycling	Verfahrenstechnik
Sunicon	c-Si-Module	Kombination thermischer, physikalischer, chemischer Verfahrensschritte
Solarcycle	c-Si-Module, Dünnschichtmodule (CIS, CIGS)	Kombination thermischer, physikalischer, chemischer Verfahrensschritte
First Solar	CdTe-Module	Zerkleinerung, Kombination, Trocken- und Nassprozesse
Losier Chemie	Waferbruch, Dünnschichtmodule (CIS, CIGS, CdTe)	Verbundöffnung, chemische Behandlung der Halbleiterschichten
Saperatec	Dünnschichtmodule (CIS, CIGS, CdTe)	Trennung von Verklebung und Beschichtungen mit Hilfe von Tensiden
Lobbe	c-Si-Module, Dünnschichtmodule (CIS, CIGS, CdTe)	Kombination aus Kälteschockversprödung und chem. - physikalischer Behandlung
Reiling	c-Si-Module	Rein mechanische-physikalische Aufbereitungs- und Sortiertechnik

³⁶ Telefonische Auskunft von Saperatec (30.06.2022)

In Tabelle 9 werden die Stärken und Schwächen von thermischen, chemischen und mechanischen Verfahren nach Heckler (2017) erläutert, die gleichzeitig als Auswahlkriterien für potenziell nutzbare Technologien dienen.

Tabelle 9: Vor- und Nachteile der grundlegenden Verfahrensansätze zur Delaminierung c-Si-Module, angelehnt an Heckler (2017)

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Mechanisch	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Einsatz von Chemikalien notwendig • Keine Abgasreinigung 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorausgehende Abtrennung der Modulrahmen • Entsprechende Vorbehandlung der Module notwendig • Rückgewinnung unbeschädigter Wafer, des Glases und der Rahmung zur Wiederverwendung oder -verwertung nur beschränkt möglich
Chemisch	<ul style="list-style-type: none"> • Teilweise Rückgewinnung unbeschädigter Wafer, des Glases und der Rahmung zur Wiederverwendung oder -verwertung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Chemikalienverbrauch • Entsorgung der gebrauchten Chemikalien • Anpassung der eingesetzten Lösungen an stoffliche Zusammensetzung der Module notwendig • Behandlung von Abgasen und Abwässern • Hohe Behandlungsdauer zur Laminatsauftrennung notwendig • Vorausgehende Abtrennung der Modulrahmen • Zerkleinerung der Module förderlich
Thermisch	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Abtrennung der Aluminiumrahmung im Vorfeld notwendig • Keine Zerkleinerung der Module notwendig und damit Rückgewinnung unbeschädigter Zellen (zur weiteren Aufbereitung), des Glases und der Rahmung zur Wiederverwendung oder -verwertung möglich • Teilweise unabhängig von verschiedenen Modulmerkmalen • Vergleichsweise unkompliziertes Verfahren • Hohe Durchsätze erzielbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Emissionen und Notwendigkeit einer Abgasbehandlung (abhängig von stofflicher Zusammensetzung der Altmodule) • Entsorgung von Abfällen aus Rauchgasreinigung und von Verbrennungsrückständen • Bei Wirbelschichtfeuerung Entsorgung des kontaminierten Sandes und Staubentwicklung • Energiebedarf

5.3 Technische Verfahren aus der Praxis

In den folgenden Abschnitten werden die aktuell praktizierten Verfahren zur Rohstoffrückgewinnung aus PV-Modulen beschrieben. Dafür wurde zunächst über eine Internet- und Literaturrecherche nach in Deutschland vorkommenden EBA bzw. Pilotanlagen o.ä. gesucht und die Informationen, die durch den Fragebogen (Anhang D) oder über persönliche Mitteilungen ermittelt wurden, in den folgenden Abschnitten erläutert. In Abschnitt 5.3.4 werden weitere Verfahren kurz beschrieben, bei welchen Informationen nur über eine Literaturrecherche gefunden wurden.

5.3.1 Erstbehandlungsanlage - Reiling Glas Recycling GmbH & Co. KG

Die Reiling Unternehmensgruppe ist ein Recyclingunternehmen, welches sich die Sammlung, Verwertung und die Rückführung von Wertstoffen (wie z. B. Glas, Holz, Kunststoff (PET³⁷)) in den Materialkreislauf zur Aufgabe gemacht hat. Das PV-Recycling wird aktuell an den Standorten Torgau, Marienfeld und Osterweddingen durchgeführt und mit dem Kompetenzzentrum für Photovoltaik-Recycling am Standort Münster ergänzt, welches voraussichtlich im Juni 2023 in Betrieb genommen wird. An den bisherigen drei Standorten werden siliziumbasierte Dickschicht- und Dünnschichtmodule recycelt, dazu gehören mono- und polykristalline siliziumbasierte Module sowie amorphe siliziumbasierte Module. Hauptsächlich werden PV-Altmodule aus Deutschland aufbereitet, ein Teil kommt aus umliegenden Ländern. Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzungen der Modultypen durchlaufen diese jeweils verschiedene Anlagen. Bereits vorhandene starke Beschädigungen des Glases oder die Deformation von Modulen stellen bei dem Aufbereitungsprozess keine Probleme dar (Fislake 2022a).

Der rein mechanische Recyclingprozess beinhaltet als ersten Schritt eine Zerkleinerung des gesamten PV-Moduls. Aufgrund von Vorteilen in der Effizienz werden Aluminiumrahmen und Anschlussdosen nicht vorab entfernt, sondern mitzerkleinert. Die zerkleinerten und aufgetrennten Materialien werden anhand ihrer physikalischen Eigenschaften mithilfe verschiedenster Sortiertechnologien voneinander separiert und ausgeschleust. Beispielsweise werden Kunststoffe abgesaugt oder eisenhaltige (FE) Metalle über Magnetscheider abgetrennt. Die Metallfraktion liegt als sehr reine Fraktion vor, die Zusammensetzung der Folienfraktion ist vom Modultyp abhängig. Die Glasfraktion ist aktuell noch mit nichteisenhaltigen (NE)-Bestandteilen (Busbars/ feinste NE-Partikel) und Kunststoffresten belastet, weshalb diese überwiegend in alternativen Glasanwendungen eingesetzt wird. Aluminium, Kupfer und Zinn können nach einer weiteren Aufbereitung wieder eingeschmolzen werden. Eine Staubabscheidung ist

³⁷ Polyethylenterephthalat (PET)

bei den aktuellen Anlagen der Reiling Unternehmensgruppe etabliert und wird auch am Standort Münster in dem neuen Recyclingprozess integriert sein (Fislake 2022a). Am neuen Standort in Münster beträgt die kalkulatorische Recyclingkapazität ungefähr 50.000 t PV-Altmodule. Die Behandlung von nicht-siliziumbasierten PV-Modulen in der Anlage wird ebenfalls untersucht. Für die Zukunft ist die zusätzliche Rückgewinnung von Si und Ag geplant, die im neuen Kompetenzzentrum für Photovoltaik-Recycling erforscht werden soll (Fislake 2022b).

In einem gemeinsamen Projekt wurde zusammen mit Forscher*innen des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme ISE und dem Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP ein Verfahren entwickelt, mit welchem das Si zurückgewonnen werden kann. Für die Aufbereitung werden die Solarzellenbruchstücke aus dem bereits verwendeten mechanischen Aufbereitungsprozess genutzt, welche abgetrennt und gesammelt werden. Die Solarzellenbruchstücke im Größenbereich von 0,1 bis 1 mm werden durch diverse Sortierverfahren von Kunststoffen und Glas getrennt. Über eine nasschemische Ätzung können Rückseitenkontakte, Silberkontakte, Antireflexschicht und Emitter entfernt werden. Mit dem Verfahren kann das Si wieder dem Kreislauf zugeführt und zu monokristallinen oder quasi-monokristallinen Ingots, ohne den Einsatz von Reinstsilizium, eingeschmolzen und zu Wafern weiterverarbeitet werden. Der Wirkungsgrad der PERC³⁸-Zellen liegt bei 19,7 % (Fraunhofer-ISE 2022c).

5.3.2 Technologieunternehmen - FLAXRES GmbH

Die FLAXRES GmbH ist ein Technologieunternehmen in Dresden, welches mobile Anlagen entwickelt, die von Kunden gemietet werden können. Die Vermietung der Anlagen wird weltweit stattfinden. Die Anlage soll in Zukunft alle Modultypen bearbeiten können. Der Fokus liegt aktuell auf siliziumbasierten Modulen (FLAXRES GmbH 2022a).

Zu Beginn werden Anschlussdose, Kabel und Aluminiumrahmen entfernt. Die PV-Module werden einem sehr kurzen, hochintensiven Lichtpuls ausgesetzt, wodurch hohe Temperaturen von mehreren Hundert Grad Celsius entstehen. Durch die Erwärmung der Materialien kommt es zur Trennung des Materialverbunds. Dabei zerbrechen die Wafer in kleine Stücke. Anschließend kann die Rückseitenfolie abgelöst, die Wafer in Form von Si/Ag-Flakes eingesammelt und die Frontfolie entfernt werden. Durch den Prozess werden Si und Ag in einer Mischfraktion, Cu, Glas sowie Al und Kunststoffe zurückgewonnen. Das Glas besitzt eine hochwertige Qualität und kann in der Flachglasproduktion eingesetzt und Si sowie Ag nach der Trennung wieder eingeschmolzen und z. B. für die Produktion neuer PV-Module genutzt werden. Die Kunststoffe werden thermisch verwertet (FLAXRES GmbH 2022b; Fuhs 2021).

³⁸ PERC steht für Passivated Emitter and Rear Contact.

Die Mietgebühr wird voraussichtlich 100.000 € pro Monat betragen. Dabei sind, abhängig vom Modultyp, ca. 20.000 Module inkludiert, was einem Kostenaufwand von 5 Euro pro Modul entspricht. In der Zukunft soll alle zehn Sekunden ein PV-Modul vollständig getrennt werden (FLAXRES GmbH 2022a).

5.3.3 Erstbehandlungsanlage - First Solar GmbH

Die zertifizierte EBA der First Solar GmbH befindet sich in Frankfurt (Oder) und behandelt eigene CdTe-Module und solche anderer Hersteller (z. B. Antec Solar GmbH). Zu den weiteren Recyclingstandorten gehören Malaysia, Ohio und Vietnam (Staudt-Fischbach 2022a, 2022b).

Vor dem eigentlichen Aufbereitungsverfahren werden Anschlussdose und Kabel bei den CdTe-Dünnschichtmodulen manuell entfernt. Mithilfe eines Shredders werden die Module auf eine Stückgröße von 5 cm verkleinert. Über ein geschlossenes Förderband werden die Modulstücke zur Hammermühle transportiert, welche die Fraktion auf eine Korngröße von 5 mm zerkleinert, um den Beschichtungsverbund aufzubrechen. Für die Staubreduktion wird ein Absaugsystem verwendet, das aus einer zweistufigen Filtereinheit besteht. Die Endstufe der Filtereinheit ist mit einem High Efficient Particulate Air (HEPA)-Filter ausgerüstet. Da für das Verfahren eine Zerkleinerung verwendet wird, können intakte oder zerbrochene Module recycelt werden. Für die Auflösung der Halbleiterschicht werden Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid in einer rotierenden Edelstahltrommel genutzt. Während des Prozesses wird die Beschichtung vom Glas geätzt. Durch einen Schraubenentwässerer erfolgt die Trennung des Feststoffes (Glasbruch und Laminatmaterial) von der mit Cd und Te beladenen Säure. Das Glas wird auf eine Schraube befördert, die Flüssigkeiten bleiben in einem Ablagerungsbecken zurück. Die EVA-Folie liegt als größerer Flake und das Glas als feiner Bruch vor, weshalb eine Siebung zur Trennung der beiden Fraktionen genutzt wird. Anschließend wird das Prozessmedium mittels Waschung vom Glas entfernt. Der Glasbruch wird durch eine Schwerkraftentwässerung im Pufferbehälter entwässert. Es erfolgt mittels Natriumhydroxid eine Ausfällung der gelösten Stoffe aus der Flüssigkeit bei zunehmendem pH-Wert. Anschließend können Cd und Te mit einer Fest-Flüssig-Trennung gewonnen werden. Der Filterkuchen kann an Raffinerien abgegeben werden. Die darin enthaltenen Metalle sind leicht aus dem Filterkuchen herauszulösen. Derzeit werden ca. 95 % recycelt, 4 % werden verbrannt und der Rest deponiert (Sander et al. 2007; Staudt-Fischbach 2022a).

Kunststoffe werden als Ersatzbrennstoff verwendet. Das Glas wird in der Glaswollproduktion eingesetzt. Cadmium und Te können über einen Dienstleister wiederaufbereitet und zum Bau neuer PV-Module verwendet werden (Staudt-Fischbach 2022a).

Der Durchsatz der Anlage ist über den Zeitraum 2018 - 2021 bis auf geringe Abweichungen mit 10.000 t/a gleichgeblieben, da die volle Kapazität der Anlage ausgenutzt wird. Dabei kommt ein Großteil der Mengen aktuell aus Italien, ein kleiner Teil (ca. 10 %) kommt aus Deutschland (Staudt-Fischbach 2022a, 2022b).

5.3.4 Weitere Aufbereitungsverfahren

Das Startup-Unternehmen Solar Materials hat einen Prozess entwickelt, mit welchem neben Al und hochreinem Glas auch Ag und Si unter der Verwendung von physikalischen-mechanischen Verfahren zurückgewonnen werden sollen. Die industrielle Recyclinglinie soll bis Ende 2023 in Magdeburg stehen. Jährlich sollen über die Anlage 4.500 t Module recycelt werden (photovoltaik 2021; SOLAR MATERIALS GmbH 2022)

Die Firma LuxChemtech GmbH betreibt eine Pilotanlage in Freiberg. Dabei unterscheidet die Firma derzeit zwischen drei verschiedenen Typen von Modulen, die abhängig von ihrem Aufbau unterschiedliche Prozesse durchlaufen (vgl. Abbildung 17).

→ Spezielle Prozesse werden benötigt

Prozesse für	Typ 1	Typ 2	Typ 3
physikalisch (Wasser)	-	x	x
physikalisch (Bestrahlung)	x	x	-
mechanisch (Trennung von Front- und Rückglas)	x	x	-
chemisch	x	x	x
mechanisch (Trennung von busbars, Zellen, Kunststoff)	-	-	x

Abbildung 17: Verwendete Prozesse für verschiedene Modultypen (LuxChemtech GmbH 2021)

Dazu gehören physikalische (Wasser oder Bestrahlung) und mechanische Prozesse, bei welchen eine Trennung der Front- und Rückgläser erfolgt. Chemische Verfahren werden bei allen angewendet. Zusätzlich erfolgt die Trennung von Busbars³⁹, Zellen und Kunststoffen durch mechanische Verfahren. In einem der Recyclingprozesse erfolgt die Materialzerlegung unter Verwendung von Licht, um den Halbleiterverbund zu schwächen. In einem Chemiebad für die

³⁹ Als Busbars werden die Leiterbahnen bezeichnet.

Extraktion werden die Halbleitersubstanzen aufgelöst. Eine Elektrolyse liefert dabei Metalle (wie z. B. In). Am Ende des gezeigten Prozesses liegen reines Glas und Kunststoff vor. In einem weiteren Recyclingprozess erfolgt die Materialzerlegung mit Wasser, um die Module aufzutrennen und zu reinigen. Die Si- und Silbermischung wird chemisch behandelt. Am Ende der Prozesse stehen Si, Ag, In, Te, Glas und Kunststoffe zur Verfügung (LuxChemtech GmbH o.J., 2021).

Die Firma Veolia in Frankreich (Rousset) betreibt in Kooperation mit PV Cycle eine Behandlungsanlage für PV-Altmodule. Die Kapazität liegt bei $4.000 \frac{t}{a}$, die aktuelle Auslastung liegt nach Defrenne (2018)⁴⁰ bei ca. 50 % (Stand 2019). Zu Beginn werden Aluminiumrahmen und Anschlussdosen entfernt. Das Modul durchläuft einen zweistufigen Zerkleinerungsprozess, in welchem die Module in kleinere Quadrate, mit einer Größe von ca. 100 x 100 mm geschnitten werden und zur weiteren Zerkleinerung eine Hammermühle durchlaufen. Durch mechanische Aufbereitungsaggregate, wie Siebe, Windsichter, Wirbelstromscheider etc. werden verschiedene Fraktionen abgetrennt. Glas wird in der Glasindustrie, Al in Raffinerien, Kunststoff als Brennstoff in Zementwerken und Si in der Edelmetallindustrie weiter verwertet (Dobra et al. 2020; Veolia Group 2022).

Das in Frankreich (Grenoble) vorkommende Startup-Unternehmen Rosi Solar nutzt für die Rückgewinnung der Materialien aus c-Si-Modulen mechanische, thermische und chemische Verfahren. Die Durchsatzkosten des Prozesses sind nach Angaben des Unternehmens gering. Durch die Verfahren können Ag, Si, Cu, Al und Glas zurückgewonnen werden (ROSI | Return of silicon 2022).

⁴⁰ zitiert nach Dobra et al. 2020.

5.3.5 Überblick

Informationen über die Outputmengen der Jahre 2018-2021 wurden nur von der Firma First Solar GmbH zur Verfügung gestellt (siehe Tabelle 10) (Staudt-Fischbach 2022a). Weitere Outputmengen anderer Recyclinganlagen aus Literaturquellen sind nicht bekannt.

Tabelle 10: Outputmengen der First Solar GmbH (Staudt-Fischbach 2022a)

Material	Outputmengen in [t]
Glas	9.540
Kunststoffe	420
Kupfer	6
Tellur	8
Cadmium	8

In Tabelle 11 werden die aktuellen Behandlungsverfahren in Deutschland zusammengefasst dargestellt. Da Veolia Group mit PV Cycle kooperiert und Rosi Solar im Projekt ReProSolar eingebunden ist, werden diese Recyclinganlagen zusätzlich angegeben. In allen Verfahren werden Glas, Al⁴¹, Cu sowie Kunststoffe zurückgewonnen, weshalb diese nicht zusätzlich aufgezählt werden.

⁴¹ Sofern ein Aluminiumrahmen vorhanden ist.

Tabelle 11: Übersicht der aktuellen Behandlungsverfahren (Stand 2022), eigene Darstellung

Firma	Standort(e)	Behandlungsspektrum	Entwicklungsstand	Verfahrenstechnik	Rückgewinnung kritischer Rohstoffe oder Wertstoffe
Reiling Glas Recycling GmbH & Co. KG	<u>bisher:</u> Marienfeld, Torgau, Osterweddingen <u>geplant:</u> Münster	<u>bisher:</u> c-Si, a-Si	Normalbetrieb	<u>bisher:</u> mechanische-physikalische Aufbereitungs- und Sortiertechnik	<u>geplant:</u> Si und Ag
FLAXRES GmbH	Anlagen mobil einsetzbar	alle Modultypen	kurz vor Vollendung der Entwicklungsphase	Verbundauftrennung durch hochintensiven Lichtimpuls, Sortiertechnik	Si und Ag bei waferbasierten Modulen; Rückgewinnung der Halbleiterschicht bei Dünnschichtmodulen
LuxChemtech GmbH	Freiberg	diverse	Pilotanlage	Verbundöffnung durch physikalische oder chemische Behandlung, Sortiertechnik	u. a.: Si, Ag, In und Te
First Solar GmbH	Frankfurt (Oder)	CdTe	Normalbetrieb	Zerkleinerung, Kombination Trocken- und Nassprozesse	Cd und Te
SOLAR MATERIALS GmbH	Magdeburg	<u>bisher bekannt:</u> siliziumbasierte Module	Startup	<u>bisher bekannt:</u> physikalische-mechanische Verfahren	Si und Ag
Veolia group	Rousset (Frankreich)	c-Si	unbekannt	mechanische Zerkleinerung, Sortiertechnik	Si und Ag
ROSI SAS	Grenoble (Frankreich)	c-Si	Startup	mechanische, thermische und chemische Verfahren	Si und Ag

6 Forschungsprojekte

In diesem Abschnitt werden aktuelle und ältere Forschungsprojekte dargestellt.

6.1 Projekte

Nachfolgend werden derzeitige Forschungsprojekte aufgezählt, die sich mit verschiedenen Themen aus dem Recyclingbereich befassen.

6.1.1 ReSi-Norm

In einem von 2021 bis 2023 laufenden Forschungsprojekt mit dem Titel „Standardisierung und Normung von Recyclingprozessen für Siliziumsolarmodule – ReSi-Norm“ soll ein Ansatz für das PV-Modulrecycling umgesetzt werden. Die Normungsabläufe auf nationaler und auf europäischer Ebene sollen durch die Erarbeitung von Normungsvorschlägen unterstützt werden. Dabei spielt auch die Evaluierung und Umsetzung einer flächendeckenden Zuführung des PV-Frontglases und Si-Halbleitermaterials in Recyclingprozesse eine Rolle. In dem Projekt sollen Normen für realistische Recyclingquoten sowie Sammelquoten erarbeitet und in das System integriert werden, dabei werden aktuelle Prozesse aus dem derzeitigen Stand der Technik berücksichtigt (Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie 2021).

6.1.2 ReProSolar

Im Projekt ReProSolar sollen Prozesse für die hochwertige Rückgewinnung der wertvollen Materialien entwickelt werden. In dem Prozess werden Delaminationsverfahren für die Trennung der PV-Zellen von der Glasplatte genutzt. Über weitere physikalische-chemische Verfahren sollen alle Materialien ohne eine Zerkleinerung zurückgewonnen werden. Über den Prozess sollen Si, Ag und Glas zurückgewonnen und anschließend in der verarbeitenden Industrie wieder zur Verfügung gestellt werden. Die Machbarkeit im industriellen Maßstab sollte in den Betrieben der FLAXRES GmbH und Rosi Solar bis zum Ende des Jahres getestet werden (Stand 2021) (EIT RawMaterials GmbH 2021).

6.1.3 PHOTORAMA

In dem Projekt PHOTORAMA (photovoltaic waste management – advanced technologies for recovery & recycling of secondary raw materials from end-of-life modules) ist eine Pilotlinie für c-Si und CI(G)S-Module geplant. Für c-Si-Module wird eine mechanische Delamination mit einem Diamantdrahtschneidverfahren verwendet, mit welcher Glas, Rückseitenfolie und Zellen getrennt werden können. Zudem soll für die Delaminierung CO₂ im überkritischen Zustand (scCO₂) verwendet werden. Für CI(G)S-Module wird Blitzlicht verwendet. In einem weiteren Arbeitspaket soll die Entwicklung der Metallextraktion durchgeführt werden. Glas, Ag, Si, In

und Ga sollen in die etablierten Fertigungsprozesse in der Solarindustrie zurückgeführt werden (Photorama 2022).

6.2 Ältere Forschungsprojekte

In den folgenden Abschnitten werden Projekte aus der Vergangenheit aufgeführt, die Beispiele über bereits erprobte Technologien aufzeigen sollen.

6.2.1 NICE-Technologie

Die von Apollon Solar entwickelte „New Industrial Cells Encapsulation“-Technologie (kurz: NICE-Module-technology) bietet eine Alternative zur Einkapselung der PV-Zellen mit EVA-Folie. Die Technologie wurde inspiriert durch eine Dichtungstechnologie, welche auf Polyisobutylen (PIB) zurückgreift und in der Glasindustrie Verwendung findet. Das Verfahren ersetzt Lötverbindungen durch einen im Modulinneren erzeugten Unterdruck zwischen Solarzellen und Metallverbindern. Die Dichtung aus PIB wird für den Rand der Module genutzt. Zusätzlich wird das Material verwendet, um die PV-Zellen und die Metallverbindungsbander zu fixieren (Saint-Sernin et al. 2008). Das Moduldesign zeigte unter Standardtestbedingungen gute Ergebnisse. Da es sich dabei um eine firmeneigene Studie handelt, sind weitere Untersuchungen nötig (Heckler 2017).

6.2.2 Gemeinsame Aufbereitung verschiedener PV-Modultechnologien

In einem Forschungsprojekt, das in Zusammenarbeit der Enviprotect Kühl- und Elektrogeräte-recycling GmbH und des Instituts für Energie- und Umwelttechnik e.V. stattfand, wurde die gemeinsame Aufbereitung verschiedenartiger PV-Module zur Wertstoffrückgewinnung behandelt. Wertstoffe werden in diesem Verfahren zurückgewonnen und eine Abscheidung von Schadstoffen in volumenreduzierter Form ermöglicht. Durch das Verfahren können die Wertstoffe Ag, Cu, Al, Glas sowie Kunststoffe zurückgewonnen werden. Der erarbeitete Prozess ist wirtschaftlich realisierbar. Der Prozess ist trockenmechanisch ausgelegt und benötigt wenig Chemikalien, die nur auf die volumenreduzierte und mit Schad- und Wertstoffen angereicherte Fraktionen angewendet werden müssen. Über Zerkleinerungs- und Separationsschritte kann eine Abscheidung der Schadstoffe Cd, Te, Pb und Se in zwei Ausgangsfraktionen erfolgen und somit eine Schadstoffverschleppung mit einer diffusen Verteilung über die Ausgangsfraktion vermieden werden. Abbildung 18 zeigt das Verfahrenskonzept der Aufbereitung (Lohmann und Scholz 2019). Weitere Anwendungen des Verfahrens in der Praxis sind nicht bekannt.

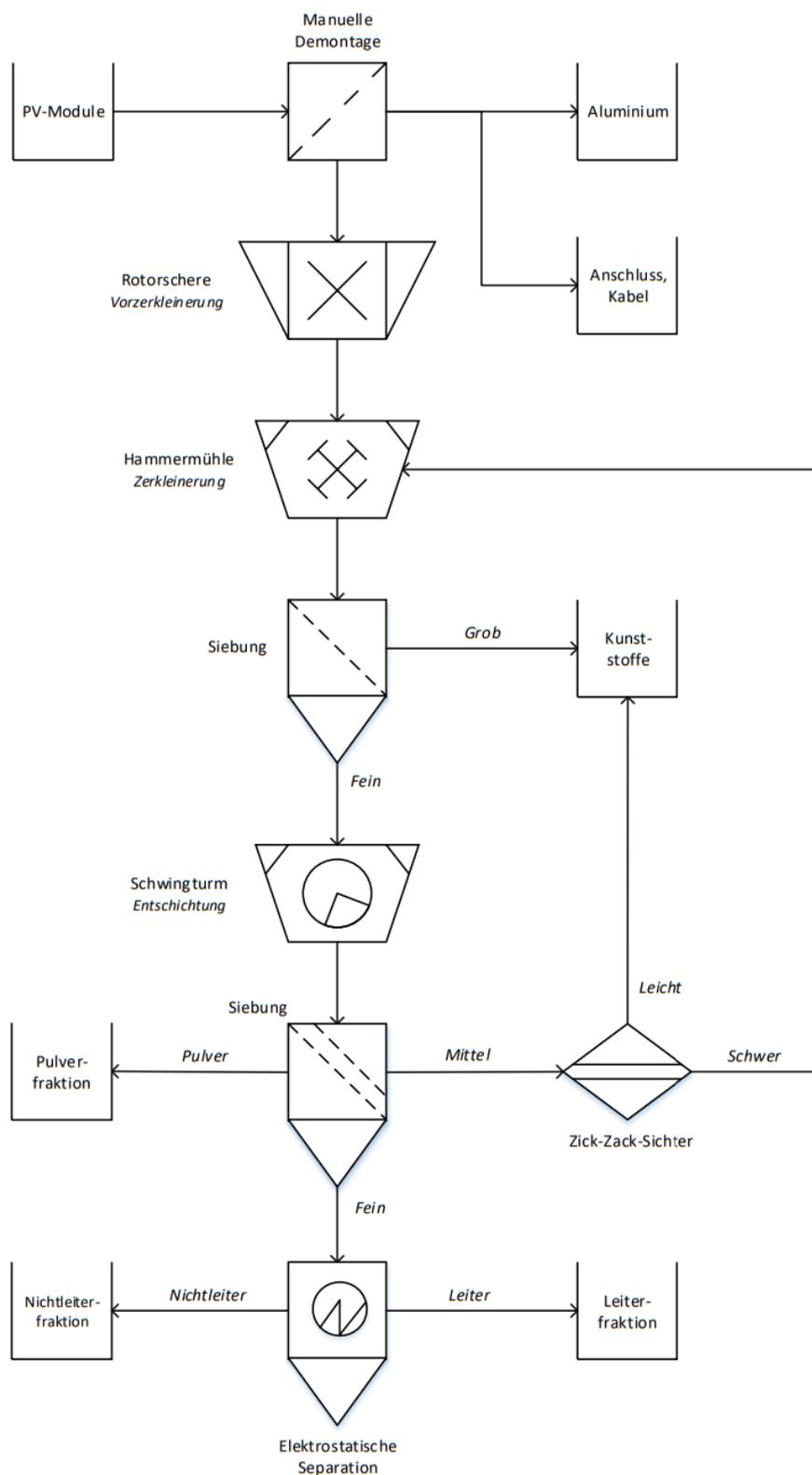


Abbildung 18: Verfahrenskonzept für die gemeinsame Aufbereitung verschiedenartiger PV-Module zur Wertstoffrückgewinnung nach Lohmann und Scholz (2019)

7 Hemmnisse

In den nachfolgenden Abschnitten wird erläutert, welche Herausforderungen es in dem aktuellen Entsorgungssystem gibt.

7.1 Erfassung

In diesem Abschnitt wird zunächst das Erfassungssystem von PV-Modulen reflektiert betrachtet.

7.1.1 Sammelquote und Rückgabemöglichkeiten

Bezogen auf die Berechnungsmethode für die Sammelquote (vgl. Abschnitt 3.5) wird deutlich, dass sich die Kategorie der PV-Module, aufgrund der langen Nutzungsdauer und geringen Rücknahmemengen, negativ auf die Gesamtsammelquote von EAG auswirkt, wodurch das Erreichen der Mindestsammelquote von 65 % erschwert wird (Löhle et al. 2020).⁴²

Endnutzern wird durch die Möglichkeiten der Rücknahme von Herstellern/Bevollmächtigten, Vertreibern, EBA, örE und ggf. Dritter nach ElektroG eine zunächst umfassende Auswahl geboten. Wie in Abschnitt 3.3.1 erwähnt, können Sammelstellen die Annahme auf bestimmte Altgerätegruppen beschränken. Bei nicht ausreichender Beschreibung der Tätigkeiten auf den Internetseiten von örE oder anderen Quellen, ist es für Endnutzer unter Umständen nicht übersichtlich, wo die tatsächliche Möglichkeit zur Abgabe von PV-Modulen besteht. Laut der EPR compact GmbH & Co. KG (2020) sind die vielen Parameter, am Beispiel der Rücknahme von Vertreibern, für den Endnutzer schwer nachvollziehbar. Freiwillige Rücknahmemöglichkeiten von z. B. EBA sorgen für weitere Unübersichtlichkeiten oder zu einer Zersplitterung von Zuständigkeiten (Bundesarbeitsgemeinschaft Arbeit e.V. et al. 2020). Es bestehen zwar nach § 18 und 19a ElektroG Informationspflichten für z. B. örE und Hersteller, allerdings könnte die Streuung der Informationen bewirken, dass diese nicht ausreichend vom Endnutzer wahrgenommen werden.

Die Praxis zeigt, dass das derzeitige Sammelsystem noch nicht verbraucherfreundlich gestaltet ist. PV Cycle Deutschland GmbH (2020) gibt bei einer Stellungnahme zu den Referententwürfen zum ElektroG 3 und zur EAG-BehandV an, dass Letztbesitzer mit kleinen Mengen von Altmodulen (< 10) teilweise bei kommunalen Übergabestellen abgewiesen werden. Der Umstand wird auch von der Deutsche Umwelthilfe e.V. (2021) und von dem Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW 2020) bestätigt. Im Rahmen der Umfrage bei den örE in Hessen

⁴² Im Jahr 2018 lag die Mindestsammelquote der EAG mit PV-Modulen bei 43,11 %, ohne PV Module bei 44,69 % (Löhle et al. 2020).

gab ein Betrieb an, dass dort erst in diesem Jahr (2022) eine Rücknahmestelle für PV-Module eingerichtet wurde.

Da viele PV-Module vor dem 24.10.2015 auf den Markt gebracht wurden, stellt die Entsorgung dieser Rubrik eine Herausforderung dar, da es sich hierbei um einen großen potenziellen Abfallstrom handelt (vgl. Abbildung 7). Die Kosten für die Entsorgung historischer Altgeräte (b2b) muss der Endnutzer tragen, nicht der Hersteller (§ 19 Abs. 3 S. 3 ElektroG). Daraus ergeben sich Schwierigkeiten, da die Verantwortung einer ordnungsgemäßen Entsorgung beim Letztbesitzer liegen, sofern keine freiwilligen Systeme der erweiterten Herstellerverantwortung bestehen. Deshalb kommt es zu anderen Entsorgungswegen, die nicht mit den Zielen des KrWG übereinstimmen (Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021).

7.1.2 Transport und Lagerung

Durch die vorgegebenen Behältnisse der stiftung ear (siehe Tabelle 5) werden zwar einheitliche Vorgaben gemacht, allerdings gehört die sachgemäße bzw. zerstörungsfreie Handhabung zu den entscheidenden Aspekten für eine potentielle VzWv, die von dem Personal vor Ort bei Sammelstellen und von den Anlieferern der PV-Module abhängig ist (Krause 2022a). Dies wurde bereits bei Schomerus et al. (2014) bei der Sammlung von EAG bestätigt. Aufgrund der verschiedenen Abmessungen, Modultechnologien und der Zerbrechlichkeit der PV-Module, sind die Anforderungen so unterschiedlich, dass verschiedene Verpackungen notwendig wären. Die Anforderungen an Verpackungsmaterialien und Personalkapazitäten werden nur von den Sammelstellen bewerkstelligt, die ein Interesse an einer qualifizierten Sammlung haben (PV Cycle Deutschland GmbH 2020). Dementsprechend werden die TPE, die von der stiftung ear vorgegeben werden, aufgrund der Unterschiedlichkeit der angelieferten Module, für eine VzWv als nicht ausreichend betrachtet.

Beschädigte PV-Module oder Modulbrüche erschweren die Handhabung, die Sortierbarkeit und die Differenzierung der verschiedenen Modultechnologien (Kummer et al. 2020). Die Beschädigungen wirken sich nicht nur auf eine potenzielle VzWv aus, sondern auch, abhängig vom Beschädigungsgrad, auf einige Recyclingmethoden, wie z. B. die der FLAXRES GmbH (vgl. Abschnitt 7.3.1). Demnach ist eine hochwertige Rückgewinnung der Materialien nicht nur von den verwendeten Verfahren im Recycling, sondern bereits von der Qualität der Erfassung abhängig. Im ElektroG und in der LAGA-Mitteilung werden einige Vorgaben zur Handhabung gemacht (vgl. Abschnitt 3.4). Da PV-Module laut Herrn Krause (2022a) schon bei leichten Stößen oder bei kleinen Fallhöhen anfällig für Mikrorisse sind, sind die Vorgaben zur Handhabung ungenügend.

Die Separierung von gemischten Modultechnologien bei EBA ist in Bezug auf Kosten und Zeit mit einem hohen Aufwand verbunden. Derzeit gibt es keine automatische Trennung in der Praxis (Sander et al. 2018). Eine Trennung wäre auch im Sinne des EAG-BehandV, bzw. für nach Modultechnologie spezialisierte Recyclinganlagen bereits an den Sammelstellen sinnvoll. Durch die Umfrage bei den öRE in Hessen wurde deutlich, dass die Trennung der Module nach Bauweisen in den Jahren 2018 bis 2021 nicht bewerkstelligt wurde. Eine Separierung wäre derzeit bei einer Kooperation⁴³ nach § 17b für eine VzWv zulässig oder wenn die öRE SG 6 optieren (vgl. Abschnitt 4.2). Die Trennung von PV-Modultechnologien, die in der EAG-BehandV vorausgesetzt wird, kann in der Praxis aufgrund der fehlenden Fachkenntnisse von öRE und EBA nicht umgesetzt werden (PV Cycle Deutschland GmbH 2020), zudem sind einige Etiketten beschädigt oder sie geben nicht ausreichend Auskunft über die Art der Module (Lohmann und Scholz 2019).

7.2 Vorbereitung zur Wiederverwendung

Die VzWv ist laut der Abfallhierarchie im KrWG prioritär anzustreben. Eine Umsetzung der VzWv von PV-Modulen in EBA findet nach aktuellem Stand nur in kleinem Maße statt, was anhand der VzWv-Mengen in den Jahren 2017 und 2018 abgeleitet werden kann (vgl. Abbildung 8). Im ElektroG gibt es keine differenzierten Quoten für die VzWv und das Recycling (vgl. Abschnitt 3.5.1), weshalb die Zahlen in den Statistiken für die Jahre 2019 und 2020 nicht einzeln aufgelistet werden. Eine Bewertung zum Status Quo der VzWv ist durch die fehlende Differenzierung in diesen Jahren nicht möglich. Bei den öRE wurden im Sinne der Opt keine Aktivitäten bezüglich der VzWv von PV-Modulen durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.3.1). Dies ist unter anderem mit derzeit geringen Rücknahmemengen zu begründen.

Laut ElektroG ist eine Prüfung zur VzWv-Eignung nur dann durchzuführen, sofern diese technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist (vgl. Abschnitt 4). Es ist gesetzlich nicht vorgegeben, zu welchem Zeitpunkt eine Überprüfung auf Wiederverwendung_{IA} durchgeführt werden soll, sondern lediglich, dass diese vor einer Erstbehandlung durchzuführen ist (Neubauer und Thärichen 2017). Die Verantwortung für die Prüfung zur VzWv-Eignung ist demnach keinem konkreten Akteur zugeordnet.

Die Demontage beim Letztbesitzer durch Beauftragte, der Transport sowie die Lagerung gehören nach Herrn Krause (2022a) zu den größten Herausforderungen bei der Erfassung von PV-Modulen für die Wiederverwendung_{IA}. Nach Schätzungen sind noch 60 % der Module, deren sich der Besitzer entledigen will, für die Wiederverwendung_{IA} geeignet, unter der Voraus-

⁴³ Seit der Novellierung des ElektroG.

setzung, dass diese noch nicht demontiert und transportiert wurden (Krause 2022a). Die verschiedenen Wege und möglichen Zwischenlagerungen zeigen, dass besonders viele Akteure Einfluss auf eine potenzielle Wiederverwendung_{IA} (vgl. Abbildung 6) nehmen, weshalb die Sammelstellen der örE als Quelle für die VzWv, laut Herrn Krause (2022b), häufig nicht erstrebenswert ist. Als weiteres Beispiel wird ein Forschungsprojekt von Lohmann und Scholz (2019) herangezogen. In dem Projekt wurde eine große Zahl an Modulen, die bei einem Recyclinghof angeliefert wurden, auf ihren Zustand überprüft. Für die Vorgehensweise wurden die Beschädigungsklassen 0, 1 und 2 definiert. Dabei kamen ca. 55 % in der Beschädigungsklasse 1 vor, bei welcher sichtbare Defekte wie Beschädigungen des Rahmens oder Glasbrüche zu sehen waren. Etwa 21 % wurden in die Beschädigungsklasse 2 eingeteilt, in welcher die Module starke Defekte und Materialverluste erlitten haben (Lohmann und Scholz 2019). Fehlendes Wissen über die Sinnhaftigkeit der beschädigungsfreien Handhabung führt zu entsprechendem Verhalten in der gesamten Entsorgungskette.

Aktivitäten bezüglich der VzWv von PV-Modulen sind bei den örE nur realisierbar, wenn diese die jeweilige SG optimieren. Diese Tätigkeiten an Sammelstellen der örE sind stark von wirtschaftlichen Gesichtspunkten abhängig. Nicht automatisierte Arbeiten sind personalintensiv und teilweise mit einem hohen technischen Aufwand verbunden (Schomerus et al. 2014). Nach Sander et al. (2019) gehören zu den Gründen für eine nicht durchgeführte VzWv bei örE mangelnde Platz- und Personalkapazitäten, fehlende Fachkenntnisse, Haftungsrisiken und organisatorischer Mehraufwand.

Zu den weiteren Hemmnissen gehört, dass bestimmte Hersteller von PV-Modulen bei der Entledigung der Module äußern, dass diese keinem Zweitmarkt zugeführt werden sollen (Krause 2022b).

Als eine weitere Herausforderung kann die Wiederverwendung_{AA} betrachtet werden. Während die VzWv in den Mengenmitteilungen auftaucht, ist das bei Modulen nicht der Fall, die in die Wiederverwendung_{AA} gehen (vgl. Abschnitt 4.1). Der Weg innerhalb des Abfallregimes ist mit einem Umstand verbunden, wird aber im Gegensatz zu den Modulen, die nicht ins Abfallregime gelangen, dokumentiert (vgl. Abschnitt 4).

7.3 Behandlungsverfahren

Herausforderungen der verschiedenen Behandlungsverfahren, die damit verbundenen rechtlichen Regelungen und der Bau spezialisierter Recyclinganlagen werden im Folgenden vorgestellt.

7.3.1 Rohstoffrückgewinnung

Aufgrund der Verunreinigungen wird der Einsatz des Glasproduktes in der Behälter- oder Flachglasproduktion bei den Verfahren der First Solar GmbH und der Reiling Unternehmensgruppe bislang ausgeschlossen (Fislake 2022a; Staudt-Fischbach 2022a). Bei diesen Verfahren findet aktuell ein Downcycling des Glases statt.

Die Aufbereitung des Glases zur Einhaltung der Grenzwerte (vgl. Abschnitt 5.1.1) ist möglich, aber mit einem hohen Kostenaufwand verbunden (Fislake 2022b). Hinsichtlich des Recyclings sind nicht die Technologien problematisch, sondern die langfristigen Investitionen, für die sichere Auslastungen der Anlagen notwendig sind (Kummer et al. 2020). Herr Staudt-Fischbach begründet das Downcycling des Glases mit der wirtschaftlichen Nicht-Berücksichtigung des CO₂-Budgets im gesamten Lebenszyklus der CdTe-Module, da diese einen kleineren CO₂ Fußabdruck aufweisen, als c-Si-Module (Staudt-Fischbach 2022a).

Bereits im Jahr 2004 stellten Sander et al. fest, dass die größte Problematik die Trennbarkeit der Si-Zellen aus dem Verbund mit der EVA-Folie darstellt (Sander et al. 2004). Die Problematik der Gewinnung hochqualitativer und nicht verunreinigter Stoffe ist bei mechanischen Aufbereitungsprozessen aktuell, wie auch Lohmann und Scholz (2019) in ihrem Forschungsprojekt festgestellt haben. Die Substitution der EVA-Folie gestaltet sich schwierig, da diese in Bezug auf Haltbarkeit und Schutz vor Witterungseinflüssen gute Merkmale bietet. Dabei besteht ein Zielkonflikt zwischen den guten Eigenschaften des Verbundes und der demontagegerechten Konstruktion (Sander et al. 2004). Eine saubere Trennung von Glas- und nicht-Glasfraktion ist bei dem Aufbereitungsprozess notwendig. Allerdings sind die Prozesse, die den Verbund schonend aufschließen, im Vergleich zu mechanischen, nicht-schonenden Aufschlussverfahren, mit hohem technischem sowie zeitlichem Aufwand und deshalb mit höheren Kosten verbunden (Sander et al. 2018), weshalb diese kaum für einen industriellen Prozess geeignet sind (Fraunhofer-ISE 2022b). Es besteht eine Diskrepanz zwischen dem Verbund und der Vorgabe zur Produktkonzeption laut § 4 Abs. 1 ElektroG. Demnach sollen die Geräte so gestaltet sein, dass eine Wiederverwendung, Demontage und Verwertung berücksichtigt und erleichtert wird.

Die Si-Rückgewinnung war bisher nicht großtechnisch realisiert. Gründe dafür waren die verfügbaren Mengen (Wolf et al. 2017) und die Kostensituation im Vergleich zu den Primärsiliziumpreisen (Sander et al. 2018).

Silber und Si wurden bei den Standorten der Reiling Unternehmensgruppe in Marienfeld, Torgau und Osterweddingen bisher nicht zurückgewonnen (Fislake 2022a). In einem gemeinsa-

men Forschungsprojekt wurde die Rückgewinnung von den Materialien erforscht (vgl. Abschnitt 5.3.1). Nach Prof. Dr. Peter Dold (Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP) steht noch nicht fest, ob die Rückgewinnung von Si, die erst nach mechanischen Zerkleinerungsprozessen und chemischen Verfahren erfolgt, die wirtschaftlich sinnvollste ist, da das Si für PV-Module einen hohen Reinheitsgrad aufweisen muss (BDEW 2022).

Die Rückgewinnung von In und Ga wird derzeit nur im Pilotmaßstab erprobt. In Bezug auf weitere Rückgewinnungsanforderungen für In und Ga sind die economy of scale-Effekte nach Kummer et al. (2020) unbekannt.

Bei den von Reiling und First Solar verwendeten Verfahren ist die Behandlung von Altmodulen mit verschiedenen Beschädigungsarten möglich (vgl. Abschnitt 5.3.1 und 5.3.3). Deformation, Verwindungen des gesamten Moduls oder Löcher sind bei dem Verfahren von FLAXRES problematisch, gebrochenes Frontglas hingegen nicht (FLAXRES GmbH 2022b). Auch in Bezug auf automatisierte Prozesse stellen stark beschädigte Module für z. B. Roboter ein Problem dar, die die PV-Module an glatten Oberflächen anheben, wie es bei Prozessen der Veolia Group (2022) der Fall sein könnte. Diese Art von Beschädigung kann bei der derzeitigen Erfassung von PV-Modulen nicht sicher vermieden werden.

7.3.2 Rechtliche Vorgaben

Aufgrund des hohen Anteils des Al und des Glases in PV-Modulen, wird die Verwertungsquote mit 85 % und auch die Recycling- und VzWv-Quote mit 80 % der WEEE-Richtlinie bzw. des ElektroG, erreicht. Von Seiten der Gesetzgebung fehlen hierbei weitere Anreize.

Die Messungen zur Einhaltung der Grenzwerte im ppm-Bereich der EAG-BehandV (siehe Abschnitt 5.1.1) gestalten sich durch die gegenwärtigen Messmethoden schwierig, da die Messsysteme zunächst aufwendig kalibriert werden müssen (Fislake 2022a). Der Ursprung des Se kann nicht genau auf eine bestimmte Fraktion zurückgeführt werden, da Se in der Halbleiterschicht und bereits in der Glasmatrix des Vorproduktes vorkommen kann. Die in neuen Modulen eingesetzten Solargläser können beträchtliche Blei- und Selengehalte aufweisen, die sich nicht aus dem Glas entfernen lassen (PV Cycle Deutschland GmbH 2020).

7.3.3 Bau spezialisierter PV-Recyclinganlagen

Die Module verschiedener Hersteller unterscheiden sich leicht im Produktdesign, weshalb Recyclingprozesse flexibel sein müssen (Bilbao et al. 2021). Zusätzlich befinden sich die Bauarten von PV-Modulen ständig in der technischen Weiterentwicklung, was sich in den Unterschieden zwischen der Zusammensetzung der anfallenden PV-Altmodule und der neu produzierten Module bemerkbar macht (LAGA 2018; Heckler 2017). Dies birgt nach Heckler (2017) ein großes Risiko für langfristige Planungsphasen potenzieller Recyclingaktivitäten.

Der Bau neuer Anlagen wird im Bereich der nicht-siliziumbasierten Dünnschichtmodultechnologien durch die fehlenden Entsorgungsmengen gehemmt (Staudt-Fischbach 2022a). In Bezug auf Rückgewinnungsanforderungen, für beispielsweise In und Ga, ist der Zeitpunkt der Fristsetzung unklar, da die economy of scale-Effekte unbekannt sind (Kummer et al. 2020). Der Vergleich der prognostizierten Menge mit der tatsächlich gesammelten Menge zeigt, dass die anfallenden Altmodulmengen unter den Prognosen liegen (vgl. Abschnitt 2.1), was mit den in Abschnitt 4.4 genannten Aspekten begründet werden kann.

Aufgrund der Mengenverhältnisse (vgl. Tabelle 1) wird nach Sander et al. (2018) eine Rückgewinnung von In und Ga erst ab dem Zeitpunkt sinnvoll sein, wenn eine Zusammenführung von Stoffströmen aus anderen Quellen machbar ist. Auch bei Si macht die potenzielle Menge aus dem Recycling von c-Si-Modulen in Deutschland einen sehr geringen Anteil aus. Für die Zusammenführung von Recyclingströmen stehen keine anderen mengenrelevanten Quellen eines ähnlichen Si-Materials zur Verfügung (Sander et al. 2018).

Zudem stellt das komplexe Genehmigungsverfahren für den Bau neuer Anlagen ein Hindernis dar (Staudt-Fischbach 2022a).

8 Optimierungspotenziale

Da die Entsorgung der PV-Module derzeit noch am Anfang steht, gibt es in den verschiedenen Bereichen der Erfassung, Wiederverwendung und Verwertung diverse Optimierungspotenziale, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

8.1 Erfassung

In diesem Abschnitt werden zunächst die Optimierungspotenziale für die verschiedenen Bereiche der Erfassung dargestellt.

8.1.1 Sammelquote und Rücknahmemöglichkeiten

Aufgrund der langen Lebensdauer sollte eine spezielle Berechnung der Sammelquote für PV-Module erstellt werden. Da die Zahlen der PV-Module in den Mengenmitteilungen der KOM-Tabellen separat ausgewiesen werden, wäre dies in der Praxis umsetzbar. Eine angepasste Sammelquote gehört zu den Zielen im Projekt ReSi-Norm (vgl. Abschnitt 6.1.1)

Die Schulungen der Mitarbeiter vor Ort, die Erhöhung der Sammelstellen und die Festlegung einheitlicher Standards für Sammelprozesse könnte die Verbraucherfreundlichkeit der Sammelprozesse erhöhen (Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021).

Für das Erfassungssystem fehlen unter Umständen ausreichende und einfache Möglichkeiten sich über die Rückgabemöglichkeiten in der näheren Umgebung zu informieren. Dies ist vor allem von Bedeutung, wenn nicht alle vorhandenen Sammelstellen auch PV-Module annehmen können. Ein solches gebündeltes Informationsportal sollte diverse Rückgabemöglichkeiten in der nächsten Umgebung mit Hilfe von Filtereinstellungen anzeigen lassen. Zu den Angaben sollten Informationen wie Kontaktdaten, Öffnungszeiten, Möglichkeiten zu Hol- und Bringsystemen, entgeltliche oder unentgeltliche Rücknahme, die Gerätekategorien und ob eine Überprüfung auf Wiederverwendung stattfinden kann, gehören. Mit dem Portal „E-Schrott-Rückgabefinder“ (Hellmann Process Management GmbH & Co. KG 2022) lassen sich Rückgabestellen in der näheren Umgebung finden. Bei der Suche können Ort und Umkreis eingegeben und durch Filtereinstellungen „PV-Module“ ausgewählt werden. Zur Auswahl stehen derzeit „örE“, „Vertreiber“ und „alle“ (örE und Vertreiber). Die Angaben sollten durch die eingangs erwähnten Informationen ergänzt werden. Eine Suche nach anderen Entsorgungsdienstleistern über dieses Portal wäre auch denkbar. Falls eine telefonische Absprache bei einer bestimmten Gerätezahl bei örE gefordert wird, sollte dies auch im Portal angezeigt werden. Weiterleitungen könnten über das MaStR oder beispielsweise über die Webseiten der Rücknahmepflichtigen erfolgen. Ein solches System könnte sich positiv auf die Sammelquote von allen EAG auswirken. Problematisch sind dabei einige Faktoren, wie z. B. die Aktualität

der Daten, die nur durch eine kontinuierliche Datenpflege gewährleistet wird. Zudem könnten die Kapazitäten einiger Sammelstellen zu stark und andere wiederum zu wenig ausgelastet werden.

Die Deutsche Umwelthilfe e.V. (2021) empfiehlt eine Information des Letztbesitzers über die Pflichten zur ordnungsgemäßen und die Konsequenzen einer unsachgemäßen Entsorgung. Der Verkauf oder die Entsorgung sollte über einen entsprechenden Nachweis in der elektronischen Schnittstelle des MaStR hinterlegt werden (Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021). Mengen, die durch einen Verkauf in die Wiederverwendung_{AA} gehen, könnten auf diese Weise dokumentiert und in einer Statistik erfasst werden. Hierbei ist eine ausreichend frühe Information der Endnutzer von Bedeutung. Dies wäre vor allem bei historischen Geräten sinnvoll. Für die Umsetzung in der Praxis sind Kontrollen der Entsorgungsnachweise von Bedeutung, da z. B. vor der Novellierung des ElektroG zum 01. Januar 2022 die Verpflichtung der Mengenmitteilung beim entsorgungspflichtigen Letztbesitzer lag (BMUV 2020d). Nach der Aussage eines Mitarbeiters der stiftung ear (2022a) sind entsorgungspflichtige Letztbesitzer dieser Verpflichtung nicht ausreichend nachgekommen, weshalb dieser Teil im aktuellen ElektroG nicht mehr verwendet wird. Dementsprechend könnten Fristen für das Vorlegen eines Entsorgungsnachweises im MaStR gesetzt werden.

8.1.2 Transport und Lagerung

Da im Sinne der EAG-BehandV eine Trennung von siliziumbasierten und nicht-siliziumbasierten Modultechnologien vorgesehen ist, sollte diese bereits vor der Anlieferung bei EBA durchgeführt werden. Nach Krause (2022b) würde die vorverlegte Separierung in der Entsorgungskette eine bessere Trennung der Modultechnologien für Behandlungsanlagen gewährleisten und zudem frühzeitig weiteren Arbeitsaufwand vermeiden.

In welchem Maß die Trennung von siliziumbasierten und nicht-siliziumbasierten PV-Modulen in der Zukunft nötig sein wird, ist unklar. Bei zwei Unternehmen ist die Behandlung beider Modultechnologien geplant (vgl. Abschnitt 5.3.1 und 5.3.2). Kriterien für eine qualitative Separierung dieser Art müssten abhängig von den verfügbaren Recyclingtechniken erstellt bzw. diese mit Betreibern von Recyclinganlagen diskutiert werden. Dies setzt feste Recyclingstrukturen in diesem Bereich voraus, die derzeit noch nicht vorhanden sind.

Sofern PV-Module bereits an Sammelstellen (örE) nach Modultechnologien für spezialisierte Behandlungsanlagen oder für die VzWv separiert werden sollen, ist es wichtig, den Aufwand so gering wie möglich zu halten. Für eine schnelle Separierung der Module nach Technologie würden Orientierungshilfen wie in Wolf et al. (2016), Schulungen von Seiten der EBA (Krause 2022b) und Ergänzungen in den LAGA Mitteilungen von großer Wichtigkeit sein.

8.2 Vorbereitung zur Wiederverwendung

Durch die Wahl des Dienstleisters kann der Endbesitzer der Module bereits einen maßgeblichen Einfluss auf den weiteren Verwertungsweg der Module nehmen und zur Wiederverwendung beitragen. Durch die Umsetzung von Informationskampagnen über die Sinnhaftigkeit der Wiederverwendung könnte der Anteil der wiederverwendeten Module in der Praxis erhöht werden. Dies setzt die Informationen über Wiederverwendungseinrichtungen voraus.

Die verarbeiteten kritischen Rohstoffe und Wertstoffe bleiben bei einer weiteren Nutzung erhalten, im Gegensatz zu einem Recycling oder einer energetischen Verwertung der Fraktionen, was die Stärkung der Wiederverwendung_{IA} befürwortet.

Um eine spätere Wiederverwendung_{IA} nicht einzuschränken, muss bereits von dem Beauftragten zur Demontage der PV-Module eine bruchsichere Handhabung für Lagerung und Transport durchgeführt werden. Deshalb ist die Entwicklung von Schulungs- und Zertifizierungsprozessen für Handwerker bedeutend (Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021). Auch an den Sammelstellen sollten Mitarbeiter über die genannten Hemmnisse (vgl. Abschnitt 7.1.2) aufgeklärt und geschult werden, um eine qualifizierte Annahme der Module gewährleisten zu können (Krause 2022a). Bei einer Anlieferung der Module an Sammelstellen sollte die VzWv-Eignung (Funktionstüchtigkeit) über eine Befragung (Schomerus et al. 2014) oder beispielsweise über eine Sichtprüfung festgestellt werden (Sander et al. 2019). Anschließend sollte eine Separierung der Module nach VzWv-Eignung und nach anderen Verwertungswegen erfolgen. Für die zur VzWv geeigneten Module sollten wiederverwendbare Transportbehältnisse zur Verfügung gestellt werden, die für verschiedene Modultypen und -größen geeignet sind. In der Größe anpassbare Systeme, die eine ausreichende Transportsicherung gewährleisten können, wären hierfür ein Ansatz. Es werden zusätzliche Lagerkapazitäten für die Separierung der Module nach Verwertungswegen und für die Lagerung der vorgeschlagenen Behältnisse benötigt. Bei unzureichenden Lagerkapazitäten sollten diese entsprechend ausgebaut werden.

Für die VzWv und das Recycling sollten getrennte Quoten eingeführt werden. Die Quote könnte niedrig angesetzt und nach einigen Jahren angehoben werden. Über eine Differenzierung der VzWv und des Recyclings in den Statistiken der Mengenmeldungen an die EU-Kommission, wäre demnach eine Bewertung des Fortschritts der VzWv im Entsorgungssystem möglich. Sander et al. (2019) bestätigen die Wichtigkeit einer gesetzlichen Vorgabe, da dadurch zukünftig wieder separate Daten für VzWv und Recycling bei der stiftung ear erhoben werden würden (vgl. Abschnitt 3.5.1). Eine differenzierte VzWv-Quote würde zudem einen Steuerungsanreiz darstellen. Voraussetzung dafür ist die Stärkung der VzWv in der Praxis.

Bei einer Umsetzung der VzWv-Quote sollte eine Differenzierung zwischen den Gerätekategorien erfolgen (Sander et al. 2019). Sander et al. (2019) weisen darauf hin, dass das Erreichen der Quote als allgemeine Pflicht benannt und keinem Akteur zugeordnet werden soll.

Zu der Thematik der illegalen Exporte findet der Vorschlag des Einbindens der Entsorgungsnachweise in die elektronische Schnittstelle des MaStR der Deutschen Umwelthilfe e.V. aus Abschnitt 8.1.1 wieder Verwendung. Die unsachgemäße Entsorgung von gebrauchten Geräten bzw. exportierten Abfällen kann mit nicht ausreichenden Kontrollen begründet werden. Hierbei ist ein gründlicherer Vollzug von großer Bedeutung. Damit Altmodule auch in anderen Ländern ordnungsgemäß entsorgt bzw. verwertet werden, ist eine Unterstützung der Entsorgungsinfrastrukturen dort wichtig, wo diese noch nicht existieren (BDE 2020).

8.3 Recycling

Folgende Abschnitte umfassen Verbesserungspotenziale für die Bereiche Rohstoffrückgewinnung, rechtliche Vorgaben und Design for Recycling (DfR).

8.3.1 Rohstoffrückgewinnung

Nach Tao und Yu (2015) sind Delaminationsverfahren, die Zellschäden und Kontaminationen (Dobra et al. 2020) der Fraktionen vermeiden, prioritär zu verwenden. Eine Umsetzung erfolgt im kleineren Maßstab derzeit z. B. durch die LuxChemtec GmbH mit physikalischen Verfahren (Wasserdüse und Laser) (LuxChemtec GmbH 2021). Hierbei müssen die von Sander et al. (2007) genannten Kostenziele und zudem ausreichende Durchsatzmengen erreicht werden.

Eine Alternative bietet die Nutzung des zukünftig aufbereiteten Si (vgl. Abschnitt 5.3.1) in anderen Industriezweigen, in welchen die Reinheitsanforderungen geringer sind. Dadurch wäre eine Vereinfachung des Recyclingprozesses und eine Kostenreduzierung möglich (BDEW 2022). Darüber hinaus ist es notwendig, dass trotz der geringeren Marktanteile andere kritische Stoffe wie z. B. In und Ga wieder in den Kreislauf eingebunden werden.

Die Outputqualität der Glasfraktion besitzt Optimierungspotenzial. Die Verunreinigungen im Glasprodukt (Verfahren in den Abschnitten 5.3.1 und 5.3.3) sollten in der Zukunft bei größeren anfallenden Mengen reduziert werden, da sich die Verwertung des Glases aus PV-Modulen zu Flachglas als ökologisch vorteilhaft erweist (Sander et al. 2018).

Staatliche Förderungen könnten den Ausbau der Recyclingstrukturen im Inland fördern. Durch die verkürzten Transportwege zwischen dem Ort der anfallenden Altmodule und der Recyclinganlage können Umweltwirkungen weiter reduziert werden (vgl. Abschnitt 5.1.2).

8.3.2 Rechtliche Vorgaben

Die Recyclingquote könnte explizit für PV-Module erhöht werden. Dies ist an die Voraussetzungen gekoppelt, dass die Rückgewinnung von weiteren Wertstoffen technisch möglich und wirtschaftlich ist. Erst mit ausreichend anfallenden Abfallströmen und den damit verbundenen Auslastungen der Anlagen kann dies realisiert werden. Im derzeitigen ReSi-Norm-Projekt sollen Normen für realistische Recyclingquoten ermittelt werden (vgl. Abschnitt 6.1.1).

Zur Problematik des Selen- und des Bleigehalts (vgl. Abschnitt 7.3.2) in den PV-Modulen empfahl PV Cycle⁴⁴, dass z. B. Vorlieferanten bereits Grenzwerte für Pb einhalten und Hersteller den Selengehalt des Glases ausweisen (PV Cycle Deutschland GmbH 2020).

8.3.3 Design for Recycling

Die International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) hat eine Leitlinie für das DfR für c-Si-Module erstellt. Wie schon in den vorigen Kapiteln erwähnt, hat auch die Backsheet-Folie einen entscheidenden Einfluss auf die Recyclingfähigkeit. Aufgrund der schädlichen Abgase bei thermischen Verfahren, sollten Backsheets, die oft F enthalten, durch PET-basierte oder biobasierte Materialien substituiert werden (Bilbao et al. 2021). Die Reduzierung der Einkapselungen oder der Einsatz reversibler Einkapselungen kann die Auftrennung von PV-Modulen erleichtern. Alternativ können auch andere Kunststoffe, wie z. B. thermoplastische Kunststoffe für die Einkapselung verwendet werden (Goris, M. J. A. A. 2014). Zudem ist der Verzicht auf eine Einkapselung möglich (vgl. Abschnitt 6.2.1). Die technische Lebensdauer der Module sollte durch solche Maßnahmen nicht vermindert werden. Die Verringerung der Anzahl und Komplexität der verwendeten Materialien in Modulen hat Auswirkungen auf die Recyclingfähigkeit und Wirtschaftlichkeit. Zudem kann durch die Nutzung anderer Dichtungen im Aluminiumrahmen eine einfache Auftrennung ermöglicht werden (Bilbao et al. 2021; Goris, M. J. A. A. 2014).

Nach Heckler (2017) hätten weitere Informationen auf den Labeln der Module, wie z. B. die Auskunft über Modulkonzeption und Zellendesign, positive Auswirkungen auf Recyclingprozesse, da schnelle Anpassungen an Verfahrensparameter möglich wären und somit Kosten reduziert werden könnten.

Eine Umfrage an 20 Hersteller von PV-Modulen aus dem Jahr 2014 zeigt, dass zum damaligen Standpunkt das Thema Recyclingdesign bereits Beachtung bei einer kleinen Auswahl von Herstellern gefunden hat. Bei einer Umfrage gaben 17 von 20 befragten Herstellern an, dass PV-Module ein Design für eine bessere Recyclingfähigkeit aufweisen sollten. Insgesamt

⁴⁴ Bei der Stellungnahme zum Referentenentwurf für ein Erstes Gesetz zur Änderung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes.

gaben 90 % der Befragten an, dass das Recycling in der Verantwortung des Herstellers liegt. Damit einhergehende energetische Einsparungen (16 von 20), die Reduzierung des Abbaus von Primärrohstoffen (6 von 20) und die Verbesserung des Unternehmensimage (4 von 20) wurden dabei als Gründe angegeben (Auer 2015).

In Artikel 4, S. 1 der Richtlinie 2012/19/EU heißt es:

„(...) unterstützen die Mitgliedstaaten die Zusammenarbeit zwischen Herstellern und Betreibern von Recycling-Betrieben sowie Maßnahmen zur Förderung der Konzeption und Produktion von Elektro- und Elektronikgeräten (...)“.

Hersteller haben den größten Einfluss auf die demontagegerechte Konstruktion der PV-Module und können den genannten Zielkonflikt auflösen oder minimieren, wenn sich dadurch finanzielle Vorteile ergeben (Sander et al. 2004). Inwiefern diese Vorgabe tatsächlich umgesetzt wird, sollte über weitere Befragungen in Erfahrung gebracht werden.

9 Fazit und Ausblick

Erneuerbare Energien besitzen für die Zukunft aufgrund der emissionsfreien Stromerzeugung großes Nachhaltigkeitspotenzial. Deshalb ist es wichtig, dass sich PV-Module wegen der ressourcenrelevanten Stoffe so lange wie möglich in der Nutzung befinden oder im Fall eines Recyclings nach Möglichkeit alle kritischen Stoffe und weiteren Wertstoffe hochwertig zurückgewonnen werden. Damit können Primärressourcen geschont und somit ein Beitrag zum Ressourcenschutz geleistet werden. Da eine Abhängigkeit von unsicheren Verfügbarkeiten und Lieferketten besteht, ist das Recycling auch in ökonomischer Hinsicht von Bedeutung.

Trotz der Verpflichtungen über die Rücknahme von Altgeräten nach ElektroG besteht für PV-Module noch kein ausreichend zuverlässiges Erfassungssystem. Nicht alle Sammelstellen für EAG nehmen derzeit PV-Module an, was unter anderem auf fehlende Kapazitäten und Fachkenntnisse zurückzuführen ist. Demnach sind einheitliche Standards für die Annahme sowie Schulungen der Mitarbeiter bedeutend (vgl. Abschnitt 8.1.1). Sofern in der Zukunft die Annahme von PV-Modulen nicht an allen Sammelstellen einheitlich geregelt ist und garantiert werden kann, sollte ein zentrales Informationsportal über die Rückgabemöglichkeiten als Ergänzung dienen. Vor allem für die Entsorgung im b2b-Bereich sollte das Vorweisen des Entsorgungsnachweises beim Abbau von Anlagen verpflichtend (Deutsche Umwelthilfe e.V. 2021) und mit entsprechender Überwachung verbunden sein.

Da während der Erfassung viele Akteure beteiligt sind (vgl. Abschnitt 3.3), kann eine beschädigungsfreie Handhabung der Module über die gesamte Entsorgungskette bisher nicht sicher gewährleistet werden. Für die Handhabung und Lagerung von PV-Modulen sind Vorgaben und Richtlinien vorhanden, allerdings werden durch diese eine potenzielle Wiederverwendung_{IA} nicht sichergestellt. Nach der Abfallhierarchie ist die VzWv dem Recycling aufgrund der Ressourcenschonung vorzuziehen, da eine Wiederverwendung eine Maßnahme zur Abfallvermeidung darstellt. Eine VzWv wird in der aktuellen Fassung des ElektroG nicht vorrangig behandelt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde festgestellt, dass nur wenige Wiederverwendungsmaßnahmen für PV-Module innerhalb des Abfallregimes zu finden sind, was durch Recherchen sowie Befragungen bei öRE, EBA und durch Statistiken bestätigt wurde. Vor allem bei größeren Abfallmengen könnten sich bereits Umsetzungen in dieser Hinsicht lohnen. Hierfür könnte nach Sander et al. (2019) eine separate VzWv-Quote in Zukunft bei größeren PV-Altmodulmengen als Steuerungsanreiz dienen, Voraussetzung dafür ist eine verstärkte Umsetzung der VzWv.

Es bleibt abzuwarten, inwiefern die durch die Novellierung mögliche Kooperation zwischen öRE und EBA in der Praxis umgesetzt wird. Sofern eine VzWv stärker praktiziert werden sollte, wäre die Fragestellung interessant, ob bzw. inwiefern diese Mengen den Mengenstrom für Recyclinganlagen beeinflussen.

Die Arbeit zeigt, dass in Deutschland derzeit nur zwei großtechnisch etablierte Behandlungsverfahren für PV-Altmodule zur Verfügung stehen. Für nicht-siliziumbasierte Module gibt es zurzeit das Recyclingverfahren der First Solar GmbH für CdTe-Module, durch welches die Halbleitermaterialien Cd und Te zurückgewonnen werden können. Aufbereitet werden auch einige CdTe-Module anderer Hersteller. Für c-Si- und a-Si-Module steht das Behandlungsverfahren der Reiling Unternehmensgruppe zur Verfügung, das durch eine zusätzliche Anlage mit größerer Kapazität ergänzt werden soll. Für die Zukunft ist die Rückgewinnung von Si und Ag geplant und soll weiterhin erforscht werden.

Des Weiteren können in den erwähnten etablierten Verfahren die Metalle Al, Cu und Sn aufbereitet werden, die Kunststofffraktion wird energetisch verwertet und ein geringer Anteil wird deponiert (vgl. Abschnitt 5). Bislang ist das Glasprodukt aufgrund der Verunreinigungen, die durch die Zerkleinerung in die Glasfraktion gelangen, nicht in der Flachglas- oder Behälterglasproduktion verwendbar (vgl. Abschnitt 7.3.1). Wann und ob das Glas von PV-Altmodulen in Zukunft als solches wieder in der Solarglasindustrie Verwendung findet, ist unklar.

Der Nutzen der Rohstoffrückgewinnung durch das Recycling und die Verwertung der PV-Module (vgl. Abschnitt 5.1.2) ist größer als die Umweltwirkungen, die im Betrieb der Recyclinganlagen verursacht werden (Hengstler et al. 2021). Unter Berücksichtigung der Wertanteile von Si und Ag übernehmen diese zudem eine bedeutende Rolle für die Rentabilität des Kreislaufwirtschaftssystems (Dirr 2016).

Neue Verfahren, wie z. B. das der FLAXRES GmbH, bieten durch den Verzicht auf Chemikalien neue Möglichkeiten, dabei scheint die Rückgewinnung von Ag, Si und hochreinem Glas für die Zukunft vielversprechend. Weitere Unternehmen, die sich in der Startup-Phase befinden, konzentrieren sich nach derzeitigem Stand auf siliziumbasierte Module, bei welchen die Rückgewinnung von Ag und Si durch unterschiedliche Prozesse umgesetzt werden kann.

Großtechnische Rückgewinnungsverfahren stehen für die derzeit geringen anfallenden Mengen an Ga und In nicht zur Verfügung. Die Behandlung von Dünnschichtmodulen, wie z. B. CIGS/CIS, wird aktuell in kleinen Maßstäben erprobt. Eine Etablierung großtechnischer Recyclingverfahren für diverse nicht-siliziumbasierte Modultechnologien wird unter wirtschaftlichen Aspekten weiterhin eine Herausforderung darstellen. Dies betrifft auch Verfahren, bei welchen eine schichtweise Auftrennung des Verbundes erfolgt.

Der Einsatz von Kombinationsverfahren wird in der Zukunft weiterhin Verwendung finden, da diese für die vollständige Auftrennung der einzelnen Fraktionen und zur Rückgewinnung von kritischen Stoffen und Wertstoffen, vor allem bei mechanischen Zerkleinerungsverfahren und im Bereich des Dünnschichtmodulrecyclings, erforderlich sind.

Im derzeitigen Erfassungssystem können Beschädigungen bei PV-Modulen nicht sicher vermieden werden. Deshalb sind weiterhin Verfahren relevant, bei welchen starke Beschädigungen bei Modulen keine Herausforderung darstellen (vgl. Abschnitt 5.3.1 und 5.3.3).

Durch die EAG-BehandV wurden erste rechtliche Vorgaben und Qualitätsanforderungen im Bereich des PV-Modulrecyclings festgelegt, die laut einiger Akteure noch nicht ausgereift sind. Die derzeitigen rechtlichen Vorgaben und die Behandlungsanforderungen zeigen, dass die Rückgewinnung von z.B. Ag, Si, In und Ga noch nicht zum Stand der Technik gehört. In diesem Bereich sollten stärkere Anreize und Vorgaben mit entsprechenden Übergangsfristen geschaffen werden.

Der Ausbau der inländischen Recyclingstruktur würde den Ressourcenschutz fördern und Transportketten kürzer halten. Dazu fehlt jedoch die wirtschaftliche Sicherheit, da die Investitionen in effiziente Aufbereitungstechniken aufgrund der derzeit geringen anfallenden Mengen (vgl. Abschnitt 2.1) nach wie vor ein hohes Risiko bergen. Recyclingtechniken müssen wegen der Entwicklungen der Modultechnologien flexibel und effizient sein, um die verschiedenen Zusammensetzungen der PV-Module auch in der Zukunft wirtschaftlich aufbereiten zu können.

Da das Thema DfR bereits von einigen Herstellern in Betracht gezogen wird, sollte eruiert werden, ob für zukünftige Produktdesigns eine bessere Recyclingfähigkeit oder andere Aspekte, die in Abschnitt 8.3.3 genannt wurden, berücksichtigt werden sollen. Hierfür sollten Umfragen mit Herstellern durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- Auer, Agathe (2015): Photovoltaic module decommissioning and recycling in Europe and Japan. current methodologies, norms and future trends. Uppsala. Online verfügbar unter https://www.academia.edu/en/36629222/Photovoltaic_module_decommissioning_and_recycling_in_Europe_and_Japan_current_methodologies_norms_and_future_trends, zuletzt geprüft am 26.08.2022.
- Beckmann, Jürgen (2012): Wieso Abfall? Entsorgung von Photovoltaik-Anlagen (Heft 2.12). In: *Installateur*. Online verfügbar unter https://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/elektro_und_elektronikgeraete/doc/entsorgung_photovoltaik.pdf, zuletzt geprüft am 12.07.2022.
- Benedek, Laura; Luidold, Stefan; Schnideritsch, Holger; Antrekowitsch, Helmut (2014): Recyclingkonzepte für Photovoltaikmodule. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH (Recycling und Rohstoffe, Band 7).
- Bilbao, Jose I.; Heath, Garvin; Norgren, Alex; Lunardi, Marina M.; Carpenter, Alberta; Corkish, Richard (2021): PV Module Design for Recycling Guidelines. Online verfügbar unter https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/10/T12_2021_PV-Design-for-Recycling-Guidelines_Report.pdf, zuletzt geprüft am 13.09.2022.
- BINE Informationsdienst (2010): Recycling von Photovoltaik-Modulen. Online verfügbar unter <https://www.forum-hausbau.de/data/bine-recycling-von-photovoltaik-modulen.pdf>, zuletzt geprüft am 18.07.2022.
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (2017): Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 31 A. Umsetzung des Elektro- und Elektronikgesetzes. Online verfügbar unter https://www.laga-online.de/documents/m-31-a_1517834714.pdf, zuletzt geprüft am 28.06.2022.
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (2018): Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 31 B. Umsetzung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes. Technische Anforderungen an die Behandlung und Verwertung von Elektro- und Elektronikgeräten. Online verfügbar unter https://www.laga-online.de/documents/m-31b-18-04-2018-neu_1527151713.pdf, zuletzt geprüft am 30.06.2022.
- Bundesarbeitsgemeinschaft Arbeit e.V.; Wiederverwendung-Interessengemeinschaft der sozialwirtschaftlichen Reparatur- und Recyclingzentren e. V.; Evangelischer Fachverbands für Arbeit und soziale Integration e. V. (2020): Gemeinsame Stellungnahme der Bundesarbeitsgemeinschaft Arbeit e.V. Fachgruppe Arbeit und Umwelt (bag), der

Evangelischen Fachstelle für Arbeits- und Gesundheitsschutz (EFAS) und der Wiederverwendung-Interessengemeinschaft der sozialwirtschaftlichen Reparatur- und Recyclingzentren e.V. (WIR) zum Referentenentwurf für ein Erstes Gesetz zur Änderung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes vom 14.10.2020. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19._Lp/elektrog_aenderung/Stellungnahmen/Stellungnahmen_Verbaende/elektrog_aenderung_stn_bag_arbeit_efas_wir_bf.pdf, zuletzt geprüft am 24.08.2022.

Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV) (2020a): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm 3 – 2020 bis 2023. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/ressourceneffizienz_programm_2020_2023.pdf, zuletzt geprüft am 10.07.2022.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV) (2020b): Referentenentwurf für eine Elektro- und Elektronik-Altgeräte-Behandlungsverordnung. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/gesetz/referentenentwurf-fuer-eine-elektro-und-elektronik-altgeraete-behandlungsverordnung>, zuletzt geprüft am 28.06.2022.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2020c): Elektro- und Elektronikgeräte. Daten über Elektro- und Elektronikgeräte in Deutschland (2006 - 2020). Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/kreislaufwirtschaft/statistiken/elektro-und-elektronikaltgeraete>, zuletzt geprüft am 03.08.2022.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2020d): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG). Lesefassung. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19._Lp/elektrog_aenderung/Entwurf/elektrog_aenderung_lesefassung_bf.pdf, zuletzt geprüft am 18.07.2022.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2022): Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte - BMUV-Gesetze und Verordnungen. Berlin, 29.06.2022. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/gesetz/richtlinie-2012-19-eu-ueber-elektro-und-elektronik-altgeraete>, zuletzt geprüft am 29.06.2022.

- Bundesnetzagentur (2018): Das Marktstammdatenregister. Gesamtkonzept. Online verfügbar unter https://www.marktstammdatenregister.de/MaStRHilfe/files/regHilfen/MaStR-Gesamtkonzept_Stand%20September%202018.pdf, zuletzt geprüft am 18.07.2022.
- Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. Wirtschafts und Arbeitgeberverband (BDE) (2020): Warum Abfallexporte und -importe unverzichtbar sind. Fakten gegen Mythen. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bde.de/presse/publikationen/>, zuletzt geprüft am 04.08.2022.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (2022): PV-Anlagen: Im Angesicht der Entsorgungswelle, 25.08.2022. Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/online-magazin-zweitausend50/stoffwechsel/pv-anlagen-im-angesicht-der-entsorgungswelle/>, zuletzt geprüft am 25.08.2022.
- Bundesverband Solarwirtschaft e. V. (BSW) (2020): BSW Solar - Verspätete Stellungnahme zu den Referentenentwürfen zum ElektroG 3, vom 18.11.2020. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19_Lp/elektrog_aenderung/Stellungnahmen/Stellungnahmen_Verbaende_verspaetet/elektrog_aenderung_stn_bsw_bf.pdf, zuletzt geprüft am 02.09.2022.
- CENELEC (2018): Solar Photovoltaic energy systems. Online verfügbar unter https://standards.cencenelec.eu/BPCLC/BP_TC_82.pdf, zuletzt geprüft am 12.08.2022.
- Defrenne, N. (2018): New Challenges of PV Life Cycle. ECO-PV Conference. Lyon, 27.11.2018. Online verfügbar unter <https://www.ask-eu.de/Artikel/31027/Mechanische-Verbundsaufftrennung-beim-Recycling-von-c-Si-Photovoltaikmodulen-Aktueller-Stand-und-neue-Ansaetze.htm>, zuletzt geprüft am 22.07.2022.
- Deutsche Umwelthilfe e.V. (2021): Kreislaufwirtschaft in der Solarbranche stärken. Alte Photovoltaik-Module für den Klima- und Ressourcenschutz nutzen. Weißbuch zur Stärkung der Wiederverwendung und des Recyclings von Photovoltaik-Modulen. Radolfzell. Online verfügbar unter https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Pressemitteilungen/Kreislaufwirtschaft/210310_Wei%C3%9Fbuch_Kreislaufwirtschaft_Solarmodule_st%C3%A4rken_DEU_FINAL.pdf, zuletzt geprüft am 11.07.2022.
- Deutscher Bundestag (24.02.2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz). KrWG. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/KrWG.pdf>, zuletzt geprüft am 13.07.2022.

- Dirr, Martin (2016): Strategische Planung eines Kreislaufwirtschaftssystems für Photovoltaikmodule. Datenbasierte Prognose und Entwicklung eines umfassenden Systemverständnisses. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4714249>.
- Dobra, Tudor; Wellacher, Martin; Pomberger, R. (2020): Mechanische Verbundsaufftrennung beim Recycling von c-Si Photovoltaikmodulen: Aktueller Stand und neue Ansätze. Online verfügbar unter <https://www.ask-eu.de/Artikel/31027/Mechanische-Verbundsaufftrennung-beim-Recycling-von-c-Si-Photovoltaikmodulen-Aktueller-Stand-und-neue-Ans%C3%A4tze.htm>, zuletzt geprüft am 22.07.2022.
- EIT RawMaterials GmbH (2021): European project ReProSolar led by Veolia Germany will test full photovoltaic recycling on an industrial scale, 10.06.2021. Online verfügbar unter <https://eitrawmaterials.eu/european-project-reprosolar-led-by-veolia-germany-will-test-full-photovoltaic-recycling-on-an-industrial-scale/>, zuletzt geprüft am 15.08.2022.
- EPR compact GmbH & Co. KG (2020): Stellungnahme zum Referentenentwurf für ein Erstes Gesetz zur Änderung des ElektroG, vom 12.10.2020. Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19._Lp/elektrog_aenderung/Stellungnahmen/Stellungnahmen_Verbaende/elektrog_aenderung_stn_epr_bf.pdf, zuletzt geprüft am 22.08.2022.
- Europäische Kommission (2017): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017. Brüssel. Online verfügbar unter [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0490&from=DE#:~:text=Liste%20kritischer%20Rohstoffe%20f%C3%BCr%20die%20EU,-Die%20im%20Folgenden&text=B.,USA%20\(Beryllium%20und%20Helium\).](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0490&from=DE#:~:text=Liste%20kritischer%20Rohstoffe%20f%C3%BCr%20die%20EU,-Die%20im%20Folgenden&text=B.,USA%20(Beryllium%20und%20Helium).), zuletzt geprüft am 10.07.2022.
- Europäische Kommission (2020): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN. Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. Brüssel. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>, zuletzt geprüft am 10.07.2022.

- Europäische Union (2012): RICHTLINIE 2012/19/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES, vom 04.07.2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32012L0019&from=DE#d1e462-38-1>, zuletzt geprüft am 06.06.2022.
- Fislake, Malte (2022a): Besprechung des Fragebogens zur Wiederverwendung und Aufbereitung von PV-Anlagen mit Herrn Fislake der Reiling Glas Recycling GmbH & Co. KG, 19.07.2022. Online-Meeting.
- Fislake, Malte (2022b): Besprechung weiterer Fragen bzgl. PV-Modulaufbereitung mit Herrn Fislake der Reiling Glas Recycling GmbH & Co. KG, 19.08.2022. Online-Meeting.
- FLAXRES GmbH (2022a): Fragebogen zur Wiederverwendung und Aufbereitung von Photovoltaikanlagen, 05.07.2022. E-Mail an Roswitha Hoffmann.
- FLAXRES GmbH (2022b): Weitere Fragen zur Aufbereitung von Photovoltaikmodulen, 09.08.2022. E-Mail an Roswitha Hoffmann.
- Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie (2021): Projekt ReSi-Norm. Standardisierung für Recycling von PV-Modulen. Online verfügbar unter <https://www.iwks.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/pressemeldungen-2021/projekt-resinorm.html>, zuletzt aktualisiert am 14.08.2022, zuletzt geprüft am 14.08.2022.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer-ISE) (2022a): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Unter Mitarbeit von Harry Wirth. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>, zuletzt geprüft am 04.07.2022.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer-ISE) (2022b): EoL – Entwicklung eines industrietauglichen Recycling-Prozesses für PV-Module -Fraunhofer ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/eol.html>, zuletzt geprüft am 17.07.2022.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer-ISE) (2022c): PERC-Solarzellen aus zu 100 Prozent recyceltem Silizium. Unter Mitarbeit von Sophia Bächle und Peter Dold. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2022/0122_ISE_d_PI_PERC-Solarzellen-aus-recyceltem-Silizium-hergestellt.pdf, zuletzt geprüft am 26.07.2022.

- Fuhs, Michael (2021): pv magazine highlight top business model: So gelangen Module doch noch in den Kreislauf. Hg. v. pv magazine group GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.pv-magazine.de/2021/11/29/pv-magazine-highlight-top-business-model-so-gelangen-module-doch-noch-in-den-kreislauf/>, zuletzt geprüft am 26.08.2022.
- Goris, M. J. A. A. (2014): Recycling Friendly Design. the CU-PV Project for sustainable photovoltaics. Amsterdam. Online verfügbar unter https://www.sustainablepv.eu/fileadmin/sustainablepv/user/doc/Recycling_Friendly_Design_side_event_EUPVSEC_23-9-2014__Read-Only_.pdf, zuletzt geprüft am 18.08.2022.
- Heath, Garvin; Wade, Andreas; Komoto, Keiichi; Lee, Jin-Seok; Zhang, Jia; Ravikumar, Dwarakanath (2018): End-of-Life-Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies. Online verfügbar unter https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/End_of_Life_Management_of_Photovoltaic_Panels_Trends_in_PV_Module_Recycling_Technologies_by_task_12.pdf, zuletzt geprüft am 22.07.2022.
- Heckler, Felix (2017): Recycling von Photovoltaikmodulen im regionalen Kontext. Theoretische Grundlagen, desiderate Rahmenbedingungen und prävalierende Hemmnisfaktoren. Universität Leipzig, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Dissertation.
- Heitmann, Benedikt (2017): 28. Abfalltagung des Landesamts für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein. Recycling von siliziumbasierten Photovoltaik-Modulen. Online verfügbar unter https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/A/abfallwirtschaft/Downloads/abfalltagungen/2017_Heitmann.html, zuletzt geprüft am 16.08.2022.
- Hellmann Process Management GmbH & Co. KG (2022): Plan E. E-Schrott einfach & richtig entsorgen. E-Schrott-Rückgabefinder, 29.08.2022. Online verfügbar unter <https://entsorgungsstellen.e-schrott-entsorgen.org/>, zuletzt geprüft am 29.08.2022.
- Hengstler, Jasmin; Russ, Manfred; Stoffregen, Alexander; Hendrich, Aline; Weidner, Simone; Held, Michael; Briem, Ann-Kathrin (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_35-2021_oekobilanzen_windenergie_photovoltaik.pdf, zuletzt geprüft am 16.08.2022.

- Hessisches Statistisches Landesamt (2021a): Abfallmengenbilanz des Landes Hessen für das Jahr 2020. Hg. v. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV). Wiesbaden. Online verfügbar unter https://umwelt.hessen.de/sites/umwelt.hessen.de/files/2021-12/abfallmengenbilanz_2020.pdf, zuletzt geprüft am 11.07.2022.
- Hessisches Statistisches Landesamt (2021b): Musterbogen für die Abfallentsorgung 2021 - Erstbehandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Duisburg. Online verfügbar unter https://statistik.hessen.de/sites/statistik.hessen.de/files/musterbogen_ers_08042022.pdf, zuletzt geprüft am 22.07.2022.
- HME Hamburger Müllentsorgung Rohstoffverwertungsgesellschaft mbH (HME) (2022): Wer wir sind. Wiederverwendung von Solarmodulen. Online verfügbar unter <https://hme-hamburg.de/>, zuletzt geprüft am 25.08.2022.
- International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS) (2014): Performance and reliability of photovoltaic systems. Subtask 3.2: Review of failures of photovoltaic modules : IEA PVPS task 13 : external final report IEA-PVPS: International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS T13-01:2014).
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2016): End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. Online verfügbar unter <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>, zuletzt geprüft am 24.08.2022.
- INTERPOL (2020): Strategic Analysis Report. Emerging criminal trends in the global plastic waste market since January 2018. Lyon. Online verfügbar unter <https://www.interpol.int/News-and-Events/News/2020/INTERPOL-report-alerts-to-sharp-rise-in-plastic-waste-crime>, zuletzt geprüft am 16.08.2022.
- Joule (2014): Module aus dem Netz. In: *Joule*. Online verfügbar unter https://www.second-sol.com/de/uploads/datei/SecondSol-Module_aus_dem_Netz.pdf, zuletzt geprüft am 19.07.2022.
- Kernbaum, Sebastian; Hübner, Tammo (2013): Recycling von Photovoltaikmodulen. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH (Recycling und Rohstoffe, Band 6).
- Kraus, Katja; Leuthold, Sandra; Reichart, Almut (2015): Wegweiser Beste Verfügbare Techniken Made in Germany. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter

- https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/wegweiser_beste_verfuegbare_techniken_made_in_germany_2015.pdf, zuletzt geprüft am 16.08.2022.
- Krause, Jan (2022a): Telefongespräch mit Herrn Krause (HME Hamburger Müllentsorgung Rohstoffverwertungsgesellschaft mbH) über den Fragebogen zur Wiederverwendung von Photovoltaikmodulen, 30.06.2022.
- Krause, Jan (2022b): Telefongespräch mit Herrn Krause (HME Hamburger Müllentsorgung Rohstoffverwertungsgesellschaft mbH), 11.08.2022.
- Kummer, Sina; Strobelt, Axel; Kohlmeyer, Regina; Kitazume, Christian; Oehme, Ines; Schnepel, Christiane (2020): Empfehlung des UBA für die Weiterentwicklung der Behandlungsanforderungen nach ElektroG. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_148-2020_bericht_empfehlungen_zu_behandlungsanforderungen.pdf, zuletzt geprüft am 05.08.2022.
- Löhle, Stephanie; Schmiedel, Ute; Bartnik, Sabine; cyclos GmbH (2020): Analyse der Datenerhebungen nach ElektroG und UStatG über das Berichtsjahr 2018 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflichten 2020 (Teilbericht). Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-15_texte_135-2020_eag-daten2018.pdf, zuletzt geprüft am 17.08.2022.
- Lohmann, Iris Ann; Scholz, Tobias (2019): Gemeinsame Aufbereitung verschiedenartiger Photovoltaikmodule zur Wertstoffrückgewinnung. Abschlussbericht über das Forschungs- und Entwicklungsprojekt. Duisburg. Online verfügbar unter https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-33913_01-Hauptbericht.pdf, zuletzt geprüft am 22.07.2022.
- Lunardi, Marina Monteiro; Alvarez-Gaitan, Juan Pablo; Bilbao, José I.; Corkish, Richard (2018): A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. Online verfügbar unter <https://www.intechopen.com/chapters/59381>, zuletzt geprüft am 15.08.2022.
- LuxChemtech GmbH (o.J.): Verfahren zur zerstörungsfreien Aufbereitung gebrauchter Solarmodule. Online verfügbar unter <https://lc-freiberg.de/produkte-und-leistungen/aufbereitung-von-solarmodulen/>, zuletzt geprüft am 15.08.2022.

- LuxChemtech GmbH (2021): Innovative Recyclingtechnologien für die Photovoltaikindustrie. Online verfügbar unter https://crm.saena.de/sites/default/files/civicrm/persist/contribute/files/20210423_LuxChemTech.pdf, zuletzt geprüft am 15.08.2022.
- Mertens, Konrad (2020): Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis. 5., aktualisierte Auflage. München: Hanser (Hanser eLibrary). Online verfügbar unter <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446465060>.
- Neubauer, Alexander; Thärichen, Holger (2017): Die kommunale Erfassung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Praktische Fragen und Antworten. Berlin: VKU Verlag GmbH. Online verfügbar unter https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/Verbandsseite/Publikationen/2017/VKU_Information_89_Endfassung.pdf, zuletzt geprüft am 29.06.2022.
- Photorama (2022): About us. Online verfügbar unter <https://www.photorama-project.eu/about-us/>, zuletzt aktualisiert am 15.08.2022, zuletzt geprüft am 15.08.2022.
- photovoltaik (2021): Solar Materials hat neues Recyclingverfahren für Photovoltaikmodule entwickelt. Stuttgart: Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. KG, 16.11.2021. Online verfügbar unter <https://www.photovoltaik.eu/solarmodule/solar-materials-hat-neues-recyclingverfahren-fuer-photovoltaikmodule-entwickelt>, zuletzt geprüft am 24.08.2022.
- PV Cycle Deutschland GmbH (o.J.a). Online verfügbar unter <https://pvcycle.de/>, zuletzt geprüft am 29.07.2022.
- PV Cycle Deutschland GmbH (o.J.b): PV CYCLE Deutschland GmbH - die praktizierten Entsorgungssysteme in Deutschland. Online verfügbar unter <https://pvcycle.de/wp-content/uploads/2019/12/ElectroG-doc.pdf>, zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- PV Cycle Deutschland GmbH (2020): Stellungnahme zu den Referentenentwürfen zum ElektroG 3 und zur EAG Behandlungsv. Düsseldorf, 14.10.2020. Nachricht an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- pvXchange Trading GmbH (o.J.): Qualitätsprüfung von Solarmodulen. Online verfügbar unter <https://www.pvxchange.com/Qualitaetspruefung-von-Solarmodulen>, zuletzt geprüft am 28.08.2022.
- Quaschnig, Volker (2020): Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe - Techniken und Planung - Ökonomie und Ökologie - Energiewende. 5., aktualisierte Auflage. München: Hanser Verlag. Online verfügbar unter http://files.hanser.de/Files/Article/ARTK_LPR_9783446462939_0001.pdf.
- Quaschnig, Volker (2022): Regenerative Energiesysteme. Technologie, Berechnung, Klimaschutz. 11., aktualisierte Auflage. München: Hanser.

- Raithel (2014): International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV). 2013 Results.
- Rechenberg, Bettina; Kitazume, Christian; Kohlmeyer, Regina; Strobelt, Axel; Kummer, Sina (2019): Rohstoffe im Kreislauf führen, Schadstoffe ausschleusen - zum Umgang mit Elektroaltgeräten. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH (Recycling und Rohstoffe, Band 12).
- Rinivasol Global Services B. V. (o.J.): Kurze Wege - große Wirkung. Technologie zum Modulrecycling. Online verfügbar unter <https://www.rinivasol.de/modul-re-using/technologie>, zuletzt geprüft am 01.09.2022.
- Rinivasol Global Services B. V. (2022): Presse: Artikel vom 20.06.2022. Online verfügbar unter <https://www.rinivasol.de/presse/artikel/presse-mehr-als-95-pv-schrott-recyclebar>, zuletzt geprüft am 05.09.2022.
- ROSI | Return of silicon (2022): Recycling von Photovoltaik-Modulen. Grenoble (Frankreich). Online verfügbar unter <https://www.rosi-solar.com/de/recycling-von-photovoltaik-modulen/>, zuletzt geprüft am 15.08.2022.
- ruhlamat Germany: OEM-Hersteller und deren Bedeutung in der Industrie. Gerstungen. Online verfügbar unter <https://www.ruhlamat.com/de/blog/oem-hersteller-und-deren-bedeutung-der-industrie>, zuletzt geprüft am 19.07.2022.
- Saint-Sernin, E.; Einhaus, R.; Bamberg, K.; Panno, P. (2008): Industrialisation of Apollon's nice module technology. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/266881588_Industrialisation_of_Apollon_'s_nice_module_technology, zuletzt geprüft am 12.08.2022.
- Sander, Knut; Goessling-Reisemann, Stefan; Zimmermann, Till; Marscheider-Weidemann, Frank; Wilts, Henning; Schebeck, Liselotte et al. (2016): Ermittlung von Substitutionspotenzialen von primären strategischen Metallen durch Sekundärmaterialien. (Kurztitel: Recyclingpotenzial strategischer Metalle) -ReStra-. Hamburg. Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3711_93_339_substitutionspotentiale_metalle_bf.pdf, zuletzt geprüft am 13.07.2022.
- Sander, Knut; Otto, Sarah Julie; Rödiger, Lisa; Wagner, Lukas; Ökopol GmbH (2018): Behandlung von EAG unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten. Abschlussbericht. Umweltbundesamt. Hamburg. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-04-12_texte_31-2018_behandlung_eag.pdf, zuletzt geprüft am 12.07.2022.

- Sander, Knut; Schilling, Stephanie; Wambach, Karsten; Schlenker, Sylke; Müller, Anja; Springer, Johann et al. (2007): STUDIE ZUR ENTWICKLUNG EINES RÜCKNAHME- UND VERWERTUNGSSYSTEM FÜR PHOTOVOLTAISCHE PRODUKTE. Hamburg. Online verfügbar unter https://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/12655/pdf/Gesamtbericht_PVCycle_de.pdf, zuletzt geprüft am 27.08.2022.
- Sander, Knut; Wagner, Lukas; Jepsen, Dirk; Zimmermann, Till; Schomerus, Thomas (2019): Gesamtkonzept zum Umgang mit Elektro(alt)geräten - Vorbereitung zur Wiederverwendung. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-04_texte_gesamtkonzept-eag.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2022.
- Sander, Knut; Zangl, Stéphanie; Reichmuth, Matthias; Schröder, Gerd (2004): Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung. Umwelt-Forschungs-Plan, FKZ 202 33 304 Endbericht. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2789.pdf>, zuletzt geprüft am 02.08.2022.
- Schomerus, Thomas; Fabian, Dipl. Umweltwiss. Matthias; Fouquet, Dörte; Nysten LL.M., Jana Viktoria (2014): Juristisches Gutachten über die Förderung der Vorbereitung zur Wiederverwendung von Elektro-Altgeräten im Sinne der zweiten Stufe der Abfallhierarchie. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_36_2014_komplett_0.pdf, zuletzt geprüft am 17.07.2022.
- Schröder, Wolfgang (2021): Photovoltaik & Batteriespeicher. Planung - Technik - Kosten - Förderung: STIFTUNG WARENTEST.
- SOLAR MATERIALS GmbH (2022): Warum Solarmodule recyceln? Online verfügbar unter <https://solar-materials.com/>, zuletzt aktualisiert am 05.09.2022, zuletzt geprüft am 05.09.2022.
- Solaranlagen-Portal (2022): Photovoltaik-Recycling: PV-Module umweltgerecht entsorgen. Unter Mitarbeit von Gina Doormann. Online verfügbar unter <https://www.solaranlagen-portal.com/solar/photovoltaik-entsorgung>.
- Statista (2022): Neu installierte Leistung von Photovoltaikanlagen in Deutschland bis 2021. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/29264/umfrage/neu-installierte-nennleistung-von-solarenergie-in-deutschland-seit-2004/>, zuletzt geprüft am 18.08.2022.

- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022a): 2,2 Millionen Photovoltaik-Anlagen in Deutschland installiert. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/06/PD22_N037_43.html, zuletzt geprüft am 15.08.2022.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022b): Zur Erstbehandlung angenommene Elektro- und Elektronikaltgeräte. Wiesbaden. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/liste-erstbehandlung.html>, zuletzt geprüft am 03.08.2022.
- Staudt-Fischbach, Peter (2022a): Fragebogen zur Wiederverwendung und Aufbereitung von Photovoltaikanlagen, 29.06.2022. E-Mail an Roswitha Hoffmann.
- Staudt-Fischbach, Peter (2022b): Telefongespräch mit Herrn Staudt-Fischbach (First Solar GmbH), 30.08.2022.
- stiftung ear (2022a): Telefongespräch mit einem Mitarbeiter der stiftung elektro-altgeräte register (stiftung ear), 12.09.2022.
- stiftung elektro-altgeräte register (stiftung ear) (2022b): Behältnisse. Nürnberg, 2022. Online verfügbar unter <https://www.stiftung-ear.de/de/themen/elektrog/oere/abholkoordination/gruppen/behaeltnisse>, zuletzt geprüft am 29.06.2022.
- stiftung elektro-altgeräte register (stiftung ear) (2022c): Gerätearten. Nürnberg, 2022. Online verfügbar unter <https://www.stiftung-ear.de/de/themen/elektrog/hersteller-bv/kategorien/geraetearten>, zuletzt geprüft am 29.06.2022.
- stiftung elektro-altgeräte register (stiftung ear) (2022d): Jahres-Statistik-Mitteilung. Nürnberg, 2022. Online verfügbar unter <https://www.stiftung-ear.de/de/service/statistische-daten/jahres-statistik-mitteilung>, zuletzt geprüft am 11.08.2022.
- stiftung elektro-altgeräte register (stiftung ear) (2022e): Verzeichnis der Betreiber von Erstbehandlungsanlagen. Nürnberg. Online verfügbar unter <https://www.ear-system.de/ear-verzeichnis/eba#no-back>, zuletzt geprüft am 21.07.2022.
- stiftung elektro-altgeräte register (stiftung ear) (2022f): Wer wir sind. Nürnberg. Online verfügbar unter <https://www.stiftung-ear.de/de/ueber-uns/wer-wir-sind>, zuletzt geprüft am 10.09.2022.
- stiftung elektro-altgeräte register (stiftung ear) (2022g): Abholkoordination. Nürnberg, 30.06.2022. Online verfügbar unter <https://www.stiftung-ear.de/de/themen/elektrog/oere/abholkoordination>, zuletzt geprüft am 30.06.2022.

- Tao, Jing; Yu, Suiran (2015): Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 141, S. 108–124. DOI: 10.1016/j.solmat.2015.05.005.
- Umweltbundesamt (2021): Elektro- und Elektronikaltgeräte. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/elektro-elektronikaltgeraete#berichterstattung-zur-sammlung-und-verwertung-von-elektroaltgeraten-die-weeee-richtlinie>, zuletzt geprüft am 30.06.2022.
- Umweltbundesamt (2022): Elektroaltgeräte. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/elektroaltgeraete>, zuletzt aktualisiert am 29.06.2022, zuletzt geprüft am 29.06.2022.
- Veolia Group (2022): Recycling photovoltaic panels, a technology unique in France. Solution. Online verfügbar unter <https://www.veolia.com/en/solution/recycling-photovoltaic-panels-technology-unique-france>, zuletzt geprüft am 08.08.2022.
- Wambach, Karsten (2017): Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module. IEA PVPS Task12, Subtask 2, LCA. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/324703317_Task_12_Life_Cycle_Inventory_of_Current_Photovoltaic_Module_Recycling_Processes_in_Europe, zuletzt geprüft am 02.09.2022.
- Wild-Scholten, Mariska de (2013): Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, S. 296–305. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/259609641_Energy_payback_time_and_carbon_footprint_of_commercial_photovoltaic_systems, zuletzt geprüft am 13.07.2022.
- Wolf, Julia; Brüning, Ralf; Nellesen, Lisa; Schiemann, Jochen (2017): Anforderungen an die Behandlung spezifischer Elektroaltgeräte unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-09-05_texte_70-2017_behandlung-elektroaltgeraete_0.pdf, zuletzt geprüft am 12.09.2022.

Anhang

A Fragebogen zum aktuellen Stand der Erfassung, Wiederverwendung und Verwertung von Photovoltaikanlagen

Bitte geben Sie für Rückfragen den Namen des Bearbeiters, des Betriebes und den zugehörigen Landkreis an.

Bearbeiter/in: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

Betrieb (Landkreis): Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

Datum: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

1. **Werden durch Ihren Betrieb die PV-Module im gesamten Landkreis erfasst, und wenn nein, sind Ihnen weitere Annahmestellen bekannt?**

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

2. **Wie hoch war die erfasste Menge der Photovoltaikmodule in den Jahren 2018 bis 2021?**

Jahr	Menge der gesamten erfassten Photovoltaikmodule
2018	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
2019	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
2020	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
2021	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

3. Werden bei Ihnen die Photovoltaikmodule aus unterschiedlichen Generationen (unterschiedliche PV-Typen, siehe folgende Tabelle) erfasst?

Ja Nein

3.1 Wenn ja, geben Sie bitte die Menge der angelieferten Photovoltaikmodule an, die zu den folgenden Modultypen gehören.

Generation 1 (Kristalline Zellen)	Generation 2 (Dünnschichtmodule)	Generation 3 (andere Technologien)
Monokristallines Silizium	Amorphes Silizium	Stapelzellen
Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Polykristallines Silizium	Cadmium-Tellurid	Hybride Zellen
Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
	CIGS/CIS	Organische Zellen
	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
		Sonstige
		Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

4. Wird in Ihrer Annahmestelle geprüft, ob die Bauteile einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden können?

Ja Nein

4.1 Werden die erfassten Photovoltaikmodule nach Wiederverwendung und Recycling getrennt erfasst?

Ja Nein

4.1.1 Wenn ja, bitte geben Sie die Mengen in der untenstehenden Tabelle an.

Menge der erfassten Photovoltaikmodule nach Wiederverwendung	Menge der erfassten Photovoltaikmodule nach Recycling
Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

B Auswertung des Fragebogens zum aktuellen Stand der Erfassung, Wiederverwendung und Verwertung von Photovoltaikanlagen

Neben den 21 Landkreisen und 5 kreisfreien Städten wurden zudem die Stadt Maintal aus dem Main-Kinzig-Kreis und die Stadt Bad Vilbel aus dem Wetteraukreis angeschrieben. Von 22 Befragten wurde der Fragebogen ausgefüllt und zurückgesendet. Von sechs Betrieben wurden in dem Zeitraum der Bearbeitung keine Antworten zurückgesendet. Zusätzliche Antworten zu dem Fragebogen, die der E-Mail hinzugefügt wurden, werden im Folgenden zusammengefasst. Zwei Fragebögen wurden an den Fachdienst Abfallwirtschaft des jeweiligen Landkreises weitergeleitet. Drei öRE von kreisfreien Städten geben an, dass keine PV-Module in den Jahren 2018 bis 2021 bei ihrer Sammelstelle eingegangen sind. Ein Betrieb gibt an, dass die PV-Module erst seit diesem Jahr (2022) zurückgenommen werden. Nach Angabe des Betriebes gingen in den Jahren davor keine Anfragen zu PV-Altmodulen ein.

1. Werden durch Ihren Betrieb die PV-Module im gesamten Landkreis erfasst, und wenn nein, sind Ihnen weitere Annahmestellen bekannt?

Insgesamt 20 der Befragten geben an, dass durch ihren Betrieb die PV-Module im gesamten Landkreis erfasst werden. Ein Betrieb erwähnt, dass weitere Annahmestellen über private Entsorgungsunternehmen laufen. Ein Betrieb gibt an, dass die Erfassung im gesamten Landkreis erfolgt, mit der Ausnahme von einer Stadt. Unbekannt sind weitere Annahmestellen bei nur einem Betrieb.

2. Wie hoch war die erfasste Menge der Photovoltaikmodule in den Jahren 2018 bis 2021?

Abbildung 19 stellt die erfassten Mengen der PV-Module in den Jahren 2018 bis 2021 dar.

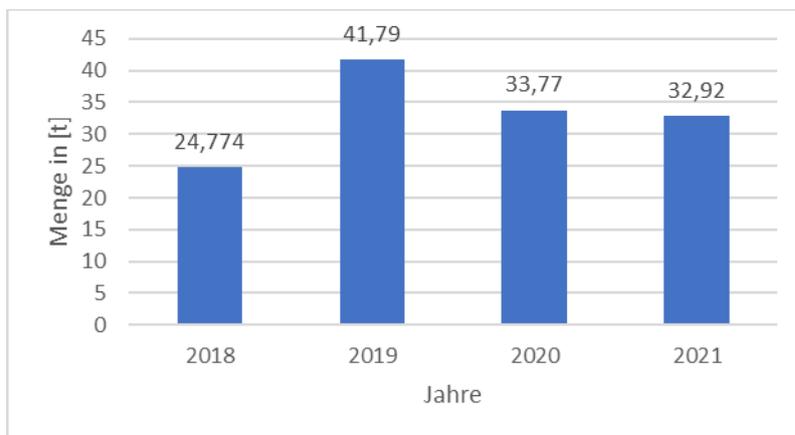


Abbildung 19: Mengen der erfassten PV-Module in Hessen in den Jahren 2018 bis 2021

Bei drei Betrieben wurden in den letzten Jahren keine PV-Module angeliefert, trotz der Möglichkeit zur Abgabe. Für das Jahr 2021 konnte von einem Betrieb noch keine Angabe zu der erfassten Menge von PV-Modulen gemacht werden.

3. Werden bei Ihnen die Photovoltaikmodule aus unterschiedlichen Generationen (unterschiedliche PV-Typen, siehe folgende Tabelle) erfasst?

Alle Betriebe geben an, dass die PV-Module aus unterschiedlicher Generation nicht separat erfasst werden.

3.1 Wenn ja, geben Sie bitte die Menge der angelieferten Photovoltaikmodule an, die zu den folgenden Modultypen gehören.

Siehe Frage 3.

4. Wird in Ihrer Annahmestelle geprüft, ob die Bauteile einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden können?

Nur einer der befragten Betriebe gibt an, dass die PV-Module auf eine Eignung zur VzWv überprüft werden.

4.1 Werden die erfassten Photovoltaikmodule nach Wiederverwendung und Recycling getrennt erfasst?

Ein Betrieb gab hierzu keine Antwort an, der Rest antwortete mit „Nein“.

4.1.1 Wenn ja, bitte geben Sie die Mengen in der untenstehenden Tabelle an.

Die Tabelle wurde von keinem der Befragten ausgefüllt.

C Fragebogen zur Wiederverwendung von Photovoltaikanlagen

Kontaktdaten

Bitte füllen Sie für Rückfragen die untenstehende Tabelle aus.

Name des Bearbeiters	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Adresse der Anlage	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Bearbeiter/in	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Datum	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

- 1. Zu welchem Zeitpunkt und von wem wird entschieden, ob PV-Module zur Vorbereitung zur Wiederverwendung gehen? (z. B. nach der Demontage der Module beim Endnutzer vor Ort)**

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

- 2. Welche PV-Technologien (Dünnschicht- oder Dickschichtmodule etc.) nehmen Sie an und zu welchen Anteilen (%) werden diese angeliefert? (Schätzung)**

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

3. Wie verläuft die Überprüfung auf Wiederverwendung?

Bitte geben Sie die einzelnen Schritte und die Methoden an. Im Anhang ist ein Musterbeispiel zu sehen.

Welcher Schritt wird durchgeführt?	Zu welchem Zweck wird dieser Schritt durchgeführt?	Welche Methode wird für den Schritt verwendet?	Welcher Soll-Zustand ist gewünscht?
Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

-
- 4. Gibt es verschiedenen Richtlinien, Standards etc., nach welchen Sie sich richten? Wenn ja, welche?**

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

- 5. Werden auch nur einzelne PV-Modulteile wiederverwendet und der Rest z. B. zur Entsorgung gebracht?**

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

- 6. Wie schnell kann die Möglichkeit zur Wiederverwendung bei PV-Modulen durch falsche Handhabung oder z. B. nicht korrekten Transport beeinträchtigt werden?**

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

- 7. Welche Hemmnisse gibt es bei der Wiederverwendung? Die Antwort kann sich z. B. auf politische Hemmnisse oder auf materialspezifische Herausforderungen beziehen.**

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

- 8. Wie viel % der entsorgten PV-Module in Deutschland sind Ihrer Meinung nach noch einsatzfähig?**

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

- 9. Gibt es Erkenntnisse zu Exportmengen von PV-Modulen ins Ausland?**

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

- 10. Wie könnten Ihrer Meinung nach illegale Exporte von PV-Modulen ins Ausland gestoppt werden und wie lässt sich diese Grauzone erklären?**

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Anhang

Beispiel

3. Wie verläuft die Überprüfung auf Wiederverwendung?

Bitte geben Sie die einzelnen Schritte und ggf. die Methoden an.

Was wird geprüft?	Welche Methode wird für den Schritt verwendet?	Welcher Soll-Zustand ist gewünscht?
<i>Untersuchung des Moduls auf grobe sichtbare Schäden</i>	<i>Sichtkontrolle erfolgt von einem Mitarbeiter</i>	<i>Keine Beschädigungen</i>
<i>Leistungsmessung</i>	<i>Name der Methode</i>	<i>XY Watt</i>
<i>Untersuchung auf nicht sichtbare Beschädigungen</i>	<i>Elektrolumineszenz</i>	<i>Keine Beschädigungen</i>
<i>(...)</i>	<i>(...)</i>	<i>(...)</i>

D Fragebogen zur Wiederverwendung und Aufbereitung von Photovoltaikanlagen

Kontaktdaten

Bitte füllen Sie für Rückfragen die untenstehende Tabelle aus.

Name des Betreibers	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Adresse der Anlage	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Bearbeiter/in	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Datum	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

1. Bereiten Sie PV-Module aus ganz Deutschland auf?

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

2. Welche Modultypen werden derzeit bei Ihnen aufbereitet (siliziumbasierte oder nicht-siliziumbasierte PV-Module; Dickschicht- oder Dünnschichtmodule)? Falls Sie siliziumbasierte und nicht-siliziumbasierte PV-Module annehmen, geben Sie bitte eine Schätzung der jeweils angelieferten Mengenanteile in % an.

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

3. Werden die verschiedenen PV-Module vor der Aufbereitung nach Modultyp (Dünnschicht- und Dickschichtmodule, Generationen etc.) getrennt?

Ja Nein

3.1 Gibt es Unterschiede bei den Modultypen in Bezug auf die Qualität der zurückgewonnenen Stoffe bei der Aufbereitung?

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

4. Welche Teile der PV-Module gehen in die Aufbereitung?

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

5. Werden die PV-Module auf Wiederverwendung überprüft?

Ja Nein

5.1. Wenn ja, erläutern Sie bitte die Schritte zur Überprüfung auf Wiederverwendung und erwähnen Sie ggf. die Richtlinien, die Sie berücksichtigen. Falls die Überprüfung von einem anderen Unternehmen durchgeführt wird, geben Sie bitte dessen Namen an.

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

5.2. Wenn nein, ist für die Zukunft eine Vorbereitung zur Wiederverwendung vor der Aufbereitung vorgesehen?

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

6. Bitte tragen Sie die einzelnen Aufbereitungsschritte in die Zeilen ein.

Tabelle 12: Aufbereitungsverfahren für PV-Module

Schritte	Funktion (z. B. Zerkleinerung von ...)	Verfahren (z. B. Hammermühle)
1.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
2.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
3.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
4.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
5.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
6.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
7.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
--	---	---

6.1. Wie groß ist der Input der aufbereiteten PV-Module [t/a] in den Jahren 2018 - 2021 gewesen?

Tabelle 13: Inputmengen

Jahre	Input
2018	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
2019	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
2020	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
2021	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

6.2. Bitte geben Sie die weiteren Verwertungswege/Industriezweige an. Bitte ergänzen Sie die Tabelle falls nötig. Falls einige Stoff in einer Mischfraktion gesammelt werden, geben Sie diese bitte bei „Anmerkungen“ z. B. mit „Mischfraktion 1“ an.

Tabelle 14: Zurückgewonnene Rohstoffe

Zurückgewonnenes Material	Verwendungsmöglichkeit (z. B. bei Polymeren Ersatzbrennstoff)	Anmerkungen
Glas	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Aluminium	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Polymere	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Silizium	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

Silber	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Kupfer	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Selen	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Blei	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Zink	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Indium	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Tellur	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Cadmium	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
(...)	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

6.3 Bitte geben Sie (wenn möglich) den Output aus den jeweiligen Jahren an.

Tabelle 15: Output

Zurückgewonnenes Material	2018	2019	2020	2021
Glas	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Aluminium	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Polymere	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Silizium	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Silber	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Kupfer	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Selen	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

Blei	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Zink	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Indium	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Tellur	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
Cadmium	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.
(...)	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.	Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

7. Wie hoch sind die Kosten für die Aufbereitung einer Tonne PV-Altmodule?

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

8. Wie viel % der aufbereiteten Module können insgesamt recycelt/stofflich verwertet werden? Was geschieht mit dem übrigen Anteil?

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

9. Ist für die Zukunft vorgesehen, die derzeitige Anlage so aufzurüsten, dass ein größerer Anteil der PV-Module recycelt/stofflich verwertet werden kann?

Ja Nein

9.1 Wenn nein, weshalb?

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

10. Welche Hemmnisse gibt es aktuell für die qualitativ hochwertige Rückgewinnung von Rohstoffen bei PV-Modulen bzw. inwiefern wird eine höherwertige Verwertung von zurückgewonnenen Stoffen verhindert? (Die Antwort kann sich z. B. auf material-spezifische/technische Herausforderungen oder auf rechtliche Regelungen beziehen.)

Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

Vielen Dank für Ihre Mithilfe!