

JPM Silicon GmbH
Wilhelmsgarten 3
38100 Braunschweig



Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Postfach 17 05
49007 Osnabrück

Abschlussbericht

**Rückgewinnung von Silber als Schlüssel für ein wirtschaftliches
Recycling von kristallinen Silizium-Solarmodulen
(Akronym: SilverKey)**

Projektlaufzeit: 22.08.2021 – 23.11.2022

Abschlussbericht in der Fassung vom 27.06.2023

Autoren:

Dr. Jan-Philipp Mai, Julian Pudack

JPM Silicon GmbH, j.mai@jpmsilicon.com

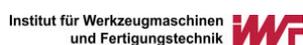
Robar Arafat

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), TU Braunschweig

Dr. Marcel Neubert

Rovak GmbH

Projektpartner:



Kurzfassung

Die Photovoltaik (PV) ist eine zentrale Säule des erneuerbaren Strom-Mix. Aktuell fallen in Deutschland ca. 7.855 Tonnen ausgediente Solarmodule an. Mit einer angenommenen Lebensdauer von 30 Jahren steigt die Zahl der zu recycelnden Solarmodule bis zum Jahr 2030 auf mehr als 1 Mio. Tonnen. Weltweit fallen bis zum Jahr 2050 zwischen 50-70 Mio. Tonnen Solarmodule für das Recycling an.

Bis heute ist das wirtschaftliche Recycling von Solarmodulen in Deutschland und Europa nur auf Basis einer durch die Hersteller und Importeure von Solarmodulen gezahlten Umlage möglich. Bisher wurden lediglich die gut erreichbaren Komponenten wie der Aluminiumrahmen, die Anschlussdose mit Kabeln und ein Teil des Deckglases recycelt. Ein Recycling ist nur aufgrund der von Herstellern gebildeten Rücklage möglich. Eine rein wirtschaftliche Lösung zum Recycling von Solarmodulen existiert bisher nicht. Insbesondere die energie- und ressourcenintensiv hergestellten Metalle der Solarzellen Silizium und Silber der Solarzellen werden nicht zurückgewonnen. Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung von Technologien zum werthaltigen und wirtschaftlichen Recycling von Solarmodulen. Der Schwerpunkt liegt auf einer möglichst sortenreinen Rückgewinnung aller Rohstoffe, sodass die Qualität der bisherigen Glasfraktion deutlich gesteigert werden kann und zudem das Silizium und Silber der Solarzellen zurückgewonnen wird.

Durch den Einsatz von IR-Strahlung konnten Solarmodule in diesem Vorhaben energieeffizient in ihre Komponenten zerlegt werden. Durch einen mechanischen Abtrag der Silberkontakte wird anschließend ein silberhaltiger Schleifstaub gewonnen. Die Solarzellen werden nachfolgend zerkleinert und zu Pellets verarbeitet. Diese können dann einem Umschmelzprozess zugeführt werden. Das recycelte, metallurgische Silizium wird u.a. als Rohstoff zur Herstellung von Aluminium und seinen Legierungen verwendet. Silber kann in Scheideanstalten weiter aufbereitet werden. Im Gegensatz zum Stand der Technik können dadurch alle Bestandteile des Solarmoduls wirtschaftlich verwertet werden.

Das Recycling der genannten Rohstoffe spart dabei ca. 80% der elektrischen Energie verglichen mit ihrer Primärproduktion. Dies ist je nach Produktionsstandort äquivalent zu den energiereicheren CO₂-Emissionen. Das beantragte Vorhaben kann dazu beitragen, den Rohstoffkreislauf in der Solarindustrie zu schließen und die Photovoltaik zu einer ganzheitlich nachhaltigen Energieform zu machen. Solarmodule werden zur Rohstoffquelle.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Zielsetzung des Vorhabens	1
1.1	Innovativer Lösungsansatz	1
1.2	Vorarbeiten der Projektpartner.....	4
2	Stand des Wissens und der Technik / Abgrenzung des Vorhabens	6
2.1	Stand des Wissens und der Technik	6
3	Projektpartner, Arbeits- und Zeitplan.....	7
4	Ergebnisse.....	8
4.1	Delamination.....	9
4.2	Abtrag der Silber-Leiterbahnen.....	11
4.3	Verwertung des Siliziums.....	18
4.4	Wirtschaftlichkeit	22
4.5	Umweltentlastung.....	23
5	Diskussion	24
5.1	Technische Machbarkeit	24
5.2	Wirtschaftlichkeit	25
5.3	Projekt-Review	26
6	Fazit, Fortführung und Perspektiven.....	26
	Literaturverzeichnis	27

1 Zielsetzung des Vorhabens

Mit einem Anteil von 8,9 % am deutschen Strom-Mix ist die Photovoltaik (PV) ein bedeutender Bestandteil der erneuerbaren Energieversorgung [1]. Durch die gezielte Förderung des PV-Ausbaus im Rahmen des Erneuerbaren Energie Gesetzes (EEG) seit dem Jahr 2000 liegt Deutschland nach den aktuellsten Zahlen aus dem Jahr 2019 mit einer installierten PV-Leistung von 49 GW weltweit auf dem vierten Platz [2]. Je nach Szenario und ausgehend von einer Lebensdauer von 30 Jahren steigt die kumulierte PV-Modul-Recyclingmenge in Deutschland bis ins Jahr 2030 auf 1 Mio. Tonnen an [3]. Dabei machen Solarmodule aus kristallinem Silizium mit einem Marktanteil von derzeit 95% den Großteil der zu recycelnden Solarmodule aus [4].

Bis heute existiert keine wirtschaftliche Lösung zum Recycling von Solarmodulen. Dennoch sind Hersteller und Importeure von Solarmodulen seit 2012 nach der WEEE-Richtlinie [5] zur Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall und auch zum Recycling ausgedienter Solarmodule verpflichtet. In Deutschland und in Teilen der EU übernimmt dies z.B. der Dachverband PV Cycle über ein umlagebasiertes Entsorgungssystem [6]. Bisher werden aus den dort gesammelten Solarmodulen das Glas, der Aluminiumrahmen und die Anschlussdose inklusive Kabel verwertet. Die energie- und ressourcenintensiv hergestellten Metalle Silizium und Silber der Solarzellen gehen dabei verloren.

Angesichts dieser Problematik beim Solarmodul-Recycling ist das Ziel dieses Vorhabens die Entwicklung von Technologien zum werthaltigen Recycling von Solarmodulen. Der Schwerpunkt liegt auf der Rückgewinnung der metallischen Rohstoffe Silber, Silizium, Aluminium und Kupfer.

1.1 Innovativer Lösungsansatz

Bisherige Recyclingverfahren konzentrierten sich vor allem auf die Rückgewinnung des Glases, das den größten Gewichtsanteil eines Solarmoduls ausmacht, oder auf Silizium als Funktionsmaterial des Solarmoduls. Mit den heute genutzten Verfahren, dem Zerkleinern und Sortieren der Solarmodule, können die Rohstoffe nicht in der gewünschten Qualität recycelt werden. Ein wirtschaftliches Recycling ist nur dann möglich, wenn möglichst Rohstoffe sortenrein und gleichzeitig ein signifikanter Anteil des Silbers zurückgewonnen werden können. Der innovative Lösungsansatz zielt daher nach Demontage von Rahmen und Anschlussdose auf eine energieeffiziente Trennung der Solarmodule in Glas und Laminat mit Solarzellen, so dass von der Oberfläche der Solarzellen anschließend das Silber zurückgewonnen werden kann. Abbildung 1 vergleicht die Zusammensetzung von Solarmodulen nach Gewichtsanteilen und Wert auf Basis der von den Projektpartnern angenommenen Rohstoffpreise in Abhängigkeit der erzielbaren Rohstoffqualität.

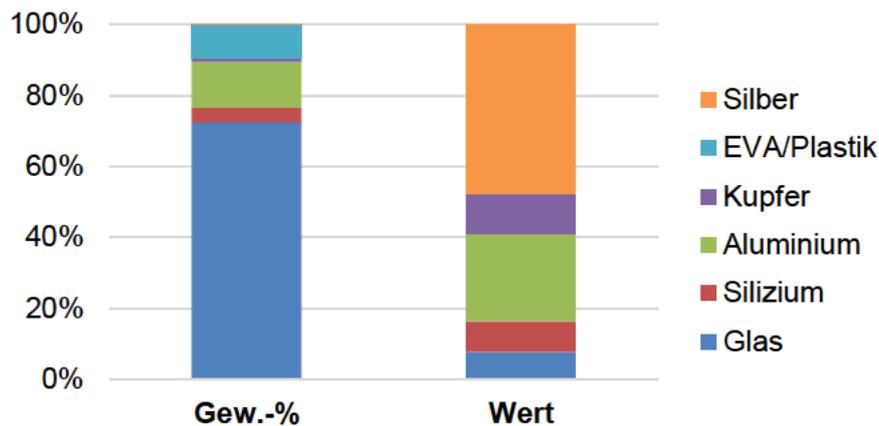


Abbildung 1: Zusammensetzung eines kristallinen Silizium-Solarmodules nach Gewicht (links) und Wert (rechts): Glas 0,06 €/kg [7], Aluminium 1,55 €/kg [8], Kupferkabel 5,7 €/kg [9], Silber 580 €/kg [10], Plastik (EVA und Rückseite) 0,01 €/kg [11], metallurgisches Silizium 1,5 €/kg [12].

Über die letzten Jahre hat der Silbergehalt in den gefertigten Solarmodulen von bis zu 521 mg/Zelle um die Jahrtausendwende auf derzeit 70-100 mg/Zelle abgenommen. Aufgrund physikalischer und fertigungstechnischer Randbedingungen ist davon auszugehen, dass sich der Silbergehalt langfristig bei ca. 80 mg/Zelle einpendelt [13]. In einer ersten Kostenschätzung gehen die Projektpartner davon aus, dass mit dem Verfahren bereits Module mit einem Silbergehalt von ca. 50 mg/Zelle wirtschaftlich recycelt werden können. Damit kann die Technologie auf alle bisher installierten Module, sowie absehbar auf die Modulgeneration der kommenden Dekade angewandt werden.

Damit das Vorhaben jedoch gelingt, ist der Zugang zu einer intakten Zelloberfläche nötig. Für das seit 2013 eingesetzten PERC-Zellendesign befinden sich ca. 68-80% des eingesetzten Silbers auf der Zelloberfläche [14]. Solarmodule bestehen aus den in Abbildung 2 gezeigten Komponenten. Die Schwierigkeit des sortenreinen Trennens ist hierbei auf den Aufbau der Solarmodule zurückzuführen. Zum Schutz vor der Umgebung werden die verbauten Solarzellen beidseitig durch Folien aus Ethylen-Vinyl-Acetat (EVA) mit dem Deckglas und der Rückseite verbunden. Um die Solarmodule wirtschaftlich zu recyceln, ist das Trennen der durch das EVA verbundenen Materialien daher von zentraler Bedeutung.

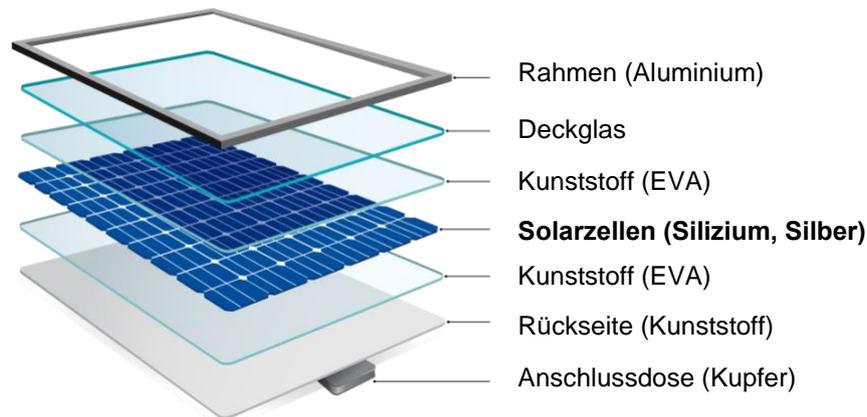


Abbildung 2: Komponenten eines kristallinen Silizium-Solarmoduls (Bildquelle: [15])

Die Pyrolyse ist als thermisches Verfahren dazu in der Lage, die EVA-Folie zu zerstören [16], [17]. Im Gegensatz zu den rein thermischen Verfahren, die zu einer Erwärmung des gesamten Moduls führen, setzen die Projektpartner auf eine Kombination aus effizienteren Erwärmungsarten und einem hochenergetischen UV-Lichtblitz zur gezielten Schädigung der EVA-Folie. Dadurch können zwei Verfahrensvorteile kombiniert werden: Neben der thermischen Vorschädigung des Laminats bspw. durch Infrarot- oder Induktionsheizung führt die gleichzeitige photochemische Schädigung durch UV-Strahlung zum endgültigen Brechen der Bindung. Durch mehrfache UV-Lichtblitze mit je ca. 5-15 ms Belichtungsdauer, wird das Glas schließlich vollständig gelöst.

Der innovative Lösungsansatz besteht damit aus den folgenden Teilaspekten:

1. Die Delamination der Modulvorderseite durch thermische Vorbehandlung und anschließenden UV-Blitzen für den Zugang zu einer möglichst intakten Zelloberfläche
2. Der mechanische Abtrag der auf die Zelloberfläche gedruckten Silberkontakte zur Rückgewinnung eines silberhaltigen Schleifstaubs
3. Die anschließende mechanische Aufbereitung des verbleibenden Laminats aus Zellen, EVA-Folie und Rückseite des Moduls durch Zerkleinern und Sortieren zum Erhalt eines metallurgischen Siliziumpulvers und die Aufbereitung zu Silizium-Pellets

In Abbildung 3 ist die geplante Prozesskette skizziert.

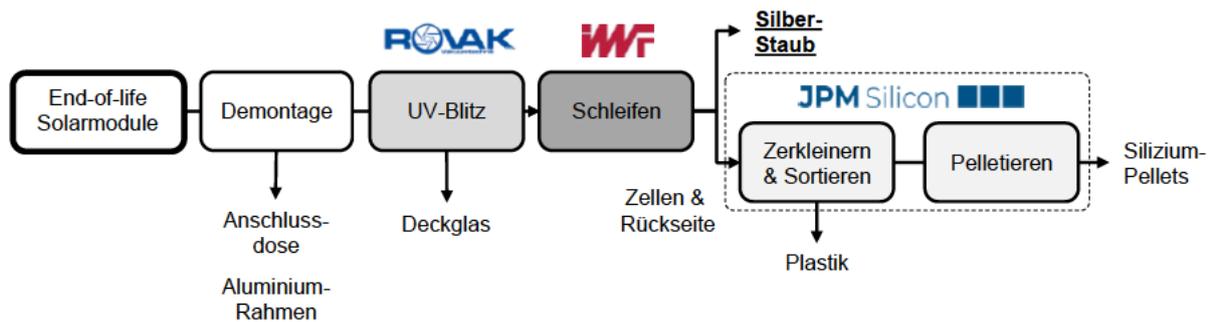


Abbildung 3: Geplante Prozesskette zum Recycling kristalliner Silizium-Solarmodule

Durch die geplante Verwertung steigen die Erlöse auf Basis der aktuellen Preise für Recyclingrohstoffe [7–12] von derzeit ca. 111 €/t Modulschrott bei den klassischen Recyclingverfahren auf ca. 408-641 €/t. Gegenstand des Projekts ist die Erweiterung und Validierung des Kostenmodells für das Recycling, sodass fundierte Aussagen zur Wirtschaftlichkeit getroffen werden können.

1.2 Vorarbeiten der Projektpartner

Solarmodulfragmente von den Recyclingunternehmen Veolia (Frankreich), Reiling (Deutschland) und dem Solarmodulhersteller SoliTek (Litauen) wurden in einer Laboranlage durch die **Rovak GmbH** mit UV-Blitzen beaufschlagt. Im Anschluss wurde das Deckglas entfernt, so dass die Silizium-Zelle freigelegt werden konnte. Abbildung 4 zeigt die freigelegte Zelloberfläche.



Abbildung 4: Laboranlage der Rovak GmbH zur Behandlung der Solarmodul-Fragmente (links) und freigelegte Zelloberfläche (rechts).

Sowohl die Alterung der EVA-Folie durch UV-Licht als auch die Erwärmung können zu deren Zersetzung beitragen. Durch schlagartige UV-Behandlung (ca. 5-15 ms pro Blitz) kommt es jedoch zu einer explosionsartigen, teilweisen Zersetzung bzw. Verdampfung der Folie. Die Folie bleibt dabei zum größten Teil als gelöster, fester Rückstand zwischen Deckglas und

Solarzellen erhalten. Die Klebewirkung ist jedoch zerstört. Das Deckglas kann damit von den Solarzellen separiert und durch einfache Trennverfahren, z.B. über einen Keil oder auch Vakuumsauger, abgehoben werden. Der Mechanismus ist u.a. Gegenstand der in dem Vorhaben beschriebenen Untersuchungen.

Auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche konnten weder vergleichbare Technologien noch relevante Prozessparameter für das Abschleifen der Oberflächenkontakte ermittelt werden. Das **IWF** hat in ersten Untersuchungen festgestellt, dass das Abschleifen der Leiterbahnen nur durch eine geeignete Einspannvorrichtung der Solarzelle möglich ist. Hier wurde ermittelt, dass eine einfache mechanische Einspannung aufgrund der leichten Zerbrechlichkeit der Solarzellen nicht zielführend ist. Das unsaubere Verkleben der Solarzellen auf eine Oberfläche führte zu einer unebenen Einspannung, was die Qualität des Schleifprozesses erheblich beeinflusst. Als geeignet stellte sich dagegen die Einspannung durch [REDACTED] heraus, welche geometrisch jedoch nicht an die Solarzellen angepasst ist. Im Projekt soll eine Vakuumspannplatte für die Einspannung der Solarzellen beschafft und angepasst werden. In den bisherigen Vorversuchen konnte die Oberfläche von Solarzellen durch verschiedene Methoden teilweise sowie vollständig abgetragen werden (siehe Abbildung 5). Damit ist davon auszugehen, dass sich der gesamte Silberanteil der Fronkontakte bei einem optimierten Abtragprozess im Schleifstaub sammeln und damit zurückgewonnen werden könnte.

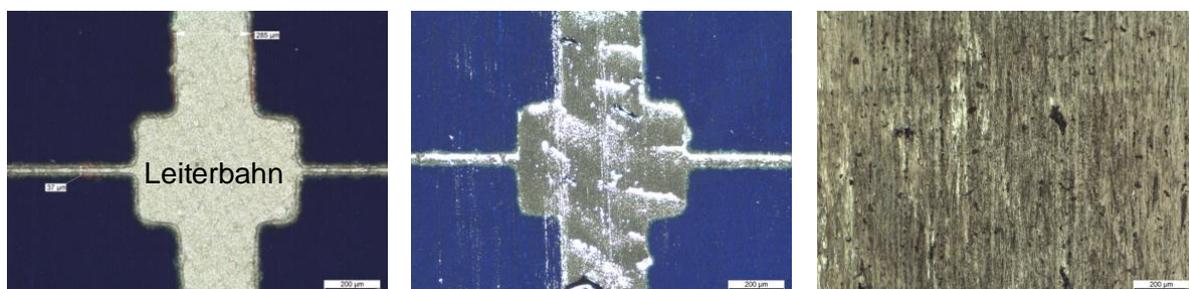


Abbildung 5: Unbehandelte Leiterbahn einer Solarzelle (links), durch Abtrag der Leiterbahn behandelte Zelle (Mitte) und vollständig abgeschliffene Zelloberfläche (rechts).

In Vorarbeiten hat die **JPM Silicon GmbH** gemeinsam mit Industriepartnern Konzepte zur Aufbereitung von Modulresten zu Silizium-Pulvern betrachtet und bewertet. In dem Projekt sollen die verbleibenden Lamine zerkleinert und sortiert werden. Hierfür steht eine Auswahl geeigneter Versuchsanlagen zur Trennung, [REDACTED], zur Verfügung, die sich im Vorfeld als aussichtsreich erwiesen haben. Das Silizium-Pulver soll anschließend zu hochfesten Pellets weiterverarbeitet werden, um einen späteren Einsatz in metallurgischen Anwendungen zu ermöglichen. Im Projekt sollen daher aus den Modulresten mehrere Kilogramm Pellets gefertigt werden, um so den späteren

Einsatz des Produkts zu bewerten. Das Verfahren setzt dabei auf den bisherigen Erfahrungen des Unternehmens beim Recycling von Silizium-Kerf, einem Rückstand beim Sägen der Siliziumwafer, auf.

2 Stand des Wissens und der Technik / Abgrenzung des Vorhabens

Stand der Technik ist, dass beispielsweise Organisationen wie PV Cycle die Entsorgung für Hersteller und Importeure organisieren. Die Entsorgung für private PV-Anwender ist hierbei kostenlos, während Kommunen und Gewerbe Solarmodule kostenpflichtig entsorgen müssen. PV Cycle übernimmt als Organisation im Namen der Hersteller und Importeure die fachgerechte Entsorgung oder das Recycling der Solarmodule. Den Projektpartnern ist zum jetzigen Zeitpunkt kein wirtschaftliches Verfahren zum Recycling von Solarmodule bekannt.

2.1 Stand des Wissens und der Technik

Im vergangenen Jahr sind erneute zahlreiche Reviews zum Stand der Technik erschienen [18–21]. Wiederholt verweisen die Projektpartner darauf, dass bis heute lediglich durch konventionelle Recyclingprozesse, d.h. Schreddern und Sortieren vor allem Glas recycelt wird. Keine der bisher in Forschungsprojekten untersuchten Methoden erweist sich jedoch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten als erfolgsversprechend [18].

Recycling-Verfahren beruhen im Allgemeinen auf einer Fraktionierung der zu recycelnden Materialien. Dafür werden Reststoffe zerkleinert und sortiert. Die dabei erhaltenen, möglichst sortenreinen Fraktionen können dann verwertet werden. Die beiden einzigen heute am Markt agierenden Unternehmen im Bereich des Recyclings von Solarmodulen sind Reiling (Deutschland) und Veolia (Frankreich). Zur Weiterentwicklung der klassischen Aufbereitung aus Zerkleinern und Sortieren setzen die Unternehmen auf verschiedene Ansätze und haben sich daher an unterschiedlichen Forschungsvorhaben beteiligt. Das französische Unternehmen Veolia setzt in einer Forschungskooperation mit der Firma Flaxres auf den Einsatz von Lichtblitzen zur Delamination der Solarmodule [22]. Durch hochenergetisches Licht werden die Silizium-Wafer in den Modulen erwärmt und die EVA-Folie zersetzt. Das verbleibende Laminat aus Rückseite, EVA-Folie und Solarzellen wird nachfolgend weiter zerkleinert und sortiert. Durch die Technologie soll Glas sortenrein entfernt und damit der mechanische Aufwand beim Zerkleinern der Module reduziert werden. Aktuell soll die Technologie bis 2025 einsatzbereit sein [23]. Reiling verfolgt dabei gemeinsam mit dem Fraunhofer CSP eine verbesserte mechanische Aufbereitung der Reststoffe [24]. Ähnliche Ansätze sind auch aus weiteren Projekten bekannt [25], [26]. Aus Rentabilitätsgründen ist bisher noch keine Umsetzung erfolgt. Der französische Konzern Suez hat hiervon abweichend

gemeinsam mit der Geltz Umwelttechnik auf eine Pyrolyse der EVA-Folie gesetzt [27]. Mangels Wirtschaftlichkeit steht die Anlage des Projekts heute zum Verkauf. Weitere Ansätze z.B. über die Nasschemie [28–30], wurden bisher ebenfalls aus Kostengründen nicht umgesetzt. Ergänzende Projekte zielen dabei auf ein recyclinggerechtes Design [31], [32], Second-Life Anwendungen [33] von Solarmodulen und effiziente Sammelsysteme [34].

Trotz der Vielzahl an nationalen und europäischen Forschungsvorhaben findet sich heute kein Verfahren in einer breiten industriellen Anwendung. Die heute am Markt im Pilotmaßstab zu findenden Verfahren beruhen daher auf einer Recycling-Umlage, welche durch die Hersteller und Importeure von Solarmodulen zu entrichten ist. Jedoch ist selbst unter diesen Voraussetzungen aus Sicht der Entsorger kein wirtschaftliches Recycling der Solarmodule möglich. Auch in der aktuellen Datenlage zur Photovoltaik in Deutschland führt das Fraunhofer ISE im Dezember 2020 an, dass bisher noch keine vom Stand der Technik abweichenden Technologien verfügbar sind [35].

3 Projektpartner, Arbeits- und Zeitplan

Das Projekt steht unter der Leitung der JPM Silicon GmbH (KMU) und wird gemeinsam mit dem langjährigen Partnerunternehmen, der Rovak GmbH (KMU), und dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU Braunschweig durchgeführt. Begleitet werden die Projektpartner von den Recyclingunternehmen Reiling (Deutschland) und Veolia (Frankreich). Beide Unternehmen stellen u.a. die zu recycelnden Solarmodule kostenlos zur Verfügung und ermöglicht fachliche Einblicke in die Abläufe und Regularien des Solarmodulrecyclings sowie der Verwertung der anfallenden Sekundärrohstoffe.

Der Arbeitsplan des Projektes sieht fünf Arbeitspakete vor. Die Verknüpfung der Arbeitspakete inklusive der Teilarbeitspakete ist **Error! Reference source not found.** zu entnehmen.

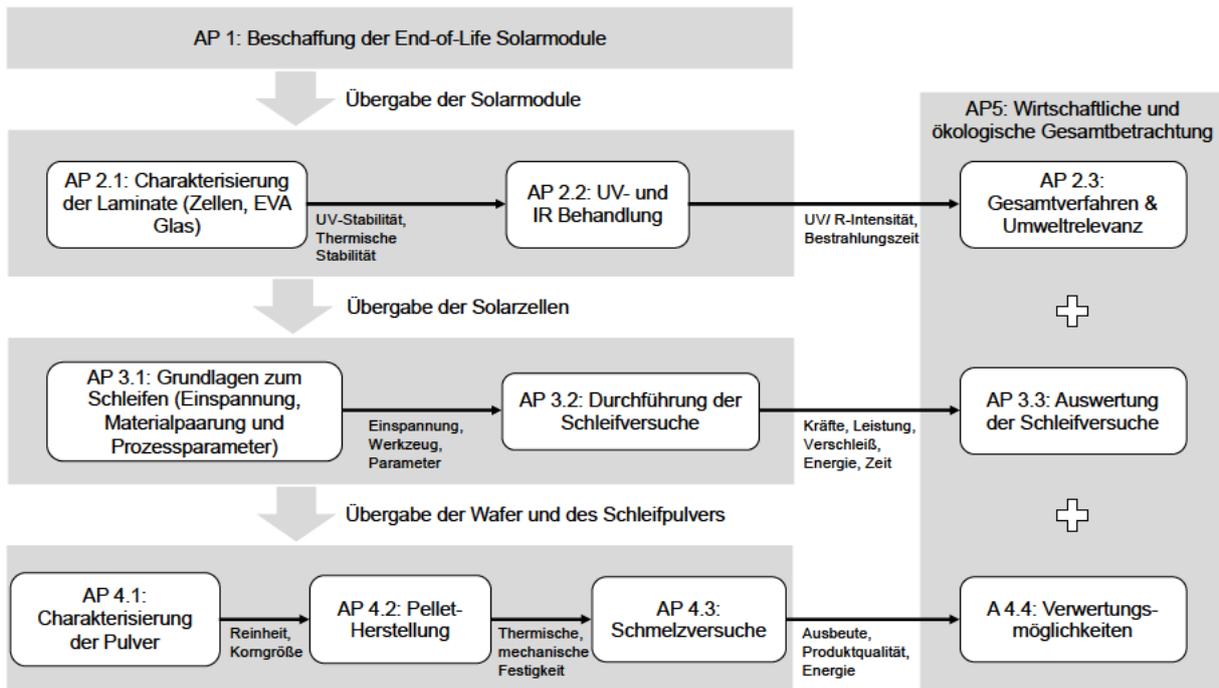


Abbildung 6: Verknüpfung der Arbeitspakete entlang der Verfahrenskette

Für die Machbarkeitsbeurteilung, die in diesem Projekt im Fokus steht, werden 12 Monate Projektlaufzeit als realistisch eingestuft. **Error! Reference source not found.** zeigt den zeitlichen Ablauf der Arbeitspakete.

		Monat											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AP 0: Projektauf sicht und Koordination	<i>JPM</i>	[Active]											
AP 1: Beschaffung der Solarmodule	<i>JPM</i>	[Active]											
AP 2: UV-Behandlung der Solarmodule	<i>Rovak</i>	[Active]											
2.1 Charakterisierung EVA		[Active]											
2.2 UV/IR-Behandlung		[Active]											
2.3 Gesamtverfahren und Umweltrelevanz		[Active]											
AP 3: Schleifbearbeitung der Solarzellen	<i>IWF</i>	[Active]											
3.1 Grundlagen zum Schleifen		[Active]											
3.2 Durchführung der Schleifversuche		[Active]											
3.3 Auswertung der Schleifversuche		[Active]											
AP 4: Metallurgische Verwertung	<i>JPM</i>	[Active]											
4.1 Charakterisierung der Pulver		[Active]											
4.2 Pellet-Herstellung und Charakterisierung		[Active]											
4.3 Schmelzversuche		[Active]											
4.4 Verwertungsmöglichkeiten		[Active]											
AP 5: Gesamtbetrachtung	<i>Alle Projektpartner</i>	[Active]											

Abbildung 7: Zeitlicher Ablauf des Arbeitsplans über die Projektlaufzeit von 12 Monaten

4 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse folgt dem Prozessfluss in Abbildung 3 und gliedert sich daher in die Delamination, den Abtrag des Silbers und die Aufbereitung des Siliziums. Abschließend werden die Umweltentlastung und Wirtschaftlichkeit betrachtet.

4.1 Delamination

Durch die Delaminierung des Solarglases und der EVA-Folie soll die Zelloberfläche freigelegt werden, um von dieser anschließend mechanisch die Silberleiterbahnen abzutragen und das Silber zurückzugewinnen.

Für die folgenden Versuchsreihen wurden Proben aus fünf unterschiedlichen Solarmodulen mit einer Größe von 156 mm x 156 mm durch Wasserstrahlschneiden aus den Solarmodulen herausgetrennt. Wie auch konventionelle UV-Strahlung führt auch ein UV-Blitz zur Schädigung der Kunststoffolie bzw. Kunststoffen im Allgemeinen. Bei den Versuchen wurde die Pulslänge und -intensität des UV-Blitzes sowie die Vorwärmtemperatur variiert. Es wurden Pulslänge von 0,2 bis 20 ms im Bereich von 350 - 400 nm und einer Energie von bis zu 2 kJ untersucht. Nur in Einzelfällen konnte eine Schwächung der Haftwirkung erzielt werden. Vielmehr führt wiederholtes Blitzen zu einer deutlichen Temperaturerhöhung, so dass die Wirkweise nicht in einem Brechen der chemischen Bindungen durch UV-Strahlung, sondern in Folge von Wärme zu vermuten ist. Es wird vermutet, dass dies mit der absorbierenden Eigenschaft des Solarglases im UV-Bereich und den in der EVA-Folie zugesetzten UV-Blockern zusammenhängt. Im Folgenden wurden daher Versuche mit Mikrowellen- sowie Infrarotstrahlung durchgeführt.

Mikrowellenversuche führen weder zu einer gleichmäßigen Erwärmung der Zelle, noch kann eine deutliche Schwächung der Haftwirkung erzielt werden. Erst ein Überhitzen der Zelle, d.h. Verbrennen der Kunststoffolie führt zu einem Aufbrechen des Schichtverbunds. Damit ist das Verfahren allerdings wieder im Bereich der Pyrolyse anzusiedeln, was im Rahmen eines einfachen, kostengünstigen und nachhaltigen Recyclingverfahrens nicht zielführend ist.

Um Wärme gezielt in die verbindende Kunststoffschicht zu bringen, wird daher auch ein Ansatz mittels IR-Strahlung untersucht. Ziel ist dabei die Transparenz des Solarglases einerseits und die Absorption der EVA-Folie andererseits wie in Abbildung 8 gezeigt.

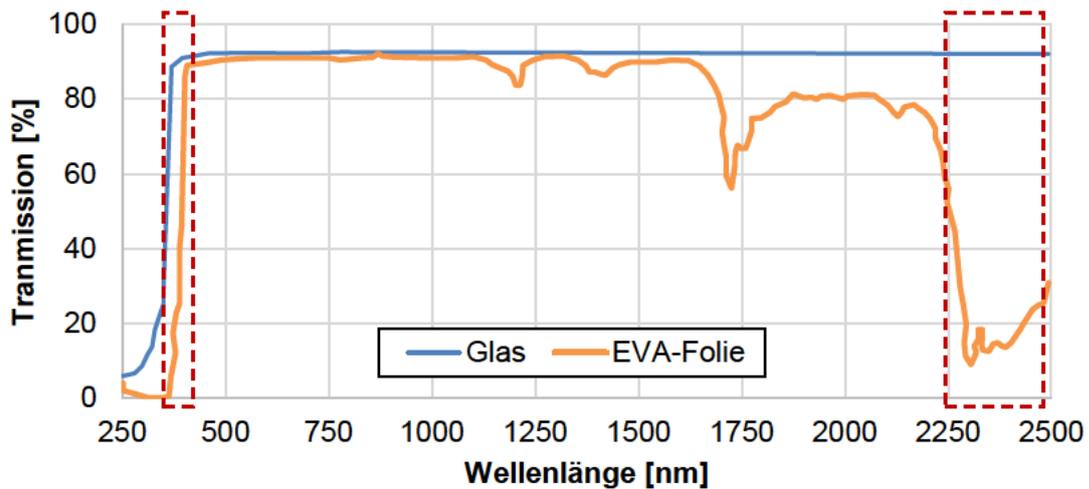


Abbildung 8: Transmissionskurven für Deckglas [36] und EVA-Folie [37]. Hervorgehoben sind die möglichen Arbeitsbereiche für eine Behandlung mit UV- und IR-Strahlung.

Zunächst wurden unterschiedliche Wellenlängenbereiche bei der IR-Strahlung untersucht. Solarglas ist aber ca. 500 nm nahezu vollständig transparent ist, so dass kurz- und langwellige IR-Strahler eingesetzt werden können. Die Haftwirkung der EVA-Folie kann dann nachfolgend ab einer Temperatur ██████████ nachhaltig geschädigt werden, wodurch die Haftwirkung an den Grenzflächen nachlässt und sich der Schichtverbund durch eine zusätzliche mechanische Kraft trennen lässt. Abbildung 9 zeigt den Versuchsaufbau zur Erprobung der IR-Strahlung, das delaminiertes Solarglas und einen Ausschnitt aus dem verbleibenden Laminat.



Abbildung 9: Versuchsaufbau zur Erprobung der Delamination mittels IR-Strahlung (links), delaminiertes Solarmodul und das verbleibende Solarglas (mittig) und das abgelöste Laminat bestehend aus Rückseite, Zellen und EVA-Folie (rechts).

Zur Untersuchung des grundlegenden Effekts zur Wirkung auf die Trennung der verbundenen Modulkomponenten werden verschiedene Materialkombinationen mit IR-Strahlung beaufschlagt. Hierzu gehören die einzelnen Komponenten Deckglas, EVA-Folie und SilverKey - Abschlussbericht

Solarzellen, aber auch die Kombination der einzelnen Komponenten. Ziel ist die Überprüfung der Hypothese, dass neben der primären Erwärmung der IR-Strahlung durch die IR-Strahlung auch eine Alterung durch den hochenergetischen UV-Blitz hervorgerufen wird. In keinem der Versuche konnte eine signifikante Verminderung der Haftwirkung beobachtet werden.

Für die Versuche Vorhaben verfügt die Rovak GmbH über ein Technikum mit diversen Versuchsanlagen, welche dem entsprechenden Leistungsbereich bzw. der bevorzugten Substratgröße angepasst wurden.

Tabelle 1: Größen der UV-Blitz-Behandlung

Maschinen und Anlagen	
Labor-UV-Blitzanlage	Basic Line 3.0
Veränderliche Größen	
Pulsanzahl:	Pro Minute bzw. Modul-Fläche in m ³
Pulszeit:	0,2-25 ms, ggf. bedarfsgerechte Anpassung
Ergebnisgrößen	
Energieverbrauch	kW/m ³
Material	Deckglas, Solarzellen, Rückseite

4.2 Abtrag der Silber-Leiterbahnen

Im Fokus der Untersuchungen am IWF stehen praktische Untersuchungen zum mechanischen Abtrag der Silberleiterbahnen handelsüblicher Solarzellen, welche von Projektpartnern zur Verfügung gestellt werden. Das Ziel der Untersuchungen sind generelle Aussagen zur Qualität des mechanischen Abtragens.

Die experimentellen Untersuchungen erfolgten gemäß Antrag nach dem Pendelflachsleifverfahren an einer Blohm Profimat 307 Maschine (Tabelle 2).

Tabelle 2: Maschinendaten und mögliche Versuchsparameter

Maschine und Verfahren	Blohm Profimat 307, Flachsleifen
Nennleistung Schleifmotor	19 kW
Max. Vorschubgeschwindigkeit	60.000 mm/min
Max. Schleifscheibendurchmesser	400 mm
Max. Schleifscheibenbreite	80 mm
Konstante Größen	
Maschine	Blohm Profimat 307
Verfahren	(Pendel-) Flachsleifen
Werkstückmaterial	Silber

Schleifscheibe	Diamant / CBN
Abrichtwerkzeug	Siliziumkarbid
Abrichtparameter	abhängig vom Verschleiß der Schleifscheibe
Veränderliche Größen	
Zustellung a_e	1 μm – 8 μm
Werkstückgeschwindigkeit v_w	6 m/min – 40 m/min
Schnittgeschwindigkeit v_c	abhängig von Schleifscheibenspezifikation
Ergebnisgrößen	
Prozessgrößen	Normalkraft F_n , Tangentialkraft F_t , Schleifleistung P_c
Werkzeug-Radialverschleiß	Δr_s
Material	Silber-Staub, Silizium-Wafer

Erste Untersuchungen dienen der Einspannung der Zellen im Maschineninnenraum. Einerseits besteht hierbei die Herausforderung, die Solarzellen möglichst spannungsfrei einzuspannen, sodass die Zellen trotz der leichten Zerbrechlichkeit intakt bleiben. Andererseits müssen die Solarzellen möglichst parallel zum Maschinentisch eingespannt werden, um ein ebenes Abtragen der Leiterbahnen zu garantieren, ohne den Wafer zu beschädigen.

Als Lösung hierfür bietet sich die Einspannung mittels [REDACTED] an. Diese garantieren eine ebene und einachsige Spannsituation in Tischrichtung. Die verwendete [REDACTED] (Abbildung 10a) wurde mithilfe einer Präzisionsmessuhr (Abbildung 10b) geradlinig ausgerichtet.

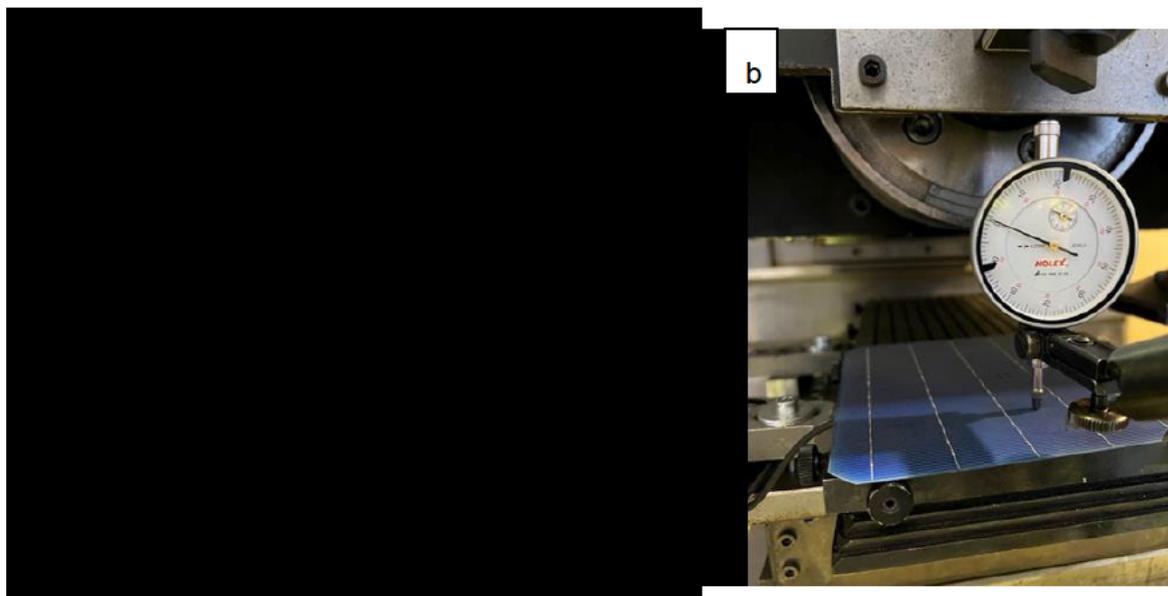


Abbildung 10: Versuchsaufbau zur Einspannung der Solarzellen über eine [REDACTED] (a) und anschließende Geradlaufprüfung (b).

Bei der Parameterstudie wird die Vorschubgeschwindigkeit v_w als produktionsbestimmender Parameter variiert, mit der die Gesamtzustellung von 10 bis 13 μm (entspricht in etwa Leiterbahnhöhe) in 1 μm -Schritten abgeschliffen wird. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Parameter für Versuche für zwei verschiedene Solarzellenvarianten A und B. Im Folgenden werden nur ausgewählte Ergebnisse gezeigt.

Tabelle 3: Parameter für Flachsleifuntersuchungen

Solarzelle	Versuch	v_w [mm/min]	v_c [m/s]	$a_{e, ges}$ [mm]	a_e [mm]
Variante A	1	3.000	40	0,011	0,001
	2	3.000	40	0,012	0,001
	3	3.000	40	0,012	0,001
	4	3.000	40	0,011	0,001
Variante B	1	3.000	40	0,012	0,001
	2	12.000	40	0,013	0,001
	3	12.000	40	0,013	0,001

Abbildung 11 zeigt beispielhaft das Schliffbild einer Solarzelle der Variante A. Die Voruntersuchungen zeigen, dass ein Abschleifen der Leiterbahnen prinzipiell möglich ist, jedoch eine hohe Zellbruchgefahr besteht. Schwierig erweist sich eine Gesamtzustellung, die exakt der Leiterbahnhöhe entsprechen müsste. Bereits bei geringen Differenzen in der Zustellung (Versuch 3) wird der Wafer angeschliffen, sodass die Intakthaltung der Zelle nicht gewährleistet ist.

Die generelle Aussage der Untersuchungen ist, dass Schleifen zwar möglich, aber für den Anwendungsfall eines genauen Leiterbahnabtrages schwierig umzusetzen ist. Zudem wurde anhand der unterschiedlichen Schliffbilder der Versuche bzw. der Solarzellvarianten festgestellt, dass ein einheitlicher Prozess aufgrund der unterschiedlichen Beschaffenheit der Zellen schwierig ist.

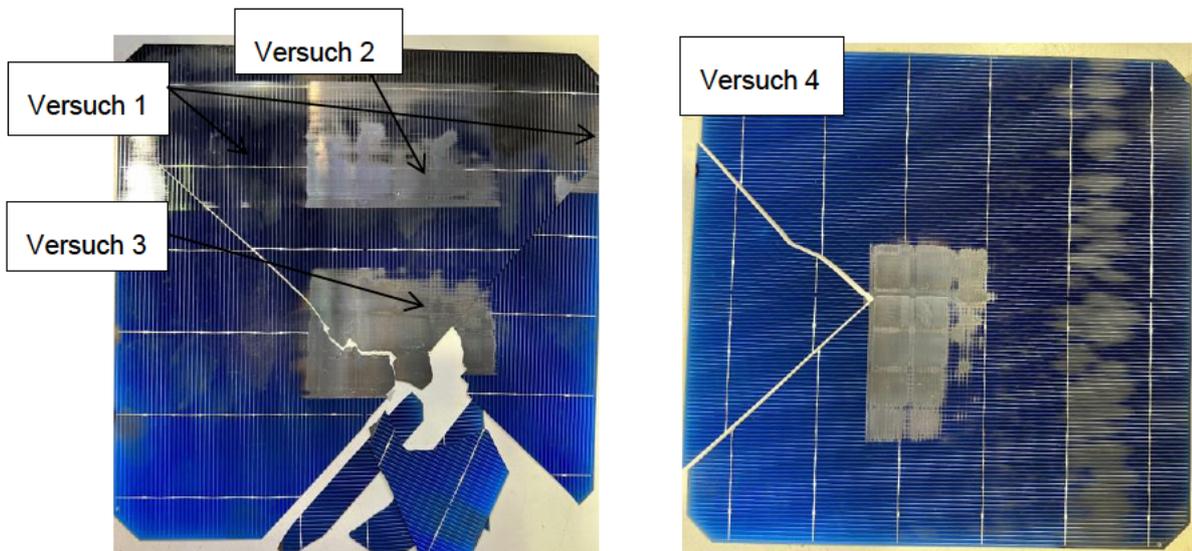


Abbildung 11: Solarzelle der Variante A nach vier Schleifuntersuchungen.

Tabelle 4 zeigt die Parameter für die Hauptversuche. An dieser Stelle wird auf eine tiefgehende Erklärung verzichtet und nur relevante Ergebnisse werden gezeigt.

Tabelle 4: Parameterstudie der Hauptversuche

Solarzelle	Reihe	v_w [mm/min]	v_c [m/s]	$a_{e, ges}$ [mm]	a_e [mm]
Variante B	1	3.000	40	0,010 - 0,014	0,001
	2	9.000	40	0,010 - 0,013	0,001
	3	15.000	40	0,010 - 0,015	0,001

Aus den Hauptversuchen können zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Rückgewinnung von Silber ist nur in kleinen Mengen möglich. Da das schnelle Abtragen des Silbers mit hohen Zell-Durchsatzraten nicht möglich ist, können beim Schleifen keine großen Mengen an Silber generiert werden. Als zu untersuchender Silberstaub werden die zerspannten Partikel der Solarzellen in der Schleifscheibe mithilfe eines Klebebands abgenommen.
- Erneut wurde festgestellt, dass verschiedene Zellen trotz gleicher Versuchsparameter unterschiedliche Ergebnisse liefern. Dieses kann einerseits auf der Beschaffenheit der Zelle, aber andererseits auch auf nicht kalkulierbaren Fliehkraft- sowie thermischen Ausdehnungseffekten beruhen. Dennoch wurden keine thermischen Schäden auf den Zelloberflächen beobachtet.
- Niedrige Vorschubgeschwindigkeiten wirken sich (auf Kosten der Produktivität) positiv auf den Leiterbahnabtrag aus. Hohe Vorschubgeschwindigkeiten bedeuten größere Kräfte sowohl in tangentialer als auch normaler Richtung, was bei zu hohen Geschwindigkeiten in Zellbruch resultieren kann.

- Aufgrund des geringen Erfolgspotentials von Schleifprozessen ist eine Abarbeitung des gesamten möglichen Versuchsspektrums nicht zielführend.

Die generelle Machbarkeit des Abtrags durch Schleifen wurde gezeigt. Eine hohe Menge an Silberstaub konnte entgegen ursprünglichen Annahmen jedoch nicht erzeugt werden. Weil das Abschleifen der Leiterbahnen im Hinblick eines serientauglichen Leiterbahnabtrages daher nicht zielführend erscheint, werden weitere Prozesse außerhalb des Schleifens erprobt.

Besondere Herausforderung bei Schleifprozessen ist die Steifigkeit der Schleifscheibe, welche bei ungenauer Einstellung der Tiefenzustellung zu Zellbruch. Zur Reduzierung der werkzeugseitigen Steifigkeit wird in weiteren Untersuchungen das [REDACTED]

[REDACTED]

Abbildung 12 zeigt REM-Aufnahmen der [REDACTED]

[REDACTED]

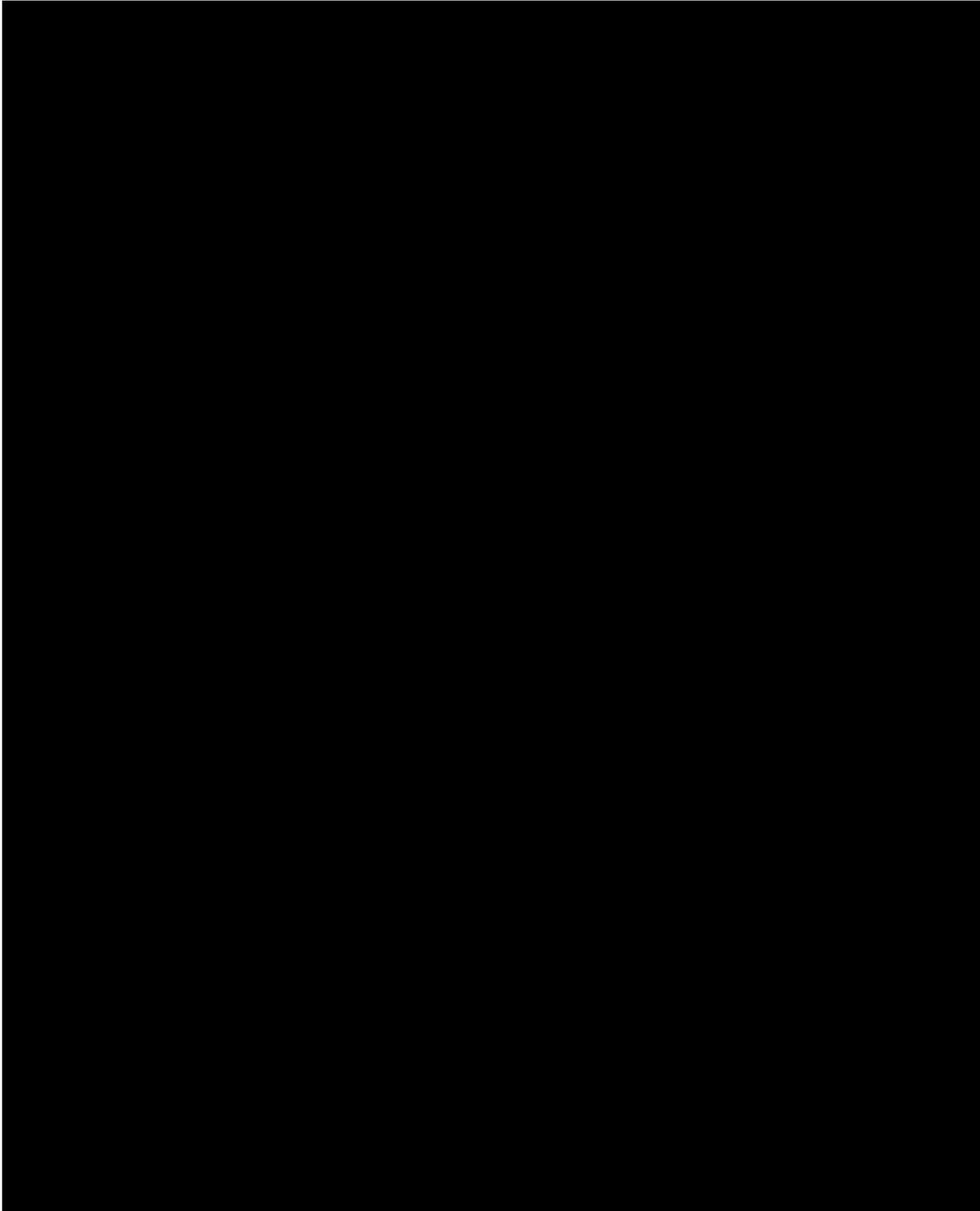


Abbildung 12: REM-Aufnahmen nach [REDACTED] der Solarzellen.

Im weiteren Verlauf werden [REDACTED] als automatisierte Lösung mit den zur Verfügung stehenden Mitteln im Projektzeitraum nicht ausreichend realisierbar ist.

Für die [REDACTED] wurde ein Demonstrator auf Zellgröße entwickelt, der mit einem Elektromotor ausgestattet und in x-y-Richtung verfahrbar ist. Mit dem Demonstrator sind

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED], was eine große Auswahl an Werkzeugen zulässt. Der Elektromotor hat eine

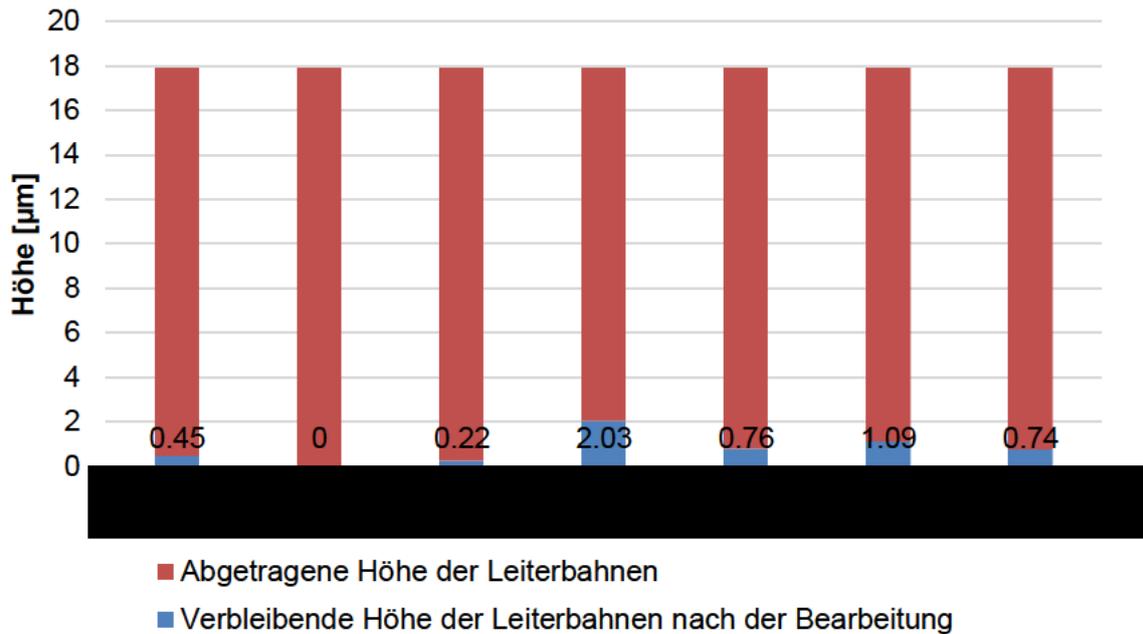


Abbildung 14: Abgetragene Höhen der Silberleiterbahnen mit verschiedenen Werkzeugen.

Mittels dieser Versuche konnte nachgewiesen werden, dass eine Rückgewinnung des Silbers aus Solarmodulen durch mechanisches Abtragen möglich ist. [REDACTED]

Für die weitere Aufbereitung des Silbers ist der verbleibende Kunststoff entscheidend. Je höher Silbergehalt im Abtrag, desto geringer die nachfolgenden Scheidekosten. [REDACTED]

4.3 Verwertung des Siliziums

Silizium-Reststofffraktionen werden über [REDACTED] getrennt und das abgetrennte Silizium soll anschließend zu Pellets weiterverarbeitet werden, um einen späteren Einsatz in metallurgischen Anwendungen zu ermöglichen. Abbildung 15 zeigt die im Projekt aufbereiteten und hergestellten Proben von zerkleinerten Modulresten, einem aufbereiteten Silizium-Pulver und Silizium-Pellets.



Abbildung 15: Abbildung 6: Zerkleinerte Solarmodule (links) mit einem Siliziumanteil von ca. 10%, aufbereitetes Silizium-Pulver mit mehr als 98% Silizium (Mitte) und gepresste Silizium-Pellets (rechts).

Die zurückgewonnen Siliziumbestandteile wurden mittels GDMS-Analyse auf ihre elementaren Bestandteile untersucht. Das Ergebnis ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Beispielhaftes Analyseergebnis des sortierten Zellrests.

Element	Massenprozent
Si	93,5 %
Al	5,75 %
Fe	0,02 %
Ca	0,021 %
Cu	0,53 %
Ag	0,5 %
Na	0,35 %
Mg	0,135 %
Sn	0,112 %
Ni	0,0093 %
Bi	0,009 %
Pb	0,07 %
P	0,002 %

Die Analyse zeigt eine hohe Verunreinigung des Siliziums mit Aluminium. Diese ist auf die Rückseitenbeschichtung der Solarzelle zurückzuführen. Hier wird im Produktionsprozess eine dünne Schicht aus Aluminium auf die Zelle aufgetragen. Aufgrund der dünne dieser Schicht ist eine Abtrennung des Aluminiums mit mechanischen Verfahren zunächst nicht möglich. Somit ist eine Rückführung des Siliziums in die Solarindustrie zunächst nicht sinnvoll.

Um auch die weiteren Verunreinigungen zu identifizieren, wurde das separierte Silizium im Mikroskop betrachtet (siehe Abbildung 16). Deutlich zu erkennen sind z.B. dünne Drähte (Bus Bars), welche wiederum eine Quelle für Kupfer-Verunreinigungen darstellen.

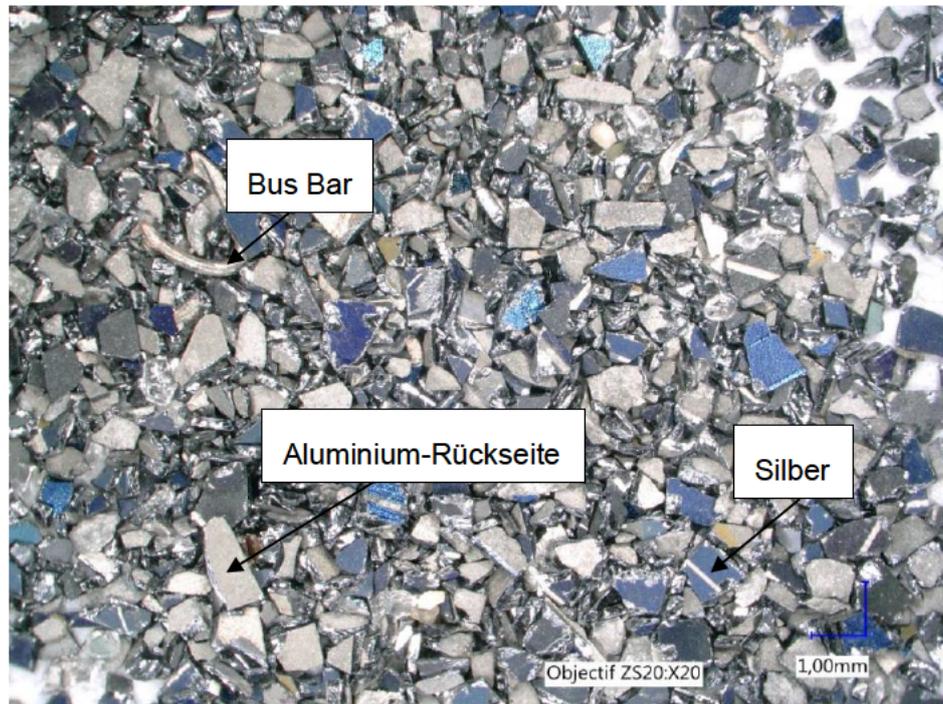


Abbildung 16: Mikroskopische Ansicht des analysierten Silizium-Zellrests und Verunreinigungen wie bspw. Bus Bars oder Silberleiter.

Die Verunreinigung des recycelten Siliziums mit Aluminium ist in der Aluminiumindustrie kein Qualitätsverlust. Das Silizium wird in der Schmelze nachfolgend mit Aluminium legiert. Eine Verbindung von Silizium und Aluminium ist daher erwünscht. Die Aluminiumindustrie wurde daher als Zielmarkt für das recycelte Silizium identifiziert. Im Austausch mit Industrievertretern wurde bestätigt, dass sich das Silizium in der Herstellung von Aluminiumlegierungen einsetzen lässt.

Aufgrund der Fokussierung auf den Aluminiummarkt ist ein Einschmelzen des Siliziums nicht mehr nötig. Da das Silizium im Legierungsprozess bei den abnehmenden Unternehmen eingeschmolzen wird. Dadurch wird der energieintensive Schmelzprozess während des Recyclings vermieden. Das Einschmelzen der Pellets im Arbeitspaket 4.3. wurde somit überflüssig. Stattdessen wurde der Kontakt zu Aluminiumschmelzen aufgebaut und Tests für den Legierungsprozess organisiert.

Die sich daraus ergebende Herausforderung liegt in der Herstellung von stabilen Siliziumpellets die sich als Legierungselement in der Aluminiumschmelze einsetzen lassen.

Die Siliziumpellets sollen zunächst ohne Binder hergestellt werden. Als Vergleichsprozess wurde die Pelletierung mit sogenanntem Silizium Kerf durchgeführt. Silizium Kerf ist ein sehr feines Siliziumpulver, ein Produktionsabfall aus der Solarzellproduktion.



Abbildung 17: Ausgangsprodukte für die durchgeführten Pelletierungsversuche. Links: Solarzellschrott. Rechts: Silizium Kerf

Die Versuche ergaben, dass sich das Silizium-Kerf relativ leicht mit Wasser zu Pellets verpressen lässt. Der Solarzellschrott lässt eine Zugabe aufgrund der Hygroskopizität der Solarzellfragmente nicht zu. Die Solarzellteilchen nehmen das Wasser nicht auf und somit wurde eine trockene Pelletierung durchgeführt. Nach zeitintensiver Parameterstudie ließen sich die Pellets aus den Solarzellteilchen zu Pellets verpressen.



Abbildung 18: Gepresste Pellets aus den beiden Ausgangsprodukten. Links: Solarzellschrott. Rechts: Silizium Kerf.

Es wurden 5 kg der Pellets aus Solarzellschrott hergestellt. Tests zu Abrieb und Festigkeit ergaben, dass die Pellets vor allem durch einen späteren Transport im industriellen Maßstab deutlich an Masse verlieren könnten.

Proben von jeweils einem Kilogramm wurden an die Aluminiumproduzenten ██████████ geschickt, um diese zu verproben. Die Analysen und Versuche ergaben, dass der Abrieb der Pellets zu groß war, um diese industriell im Legierungsprozess zu verwenden.

4.4 Wirtschaftlichkeit

Recycling bedeutet neben der Lösung der Entsorgungsaufgabe auch die Nutzung und Vermarktung der gewonnenen Rohstoffe. Die Projektpartner richten sich bei erfolgreicher Demonstration der Machbarkeit daher mit der Technologie als Dienstleister an die PV-Anwender und als Rohstoff-Nutzer an die Verwerter der recycelten Rohstoffe.

Auf Basis der gesetzlichen Richtlinien können private PV-Anwender die Solarmodule kostenlos an Wertstoffhöfen entsorgen. Die für das Recycling anfallenden Kosten werden dabei durch ein umlagebasiertes System durch Hersteller und Importeure getragen. Verbände wie PV Cycle organisieren dann die weitere Logistik und übergeben die Solarmodule an Recyclingunternehmen. Gewerbliche Kunden wie Betreiber von Solarparks müssen das Recycling selbst bezahlen, was unter Umständen zu einer nicht fachgerechten Entsorgung der Solarmodule führt [38].

Nach Aussagen der bisher am Markt tätigen Recyclingunternehmen deckt die Umlage die Recyclingkosten, ist jedoch nicht gewinnbringend. Der Anreiz für Unternehmen sich am Recycling von Solarmodulen zu beteiligen ist daher gering. Wirtschaftliche Recyclingverfahren sind daher ein wichtiger Baustein für die Erschließung von Solarmodulen als Rohstoffquelle.

Während die Vermarktung von Glas, Kupfer und Plastik den konventionellen Stoffströmen folgt, zielt das Vorhaben mit der Verwertung von Silber und Silizium auf zwei bisher nicht betrachtete Rohstoffe ab. Die erhaltenen Silizium-Pellets können als vollwertiger Silizium-Rohstoff beispielsweise in der Aluminiumindustrie eingesetzt werden, das Silber kann als Edelmetall an Scheideanstalten veräußert werden und von dort zurück in die industriellen Anwendungen gelangen. Durch den niedrigen CO₂-Fußabdruck kann das recycelte Silizium als nachhaltiger Rohstoff zu Marktpreisen an die Kunden verkauft werden.

Für eine Kostenschätzung auf Industrieniveau wurde eine Recyclingwerk mit einer Kapazität von 8.000 t/Jahr angesetzt. Im Vergleich dazu sind in Abbildung 19 die mit den derzeitigen Rohstoffqualitäten darstellbaren Erlöse aufgetragen sowie der Anteil der Recyclinggebühr an den Gesamterlösen.

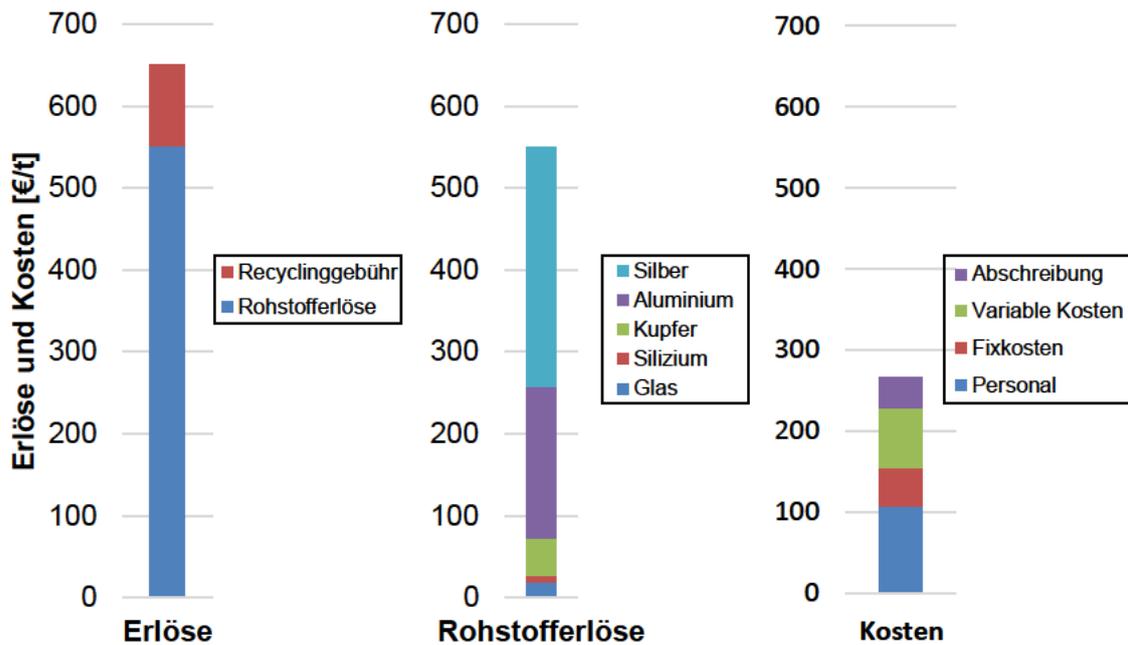


Abbildung 19: Erlöse und Kostenstruktur für eine industrielle Recyclinglösung mit einer Kapazität von 8.000 t/Jahr.

Unter den hier getroffenen Annahmen und den sich aus den Versuchen ergebenden Rohstoffqualitäten ergibt sich eine EBIT-Marge von mehr als 50%.

4.5 Umweltentlastung

Im Gegensatz zum bisherigen Stand der Technik können mit dem Projektansatz alle Metalle zurück in den Rohstoffkreislauf geführt werden. Abbildung 20 vergleicht die Primärproduktion von Aluminium, Kupfer, Silizium und Glas mit dem Energiebedarf beim Recycling.

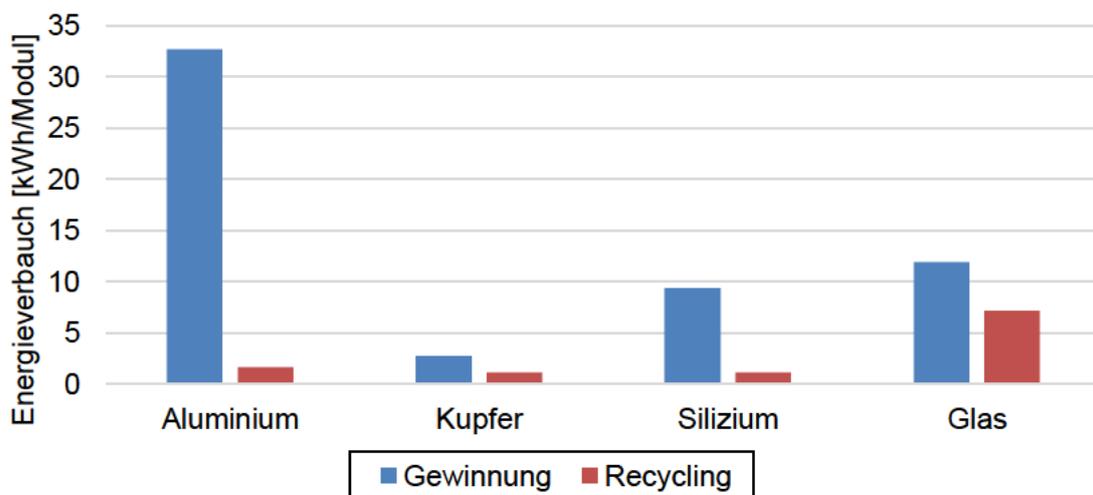


Abbildung 20: Energieverbrauch für die in einem Modul enthaltenen Rohstoffe bei der Primärgewinnung und im Recycling [39–42].

Das Recycling der genannten Rohstoffe spart ca. 80% der elektrischen Energie verglichen mit ihrer Primärproduktion. Dies ist je nach Produktionsstandort äquivalent zu den energieseitigen CO₂-Emissionen. Die Auswirkungen auf die Umwelt sind dabei jedoch nicht nur im Energieverbrauch messbar, sondern äußern sich auch in den Umweltbelastungen durch den Abbau von Erzen wie Bauxit für die Aluminium- oder Kupfergewinnung [43], [44]. Silber wird dabei beispielsweise als Nebenprodukt vom Prozess der Kupfergewinnung abgetrennt, sodass die Auswertung einer separaten Prozesskette nur begrenzt möglich ist [45]. Aufgrund der komplexen Herstellungswege, gerade der bergmännisch abgebauten Rohstoffe, existiert daher keine vergleichbare Datenbasis. Derzeit wird zudem ca. 10% der jährlichen Silberproduktion für die Herstellung von Solarmodulen aufgewendet. Mit den derzeitigen Verfahren wird somit ca. alle zehn Jahre eine gesamte Jahresproduktion an Silber deponiert [13], [35].

Im Rahmen des Projekts wurde beispielhaft die Umweltentlastung auf Basis der realisierten Energieeinsparungen zum Recycling von Silizium durchgeführt. Hierbei wurde zunächst das Recycling von Silizium-Kerf und die Herstellung von Primär-Silizium als Vergleichsbasis herangezogen [46]. Das Recycling einer Tonne Solarmodule benötigt nach aktueller Schätzung in dem hier entwickelten Verfahren ca. 189 kWh. 4 % davon sind nach der Massenbilanz Silizium zuzuordnen. Die weitere Aufbereitung des Siliziums durch Schreddern und Sortieren entspricht weiteren 380 kWh/t. Damit werden je Tonne recycelten Silizium-Pellets ca. 388 kWh elektrischer Energie benötigt. Verglichen mit der Primärproduktion entspricht dies einer Reduktion von 97 %. Durch den Einsatz in der Aluminiumindustrie entfällt das energieintensive Umschmelzen, wie es z.B. beim Recycling von Silizium-Kerf nötig ist, was auch bei bereits recyceltem Silizium nochmals 89 % elektrische Energie einspart. Damit ist der Einsatz in der Metallurgie oder hier in der Aluminiumschmelze, die mit Abstand effizienteste Nutzung des recycelten Siliziums bezogen auf die relativen Einsparungen elektrischer Energie und damit auch CO₂.

In Summe kann das Recycling von Solarmodulen durch die Rückgewinnung der Rohstoffe zu Einsparungen von 3,1 t CO₂/t Solarmodulen beitragen und Einsparungen an elektrischer Energie von 4,8 MWh/t Solarmodulen. Bei ca. 1 Millionen Tonnen zu recycelnden Solarmodulen bis zum Jahr 2030 in Deutschland entspricht dies damit CO₂-Einsparungen von 3,1 Mio. Tonnen.

5 Diskussion

5.1 Technische Machbarkeit

Es bleibt festzuhalten, dass der Primäreffekt zur Delamination durch Erwärmung hervorgerufen wird. Damit ist Ziel eines entsprechenden Verfahrens, eine möglichst effiziente Erwärmung der EVA-Folie. Abweichend vom Stand der Technik und Wissenschaft und Forschung, konnte die Delamination durch UV-Strahlung und Mikrowellenstrahlung ohne Nutzung der Pyrolyse nicht bestätigt werden. Allerdings konnte mit geeigneter IR-Strahlung der gewünschte Effekt reproduzierbar und energieeffizient erzielt werden.

Für den anschließenden Abtrag der Silberleiterbahnen sind abtragende Verfahren grundsätzlich geeignet, jedoch ist hier ein Kompromiss aus Präzision und Durchsatz zu erzielen. Als Faustformel gilt, dass je genauer der Abtrag, desto langsamer der Prozess. Als Lösung wurde daher der Abtrag des Silbers über Bürstverfahren untersucht und positiv bewertet.

Abweichend vom geplanten Lösungsansatz wurde die Prozesskette wie in Abbildung 21 ersichtlich angepasst.

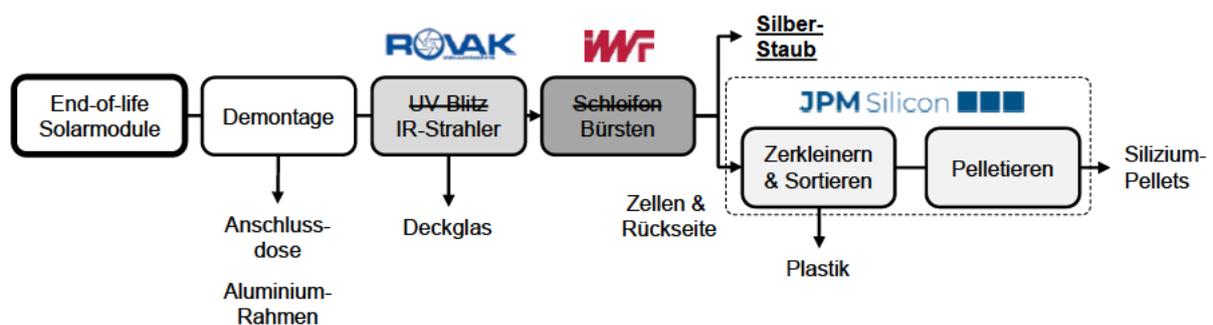


Abbildung 21: Angepasster Recyclingprozess zum Recycling von kristallinen Silizium-Solarmodulen.

5.2 Wirtschaftlichkeit

Derzeit ist für das Recycling ein zweiseitiges Geschäftsmodell möglich. Dies ist zum einen die Dienstleistungen des Recyclings und zum anderen der Verkauf der recycelten Rohstoffe als CO₂-arme Rohstoffe. Durch die geringen Prozesskosten ergibt sich eine hohe operative Marge, was den nötigen Freiraum für die weitere Entwicklung und Markteintritt des Verfahrens ermöglicht. Je nach Szenario kann somit auch auf eine verändernde Marktsituation reagiert werden bei der Solarmodule nicht mehr als Abfall, sondern als Rohstoffquelle bewertet werden. Verglichen mit anderen, am Markt verfügbaren Lösungen ist das Verfahren damit auch derzeit als wettbewerbsfähig und robust für den Industrieinsatz zu bewerten.

Literaturverzeichnis

- [1] STATISTA: *Anteil der Photovoltaik an der Bruttostromerzeugung in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2020.* URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250915/umfrage/anteil-der-photovoltaik-an-der-stromerzeugung-in-deutschland/>. - abgerufen am 2021-02-15. — Statista
- [2] STATISTA GMBH: *Wichtigste Länder weltweit nach installierter Photovoltaikleistung im Jahr 2019.* URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37031/umfrage/solarenergie-weltweit-im-jahr-2009/>. - abgerufen am 2021-02-15
- [3] STEPHANIE WECKEND; ANDREAS WADE; GAVIN HEATH: *End-of-Life Managent: Solar Photovoltaic Panels*, 2016
- [4] PHILIPPS, SIMON ; WARMUTH, WERNER: *Photovoltaics Report*, 2020
- [5] EUROPÄISCHE UNION: Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte, 2012
- [6] PV CYCLE A.I.S.B.L.: *Das Rücknahme- und Recyclingsystem für PV Module: PV Cycle.*
- [7] KARLHEINZ SCHEFFOLD ; RÜDIGER OETJEN-DEHNE: *Recycling von Hohlglas.* In: KARL J. THOMÉ-KOZMIENSKY (Hrsg.): . Neuruppin : TK Verlag, 2014
- [8] SCHROTT24.DE: *Aluminium verkaufen.* URL <https://www.schrott24.de/altmetall-ankauf/aluminium/>. - abgerufen am 2021-03-21
- [9] SCHROTT24.DE: *Kupfer verkaufen.* URL <https://www.schrott24.de/altmetall-ankauf/kupfer/>. - abgerufen am 2021-03-12
- [10] ESG SCHEIDEANSTALT: *Silber Ankaufskurse.* URL <https://www.scheideanstalt.de/aktuelle-ankaufskurse/silber/>. - abgerufen am 2021-03-12. — ESG Scheideanstalt
- [11] THOMAS PROBST: *bvse-Marktbericht: Kunststoffe Februar 2021.* Bonn : Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V., 2021
- [12] *Metalshub - Trading and Price Platform.* . - abgerufen am 2021-03-12
- [13] ALEX LAUGHARNE: *Silver's Important Role in Solar Power*, 2020
- [14] MICHAEL WOODHOUSE ; BRITTANY SMITH ; ASHWIN RAMDAS ; ROBERT MARGOLIS: *Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map* (Technical Report Nr. NREL/TP-6A20-72134) : National Renewable Energy Laboratory (NREL)
- [15] ALEJO MIRANDA: *Schaubild mit Teilen eines Solarpaneels.* Shutterstock, 2020

- [16] DE-WEN ZENG ; MANFRED BORN ; KARSTEN WAMBACH: Pyrolysis of EVA and its application in recycling photovoltaic modules. In: , *J Environ Sci.* Bd. 16 (2004), Nr. 6, S. 889–893
- [17] DIAS, PABLO ; JAVIMCZIK, SELENE ; BENEVIT, MARIANA ; VEIT, HUGO: Recycling WEEE: Polymer characterization and pyrolysis study for waste of crystalline silicon photovoltaic modules. In: *Waste Management* Bd. 60 (2017), S. 716–722
- [18] TAO, MENG ; FTHENAKIS, VASILIS ; EBIN, BURCAK ; STEENARI, BRITT-MARIE ; BUTLER, EVELYN ; SINHA, PARIKHIT ; CORKISH, RICHARD ; WAMBACH, KARSTEN ; U. A.: Major challenges and opportunities in silicon solar module recycling. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* Bd. 28 (2020), Nr. 10, S. 1077–1088
- [19] CHOWDHURY, MD. SHAHARIAR ; RAHMAN, KAZI SAJEDUR ; CHOWDHURY, TANJIA ; NUTHAMMACHOT, NARISSARA ; TECHATO, KUAANAN ; AKHTARUZZAMAN, MD. ; TIONG, SIEH KIONG ; SOPIAN, KAMARUZZAMAN ; U. A.: An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. In: *Energy Strategy Reviews* Bd. 27 (2020), S. 100431
- [20] HEATH, GARVIN A. ; SILVERMAN, TIMOTHY J. ; KEMPE, MICHAEL ; DECEGLIE, MICHAEL ; RAVIKUMAR, DWARAKANATH ; REMO, TIMOTHY ; CUI, HAO ; SINHA, PARIKHIT ; U. A.: Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy. In: *Nature Energy* Bd. 5 (2020), Nr. 7, S. 502–510
- [21] MACALOVA, K ; VACLAVIK, V ; DVORSKY, T ; SVOBODA, J ; CHARVAT, J ; GOLA, L: Recycling of photovoltaic panels - A review of the current trends. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Bd. 867, IOP Publishing (2020), S. 012029
- [22] VEOLIA: *Auf der Sonnenseite*. URL <https://www.veolutions.veolia.de/unfinished-innovatives-recycling-von-photovoltaikmodulen-auf-der-sonnenseite>. — Veolia (Veolutions)
- [23] EIT RAWMATERIALS: *ReProSolar: Demonstrator of High Grade PV Recovery Value Chain in Europe*. URL <https://eitrawmaterials.eu/project/reprosolar/>. - abgerufen am 2021-02-18. — Innovation Projects
- [24] DOLD, PETER: *Vorhabenbezeichnung: Aufarbeiten von Altmodulen und Rückführung von Wertstoffen in den Stoffkreislauf (EoL-Cycle): Abschlussbericht: Laufzeit und Berichtszeitraum des Vorhabens: 01.09.2016 bis 31.08.2019*. application/pdf. 1 Online-Ressource (42 Seiten, 7,47 MB) : Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, 2019. — DOI: 10.2314/KXP:1726766330
- [25] IRIS ANN LOHMANN ; TOBIAS SCHOLZ: *Gemeinsame Aufbereitung verschiedenartiger Photovoltaikmodule zur Wertstoffrückgewinnung* (Abschlussbericht Nr. 33913–21/2), 2019
- [26] LATUNUSSA, CYNTHIA E.L. ; ARDENTE, FULVIO ; BLENGINI, GIAN ANDREA ; MANCINI, LUCIA:

Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* Bd. 156 (2016), S. 101–111

[27] FABIAN GELTZ: ELSi: Solar Module Recycling.

[28] SEBASTIAN KERNBAUM ; FLORIAN LOVIS ; THOMAS SURMANN: *Entwicklung von nanoskaligen Trennmedien und Konstruktion einer kontinuierlichen Anlage für die Aufbereitung von PV-Modulen (saperaTens)* (Abschlussbericht Nr. 29682). Bielefeld, 2015

[29] WOLFRAM PALITZSCH: ZIM-Erfolgsbeispiel: Aus alt mach neu: Solarmodul-Recycling.

[30] KLUGMANN-RADZIEMSKA, EWA ; OSTROWSKI, PIOTR: Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. In: *Renewable Energy* Bd. 35 (2010), Nr. 8, S. 1751–1759

[31] GERNOT ORESKI: *PV Re2 - Nachhaltige Photovoltaik*. URL <https://www.pccl.at/projekte-des-pccl/projekt-pv-re2-nachhaltige-photovoltaik.html>

[32] BART GEERLIGS: CU-PV project 2012-2015: Cradle to Cradle Sustainable PV Modules.

[33] GLATTHAAR, J. ; KAMDJE, E. ; BARNIKEL, J.B. ; DAX, M. ; SCHAUB, V. ; STEVENS, H.G. ; JEHL, B. ; RICKLEFS, U. ; U. A.: Development of a Modular Cradle to Cradle Process-Chain for c-Si-PV Panel Recycling. In: *33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1528-1532*, WIP (2017), S. 5 pages, 3658 kb

[34] ANDRÉ POHL ; MALTE DUKAT ; BEATE KUMMER ; MONIKA NOLDEN: *RESOLAR: Entwicklung eines europaweiten Rücknahmesystems für Solarmodule* (Abschlussbericht Nr. 27137–24/7). Osnabrück, Bad Honnef, 2010

[35] HARRY WIRTH: *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Freiburg : Fraunhofer ISE, 2021

[36] T CHIARAPPA ; F BIANCIFIORI ; A MORALES ; G SAN VICENTE ; S SANTI: Comparing abrasion testing results on AR-coatings for solar receivers, Unpublished (2014)

[37] LEMARCHAND, PHILIPPE ; MCLEAN, EOIN ; NORTON, BRIAN: Switchable Windows - Spectral Transmission and Switching Times. In: *Proceedings of SWC2017/SHC2017*. Abu Dhabi : International Solar Energy Society, 2017 — ISBN 978-3-9814659-7-6, S. 1–11

[38] EMILIANO BELLINI: *Lessons to be learnt from Italy's alleged PV fraud*. URL <https://www.pv-magazine.com/2020/03/10/lessons-to-be-learnt-from-italys-alleged-pv-fraud/>. - abgerufen am 2021-03-04. — pv magazine

[39] TILL ZIMMERMANN ; STEFAN GÖBLING-REISEMANN ; RALF ISENMANN: *DelphiNE: Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen in der Nichteisenmetallindustrie durch eine Zukunftsanalyse nach der Delphi-Methode* (Abschlussbericht) : Umweltbundesamt (UBA),

2018

- [40] JÜRGEN GIEGRICH ; AXEL LIEBICH ; HORST FEHRENBACH: *Ableitung von Kriterien zur Beurteilung einer hochwertigen Verwertung gefährlicher Abfälle* (Endbericht Nr. 202 35 310). Heidelberg : Umweltbundesamt (UBA), 2007
- [41] JOACHIM HARDER: *Energieeffizienz: Energie-Intensität im Kupfer- und Goldbergbau*. URL https://www.at-minerals.com/de/artikel/at_Energieeffizienz_Energy_efficiency_3001683.html. - abgerufen am 2021-03-04. — AT Mineral Processing
- [42] BIRGER ANDRESEN: The Metallurgical Silicon Process Revisited. In: . Ålesund, Geiranger (Norwegen), 2010
- [43] DONALD BLEIWAS: *Estimates of Electricity Requirements for the Recovery of Mineral Commodities, with Examples Applied to Sub-Saharan Africa* (Open File Report Nr. 2011–1253). Virginia (USA), 2011
- [44] OECD: *Measuring Material Flows and Resource Productivity* (Synthesis Report) : OECD, 2008
- [45] ECOMATERIALS CENTER: *Estimation of CO2 Emission and Energy Consumption in Extraction of Metals* : National Institute for Materials Science, 2003
- [46] BLÖMEKE, STEFFEN ; ARAFAT, ROBAR ; YANG, JIANPENG ; MAI, JAN-PHILIPP ; CERDAS, FELIPE ; HERRMANN, CHRISTOPH: Environmental assessment of silicon kerf recycling and its implications on solar cells and Li-ion batteries. In: *Procedia CIRP* (2023)