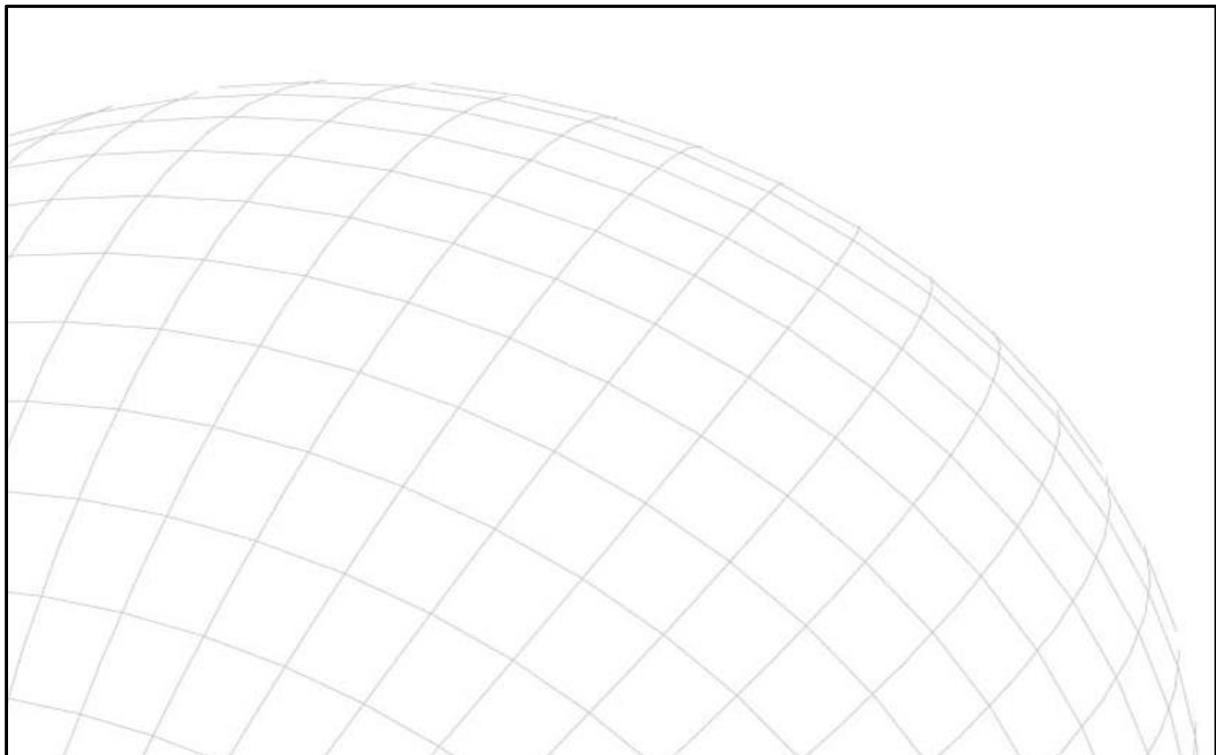


MoNaL - Mobilität nachhaltig über den Lebenszyklus gedacht

Förderkennzeichen: 16EXI4011A

Umsetzung von Umweltstandards im Bereich Reuse/Recycling und Mini-Grids/Off-Grid Solarladestation

Konzeptpapier



PROF. DR.-ING. SEMIH SEVERENGIZ

Labor für Nachhaltigkeit in der Technik

Hochschule Bochum - Fakultät für Elektrotechnik und Informatik

Am Hochschulcampus 1

44801 Bochum

T +49 (0) 234 32 10-328

semih.severengiz@hs-bochum.de

Inhalt

1.	Einleitung.....	1
2.	Abfallwirtschaft von Elektroschrott in Ghana	2
2.1.	Praktische Rahmenbedingungen.....	2
2.2.	Rechtliche Rahmenbedingungen.....	3
2.2.1.	Nationale Ebene	3
2.2.2.	Internationale Ebene	5
3.	Konzepte zum fachgerechten Umgang mit E-Waste.....	5
3.1.	Export	5
3.2.	Reuse: Second-Life-Anwendungen von Solarmodulen und Fahrzeugbatterien in Ghana	6
3.2.1.	Anwendungsfälle für Hochspannungsnetze.....	7
3.2.2.	Anwendungsfälle für Niederspannungsnetze	9
3.2.3.	Leitlinien zur fachgerechten Begutachtung, Aufbereitung und Weiterverwertung von dekommissionierten PV-Modulen.....	11
	Stufe 1: Visuelle Prüfung	12
	Stufe 2: Inspektion und Reparatur (Hoch- oder Niederspannung)	12
	Stufe 3: Kontrolle der Zellen.....	13
	Stufe 4: Flash-Test	14
	Stufe 5: Elektrische Prüfung und abschließende Sortierung.....	14
3.3.	Recycling: Fachgerechte Entsorgung von Elektroschrott	15
3.3.1.	Leitlinien für das Recycling von gebrauchten PV-Modulen.....	17
3.3.1.1.	Recyclingprozesse für Si-PV-Module unter Laborbedingungen	17
3.3.1.2.	Recycling von Si-PV-Modulen in der Praxis	18
3.3.2.	Leitlinien für das Recycling von Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Batterien	22
3.3.2.1.	Recycling von Blei-Säure-Batterien	22
3.3.2.2.	Recycling von Lithium-Ionen-Batterien	23
3.3.2.3.	Stand der Technik des Recyclingprozesses.....	24
4.	Schlussfolgerung.....	25
	Quellen	26
	Anhang	i

1. Einleitung

Dieser Bericht umfasst Handlungsoptionen und Leitlinien für End-of-Life-Strategien von Elektroschrott, zur perspektivischen Umsetzung von Umweltstandards in Ghana. Dabei liegt der Analyseschwerpunkt auf Reuse- und Recyclingkonzepten für PV-Solarmodule und e-Fahrzeugbatterien, wie sie im Rahmen des MoNaL-Projektes verwendet werden. Diese können, über das MoNaL-Projekt hinaus, örtliche Entscheidungsträger dabei unterstützen qualifizierte Maßnahmen zum fachgerechten End-of-Life Management von PV- und Batteriealtgeräten umzusetzen.

In Kapitel 2 wird zunächst die aktuelle Situation der Abfallwirtschaft von Elektroschrott in Ghana erläutert. Dazu werden sowohl die derzeitige Praxis im Recyclingsektor als auch die wesentlichen nationalen wie internationalen rechtlichen Rahmenbedingungen beleuchtet. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3.1. Exportbedingungen für elektrischen und elektronischen Abfall skizziert. Weitere Analysen ergaben Anwendungsfälle für ein Reuse von PV-Modulen und Batterien in Hochspannungs- wie Niederspannungsnetzen. Die nötige Sicherheit für einen Einsatz kann eine fachgerechte Aufarbeitung bieten. Dazu wurde in Kooperation mit dem beauftragten Unternehmen SunCrafter ein Leitfaden für die Inspektion, Bewertung, Sanierung und Kontrolle der Module entwickelt. Der mehrstufige Prozess wird anschaulich in Kapitel 3.2.3. skizziert. Für ein umweltverträgliches End-of-Life-Management werden in Kapitel 3.3. fachgerechte Entsorgungs- bzw. Verwertungsprozesse beschrieben. In Kapitel 3.3.1 wird ein Recyclingprozess für PV-Module skizziert, welcher durch das MoNaL-Projekt in Zusammenarbeit mit der Reiling GmbH und Electro Recycling Ghana Limited (ERG), einem EPA-zertifizierten Recyclingunternehmen aus Ghana, erarbeitet wurde. Dabei wird im Besonderen auf Unterschiede zwischen Laborbedingungen und Verfahren in der Praxis eingegangen. Abschließend wird in Kapitel 3.3.2. der Stand der Recyclingtechnik für zwei relevante Batterietypen (Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Batterien) beleuchtet. Vor dem Hintergrund der gefährlichen informellen Recyclingstrukturen in Ghana wird gesondert auf die Möglichkeit der Vorverarbeitung von Batteriebestandteilen eingegangen, welche einen sicheren Transport und ausländische Prozessierung ermöglichen sollen. Die im Rahmen des MoNaL-Projektes und diesem Konzeptpapier ausgearbeiteten Leitlinien bieten eine Grundlage zur Erarbeitung von weitreichenderen Standards zum umweltfreundlichen Umgang mit e-Waste in Ghana.

2. Abfallwirtschaft von Elektroschrott in Ghana

2.1. Praktische Rahmenbedingungen

In Ghana existiert zurzeit kein effektiver formeller Recyclingsektor für Elektroschrott (Abbildung 1). Die Sammlung des elektrischen und elektronischen Abfalls wird weitgehend von informellen Akteuren durchgeführt (Owusu-Sekyere et al. 2022). Dabei basiert der informelle Sektor auf einer nicht regulierten Struktur und bildet einen eigenen „Mikrokosmos“ mit strenger Hierarchie. Auf einer ersten Ebene stehen die Sammler, welche den Elektroschrott von Verbrauchern einsammeln und zu Sammelstellen bringen. Über Zwischenhändler wird der Elektroschrott an Verwerter verkauft, wenn diese auf keine eigenen Verwertungsketten durch eigene Sammler zurückgreifen können. Der Elektroschrott wird so über unterschiedliche Zwischenstufen zu großen Schrottplätzen wie Agbogbloshie transportiert (Owusu-Sekyere et al. 2022; Offei 2022).

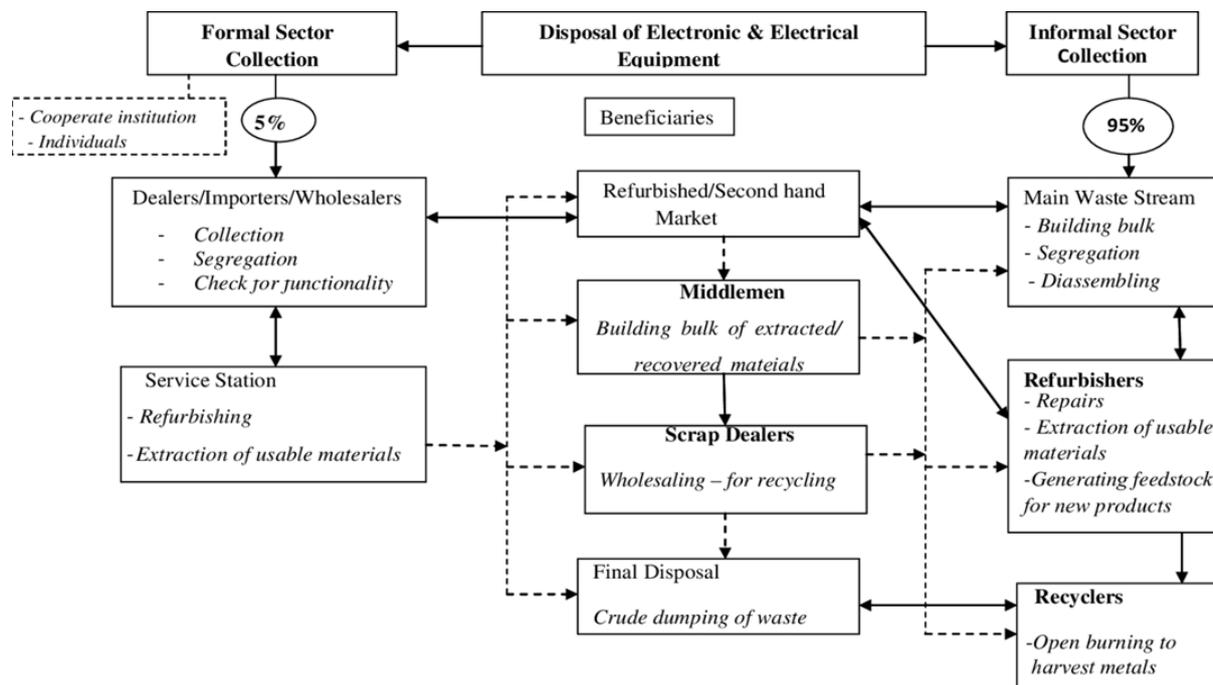


Abbildung 1: Übersicht über die Abfallwirtschaft für Elektroschrott in Ghana (eigene Darstellung)

Dabei haben unsachgemäße Recyclingmethoden durch informelle Akteure, wie das Verbrennen von Kabeln in offenen Feuern ohne Schutzausrüstung (Abbildung 2), zu negativen gesundheitlichen Folgen für die lokale Bevölkerung geführt (Owusu-Sekyere et al. 2022). Dennoch wird die Praxis aufgrund von



Abbildung 2: Verbrennung von elektrischen Kabeln zur Kupfergewinnung in Agbogbloshie, Ghana. Bild: Muntaka Chasant

Arbeitslosigkeit und Armut fortgesetzt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Rückgewinnung wertvoller Materialien wie Aluminium und Kupfer, während weniger wertvolle Komponenten entsorgt werden (Owusu-Sekyere et al. 2022). Da die informellen Verwerter Kosten bei einer unsachgemäßen Entsorgung vermeiden können, ist diese informelle Art des Recyclings im Vergleich zum ordnungsgemäßen Recycling profitabler (Owusu-Sekyere et al. 2022).

Die Einbindung informeller Stakeholder in eine formelle Recyclingstruktur ist jedoch unerlässlich und

kann die Grundlage für die Entwicklung einer verbesserten Recyclingindustrie bilden. Ein optimiertes und verbessertes Recycling hat nicht nur das Potenzial, die Umweltauswirkungen zu verringern, sondern auch sichere Arbeitsplätze und nachhaltige Einkommen zu schaffen. Um die Entsorgung von Elektroschrott formell zu regulieren und zu standardisieren, hat die ghanaische Regierung in jüngster Zeit Gesetzgebungen verabschiedet. Die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Umgang mit elektronischen und elektrischem Abfall werden im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

2.2. Rechtliche Rahmenbedingungen

Für das Abfallmanagement elektrischer und elektronischer Geräte in Ghana ist das Ministerium für Umwelt, Wissenschaft, Technologie und Innovation (MESTI) zuständig. Gemeinsam mit den zuständigen Behörden wie der Environmental Protection Agency (EPA) und der Ghana Standards Authority (GSA) wurden Schritte eingeleitet, um die Entsorgung von Elektroschrott auf nationaler und lokaler Ebene zu modernisieren, mit dem Ziel, die von der ghanaischen Regierung geschlossenen internationalen Verträge und Vereinbarungen zu erfüllen. Abbildung 3 zeigt einen Überblick über den nationalen wie internationalen Rechtsrahmen, der für die Elektroabfallwirtschaft in Ghana wesentlich ist.



Abbildung 3: Überblick über den rechtlichen Rahmen für die Elektroschrottentsorgung in Ghana (eigene Darstellung)

Auf die einzelnen Punkte wird im Folgenden näher eingegangen.

2.2.1. Nationale Ebene

Auf nationaler Ebene bestimmen drei Schlüsseldokumente die Gesetzgebung zur Bewirtschaftung von Elektroschrott in Ghana:

- der "Hazardous and Electronic Waste Control and Management Act" (hier als Act 917 bezeichnet);
- Rechtsvorschrift 2250 zur Klassifizierung, Kontrolle und Management gefährlicher, elektronischer und anderer Abfälle (hier als LI 2250 bezeichnet); sowie weitere
- technische Leitlinien für eine umweltverträgliche Bewirtschaftung von Elektroschrott in Ghana.

Infolge der weltweiten Berichterstattung über die ökologischen und sozialen Auswirkungen der inländischen Elektroschrottentsorgung hat das ghanaische Parlament im Jahr 2016 den Act 917 zur Kontrolle und Verwaltung von gefährlichem und elektronischem Abfall verabschiedet (Akon-Yamga et al. 2021). Er besteht aus zwei Teilen.

Teil 1: Kontrolle und Management gefährlicher und anderer Abfälle

- Die Anforderungen des Basler Übereinkommens werden darin in nationales Recht umgesetzt, so dass das „Verfahren der vorherigen Zustimmung in Kenntnis der Sachlage“ des Basler Übereinkommens angewandt werden kann. Andernfalls wird die grenzüberschreitende Verbringung gefährlicher Abfälle als illegal eingestuft.

Teil 2: Elektro- und Elektronikabfall

- Dieser Teil betrifft speziell die Abfallverwertung von Elektro- und Elektronikgeräten. Ein Hauptelement ist die Einrichtung eines Fonds für die Abfallwirtschaft von Elektro- und Elektronikgeräten (Gesetz 917, Artikel 23). Damit sollen Finanzmittel für die Bewirtschaftung von Elektro- und Elektronikgeräten bereitgestellt und die negativen Auswirkungen dieser Geräte auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt verringert werden (Gesetz 917, Artikel 24). Artikel 28 besagt, dass 40 % des Fonds für den Bau und die Verwaltung von Abfallverwertungsanlagen und damit verbundenen Einrichtungen verwendet werden sollen.

Das Gesetz 917 dient als wichtigster Bezugspunkt für Initiativen und Entwicklungen in Bezug auf die Bewirtschaftung von Elektroschrott, einschließlich PV-Solarmodulen. Zur Umsetzung des Gesetzes 917 wurde 2016 das entsprechende Rechtsinstrument LI 2250 verabschiedet, welches 2017 in Kraft trat. Es dient dazu:

- a. die Klassifizierung, Kontrolle und Entsorgung von Abfällen zu regeln;
- b. einen Verfahrensweg für die Auflistung von Aktivitäten zur Abfallentsorgung festzulegen, für die keine Genehmigungspflicht besteht;
- c. Anforderungen für die Einrichtung von Rücknahmesystemen vorzuschreiben;
- d. Anforderungen und Fristen für die Verwertung der gelisteten Abfälle vorzuschreiben;
- e. allgemeine Pflichten von Abfallerzeugern, Abfallbeförderern und Abfallentsorger vorschreiben; und
- f. Anforderungen an die Abfallbeseitigung vorschreiben. (LI 2250, Artikel 1a.-f.)

Darüber hinaus wurden von der Umweltschutzbehörde technische Leitlinien für eine umweltverträgliche Bewirtschaftung von Elektroschrott ("Technical Guidelines on Environmentally Sound E-Waste Management") entwickelt. Diese dienen als Leitfaden für Unternehmen und Einzelpersonen, welche sich mit der Verwertung von Elektroschrott in Ghana beschäftigen. In fünf Ebenen („Tiers“) werden spezifische Anforderungen an die Tätigkeiten innerhalb der Wertschöpfungskette für Elektroschrott gestellt (Abbildung 4).

Ebene 1: Sammler*innen	Ebene 2: Sammelstellen	Ebene 3: Transportunternehmen	Ebene 4: Abfallbehandlungsanlage	Ebene 5: Abfallentsorgung
<ul style="list-style-type: none"> • Registrierung bei den zuständigen Behörden • Verbot von Tätigkeiten der Behandlung von Elektroschrott (z. B. Demontage) • Verbot der Übergabe von Elektroschrott an eine nicht vom EPA zugelassene Sammelstelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Registrierung bei der EPA und anderen zuständigen Stellen durch Einreichung der erforderlichen Formulare • Verbot der Behandlung von Elektroschrott ohne Genehmigung des EPA • Übergabe von nicht verwertbaren Bestandteile an eine Anlage der Stufe 5 	<ul style="list-style-type: none"> • Transport von wiederverwendbaren Geräten in vorgeschriebenen Transportmitteln • Transportkapazitäten müssen der Straßenverkehrsordnung entsprechen • Die Lagerung geschieht unter Vermeidung der Freisetzung gefährlicher Stoffe in die Umwelt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Registrierung bei der EPA und Meldung der ein- und ausgehenden Elektroschrottmengen • Keine unsachgemäße Entsorgung von Elektroschrott • Lieferung ausschließlich an Anlagen, die für die Annahme der entsprechenden Materialien zugelassen oder zertifiziert sind und die gemäß Gesetz 917 oder international registriert sind • Dokumentation der Abfallbehandlung • entfernte Komponenten sind getrennt zu lagern und zu kennzeichnen 	<ul style="list-style-type: none"> • Eigentümer und Betreiber von Deponien müssen von der EPA und den MMDAs zugelassen sein und von fachkundigen Stellen in Zusammenarbeit mit der EPA geschult werden. • Vergraben oder offenes Verbrennen ist strengstens verboten.

Abbildung 4: Technische Richtlinien basierend auf LI 2250, 5 Tiers (eigene Darstellung)

2.2.2. Internationale Ebene

Auf internationaler Ebene stellt das Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer eine wichtige Grundlage dar, an deren Vorgaben sich nationale wie internationale Gesetze und Normen ausrichten. Es wurde 1989 verabschiedet und trat 1992 in Kraft. Ghana ist mit der Ratifizierung seit 2003 Vertragspartei. Ziel des Basler Übereinkommens ist es, die internationale Ein- und Ausfuhr von gefährlichen Abfällen (z. B. Solarmodule oder Batterien) zu kontrollieren, regulieren und minimieren, um die menschliche Gesundheit und die Umwelt vor den negativen Auswirkungen solcher Abfälle zu schützen. Zu diesem Zweck wurde ein Regelungssystem geschaffen (Hoeltl, Brandtweiner, and Müller 2017; Peiry 2010). Die wichtigsten Grundsätze sind:

- die Reduktion der Erzeugung gefährlicher Abfälle und die Förderung einer umweltgerechten Abfallwirtschaft, unabhängig vom Ort der Entsorgung;
- die Einschränkung der grenzüberschreitenden Abfallverbringung, ausgenommen wenn dies im Interesse eines umweltverträglichen Abfallmanagements liegt; und
- ein Regelungssystem für die Fälle, in denen die grenzüberschreitende Abfallverbringung zulässig ist. (Peiry 2010)

Mit der Unterzeichnung und Ratifizierung verpflichtet sich ein Land dazu 1) internationale Lieferungen von Abfällen ohne vorherige Ankündigung und Zustimmung als illegal zu klassifizieren, sowie 2) die umweltverträgliche Entsorgung von Abfällen (ESM) innerhalb der eigenen Landesgrenzen zu gewährleisten.

3. Konzepte zum fachgerechten Umgang mit E-Waste

Im Rahmen des MoNaL-Projektes wurden elektrische Geräte nach Ghana importiert, um ein Produktsystem für Mobilität und Energieversorgung im Rahmen einer Produktklinik zu testen. Wie in Kapitel 2 beschrieben, ist der Recyclingsektor in Ghana zu großen Teilen informell und garantiert keine sachgemäße und umweltfreundliche Verwertung des durch Projektaktivitäten entstehenden e-Wastes. Basierend auf den identifizierten aktuellen Rahmenbedingungen werden im Folgenden Handlungsmöglichkeiten für EntscheiderInnen aufgezeigt, welche einen fachgerechten Umgang mit e-Waste anleiten können. Näher beleuchtet werden dabei im Folgenden Ansätze zum Export, zur Begutachtung und Aufarbeitung für Second-Life-Anwendungen sowie zum Recycling von PV-Modulen und Fahrzeugbatterien.

3.1. Export

Als Unterzeichner des Basler Übereinkommens kann Ghana den Export von Abfallkomponenten wie Batterien und Solarmodulen in andere Länder in Betracht ziehen, wenn diese innerhalb der eigenen Landesgrenzen nicht angemessen verwertet werden können. Über das Baseler Übereinkommen hinaus gelten bei einem Export auch die nationalen Verordnungen des Entsender- wie des Ziellandes. Für einen Export nach Deutschland sind beispielsweise darüber hinaus auch europäische Verordnungen (wie Nr. 1013/200 über die Verbringung von Abfällen (VVA)) sowie nationale (wie das Abfallverbringungsgesetz in Deutschland) gesetzlichen Regelungen relevant.

Da PV-Module und Traktionsbatterien als gefährliche Abfälle eingestuft sind, ist für die Verbringung ein vorheriges schriftliches Melde- und Genehmigungsverfahren erforderlich. Der Exporteur ist daher verpflichtet, bei der zuständigen Behörde des Versandortes, d. h. des Ortes, an dem die Abfälle anfallen, einen Antrag zu stellen. Im Falle Ghanas fungieren die EPA und/oder das MESTI als die genannte Behörde, die für die Weiterleitung der entsprechenden Dokumente an die zuständige Behörde des Bestimmungsortes, an dem die Abfälle endgültig entsorgt werden, verantwortlich ist. In Deutschland liegt diese Verantwortung wiederum bei den Behörden des jeweiligen Bundeslandes (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2007). Dieser Prozess (Abbildung 5) ist in seiner Dauer schwankend und kann sich verzögern, da noch keine digitale Datenverarbeitung unterstützt wird. Die Planung und Finanzierung kann sich als schwierig erweisen, weshalb es darüber hinaus dienlich sein kann, Reuse- und Recyclingmöglichkeiten in Ghana zu Betracht zu ziehen.

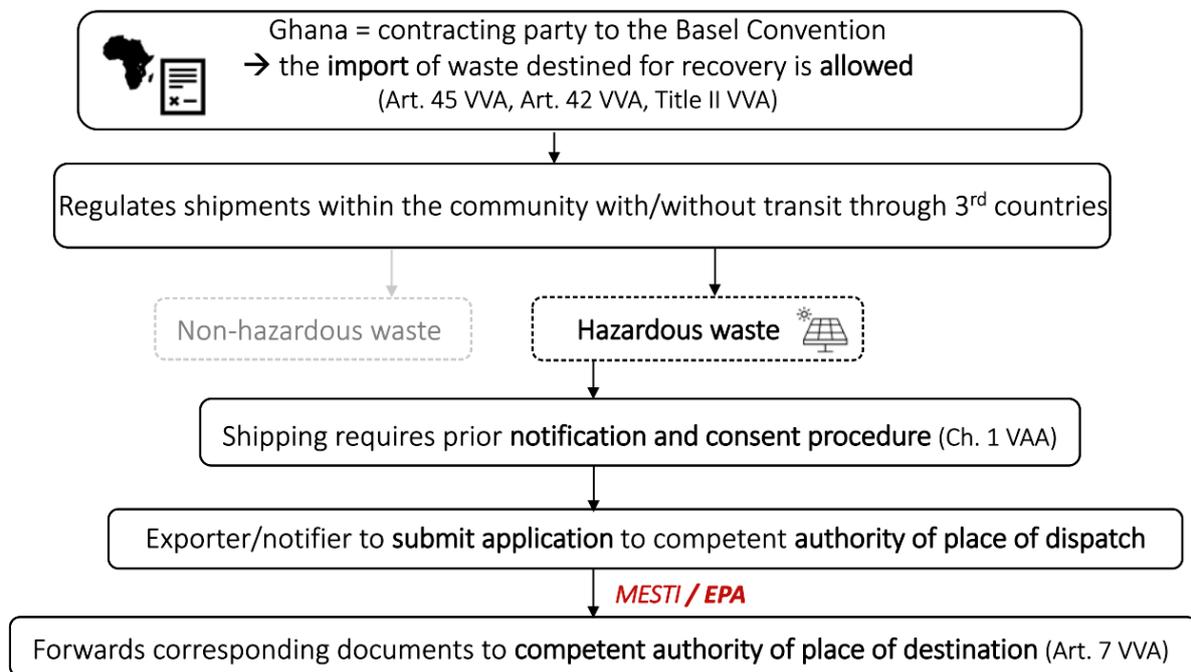


Abbildung 5: Export von E-Schrott-Komponenten von Ghana nach Deutschland (eigene Darstellung)

3.2. Reuse: Second-Life-Anwendungen von Solarmodulen und Fahrzeugbatterien in Ghana

Der ghanaische Solarsektor erlebt ein exponentielles Wachstum. Die derzeitige installierte Kapazität von etwa 42,5 MW im Jahr 2018 soll nach den Zielen der ghanaischen Regierung bis 2030 auf 1.363,63 MW ausgebaut werden (Amo-Aidoo et al. 2022). Das bedeutet, dass das Land zunehmend e-Waste aus Solarmodulen verwerten muss, ohne dass es eine Möglichkeit gibt, diese am Ende des Lebenszyklus anfallenden Altgeräte effektiv und formell zu recyceln oder wiederzuverwenden. Trotz der durchschnittlichen Nutzungsdauer einer Solaranlage von 20 Jahren wird bereits in diesem Zeitraum eine große Menge an Modulen aufgrund von Defekten oder Schadensfällen ausgemustert werden. Dieser Effekt wird durch die Verfügbarkeit effizienterer und billigerer Paneele noch verstärkt, die es wirtschaftlicher machen, ganze Abschnitte von Paneelen, anstatt nur Einzelner, zu ersetzen. In vielen Fällen sind die Defekte jedoch geringfügig und die Module können weiterhin für andere Anwendungen, meist in kleineren Anlagen, verwendet werden.

Die Analyse von Anwendungsfällen wird im Folgenden am Beispiel von Second-Life-C-Si-Solarmodulen illustriert (Tabelle 1). Zunächst ist eine Unterteilung in Anwendungsfälle für weniger als drei Module (niedrigere Spannung) und Anwendungsfälle für mehr als drei Module (höhere Spannung) sinnvoll, da die verschiedenen Anwendungsfälle unterschiedliche Leistungsparameter für die verwendeten Module erfordern. Bei höheren Spannungen (> 60 Volt), bei denen mehrere Module zu einem String zusammengeschaltet werden und zusammen eine höhere Kapazität und Spannung bilden, müssen die Module eine höhere Restqualität aufweisen. In Anwendungsfällen mit niedrigerer Spannung kann die Qualität der Module geringer sein, da die Sicherheit durch die niedrigere Spannung besser gewährleistet ist. Unter 60 Volt wird von Niederspannung oder „Schutzkleinspannung“ (SELV) gesprochen.

Anwendungsfälle für Second-Life-C-Si-Solarmodulen	
Hochspannungsnetz	Niedrigspannungsnetz
>60 Volt	<60 Volt
>3 Module	</= 3 Module
Hohe Restqualität	Geringere Restqualität
Anwendungsfälle: 1) Aufdachanlagen, 2) Solarbetriebene Kühlsysteme	Anwendungsfälle: 1) Mikromobilität, 2) Dezentralisierte Solar-Home-Systeme, 3) Abgelegene Gemeinden und landwirtschaftliche Anwendungsfälle

Tabelle 1: Anwendungsfälle für Second-Life-C-Si-Solarmodulen (Eigene Darstellung)

Im Folgenden werden Anwendungsbeispiele in Hochspannungs- und SELV-Anwendungen für Second-Life Anwendung von PV-Modulen zur Stromerzeugung und Fahrzeugbatterien zur Speicherung beleuchtet. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf den SELV-Anwendungsfällen, da diese aufgrund der geringeren Anforderungen an die Module und an den Platzbedarf breitere Einsatzmöglichkeiten aufweisen.

3.2.1. Anwendungsfälle für Hochspannungsnetze

Um Second-Life-Module für Stringsysteme mit einer höheren Spannung als 60 Volt, d. h. mit mehr als drei Modulen, verwenden zu können, sollten die Module

- möglichst wenig beschädigt sein,
- Originalteile enthalten, insbesondere was die Dioden betrifft, und
- in Bezug auf Typ, Abmessung und ihre elektrischen Parameter wie Spannung und Stromstärke einander sehr ähnlich sein.

In diesen Anwendungsfällen ist es notwendig strenge Tests mit Spezialausrüstung wie Elektrolumineszenz-Prüfsystemen und Flash-Test-Geräten durchzuführen, um die Sicherheit zu gewährleisten und elektrische Brände zu vermeiden. Mit Hilfe des Elektrolumineszenzverfahrens sollten die Paneele auf Mikrorisse geprüft werden, welche mit dem Auge nicht sichtbar sind. Bei einer hohen Anzahl von Rissen in den Zellen würden sich diese bei wechselnden Witterungsbedingungen verstärken und im schlimmsten Fall zu einem elektrischen Brand führen. Eine weitere Hürde für eine Verwendung im Second-Life im Hochspannungsnetz besteht darin, eine ausreichende Menge gut gepflegter, homogener Module zu verwenden. Die ähnliche elektrische Parameter wichtig sind, da eine unzureichende Leistung eines Moduls den gesamten String beeinträchtigen kann. Durch einen Flashtest können möglichst genaue Leistungsdaten der einzelnen Module ermittelt werden. Wenn alle

diese Voraussetzungen gegeben sind, können die Module in einem normalen Stromerzeugungsprozess mit höherer Spannung eingesetzt werden, z.B.:

- I) **Aufdachanlagen:** Eine klassische Anwendung für eine höhere Spannung sind Dachanlagen. Abhängig von der Größe des Daches und/oder dem Bedarf des Nutzers wird eine bestimmte Anzahl von Modulen auf dem Dach montiert und mit einem Wechselrichter, einer Batterie und anderen Komponenten ausgestattet. Für einen Haushalt beträgt die typische installierte Leistung weniger als 10 Kilowattpeak (kWp) (Weiss de Abreu et al. 2021). Da der Platz auf einem Dach begrenzt ist und die Module in der nördlichen Hemisphäre idealerweise nach Süden ausgerichtet sein sollten, ist die Verwendung leistungsstarker Module mit einer Restkapazität von mindestens 200 Watt Peak (Wp) empfehlenswert. Eine Reihe von 5 Modulen würde dann 1 kWp bzw. zwischen 1.350 kWh in Süd-ghana und 1.650 kWh in Nord-ghana erzeugen (Abbildung 6). Daten der Weltbank zufolge liegt der Pro-Kopf-Stromverbrauch in

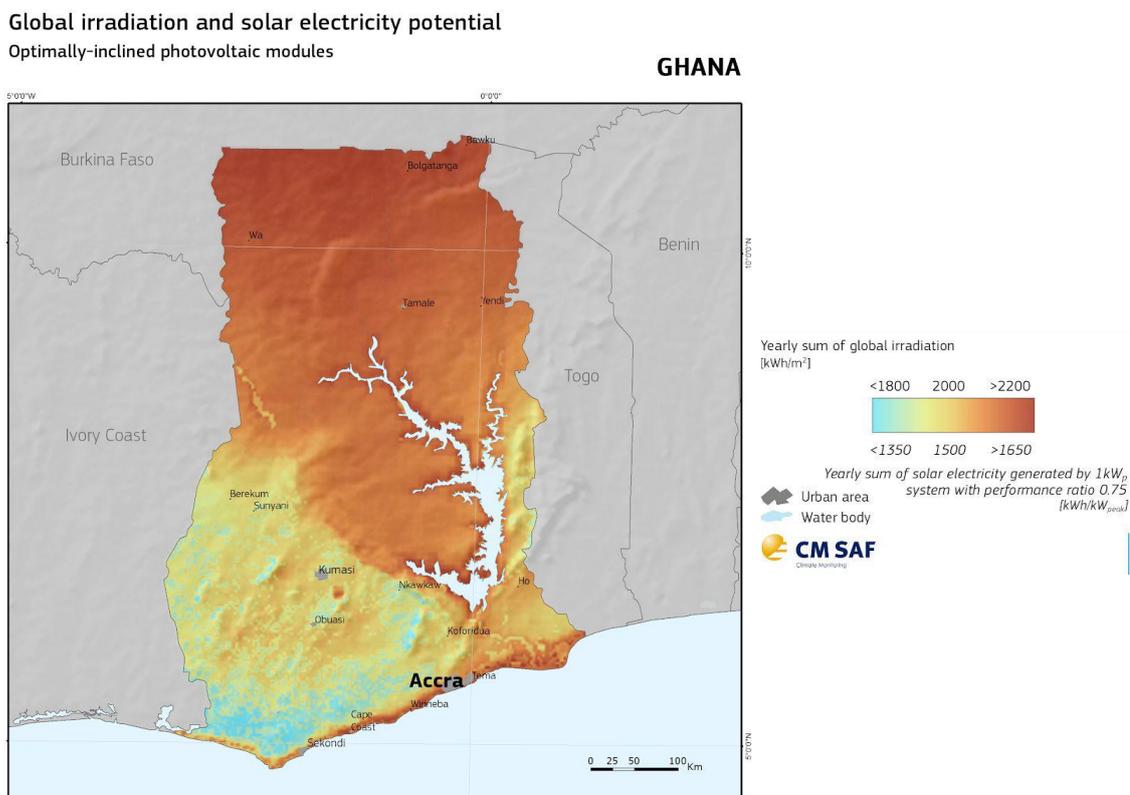


Abbildung 6: Einstrahlung und das Solarstrompotenzial Ghanas (Europäische Kommission, 2019)

Ghana bei 351 kWh pro Jahr, so dass die beschriebene Installation den Bedarf von etwa 3,8 Personen im Süden und 4,7 Personen im Norden Ghanas decken könnte (ohne Rebound-Effekt) (The World Bank Group, 2023). Bei einer durchschnittlichen Haushaltsgröße von 4,5 Personen in Ghana (Global Data lab, 2023), könnten durch dieses Second-Life-System viele Haushalte mit Strom versorgt werden. Was die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber neuen Modulen betrifft, so kosten neue Solarmodule in Ghana nach Angaben des Projektpartners Don Bosco etwa 0,34 €/Watt Peak, und es ist sehr wahrscheinlich, dass gebrauchte Module weniger als die Hälfte davon kosten werden.

- II) **Solarbetriebene Kühlsysteme:** Solarbetriebene Kühlung bezieht sich auf die Stromversorgung von Geräten wie Kühlschränken, Gefrierschränken, Ventilatoren und Klimaanlage. Sie kann zur Konservierung von Produkten oder Medikamenten/Impfstoffen in Gebieten eingesetzt werden, in denen kein oder nur ein unzuverlässiger Zugang zum Stromnetz vorhanden ist. Auch in der Landwirtschaft gibt es Anwendungsfälle, um die Verluste nach der Ernte zu

verringern. Abgelegene Gesundheitsposten und kleine Läden könnten in hohem Maße von einem solchen Solarsystem profitieren, da sie oft Dieselgeneratoren ergänzen oder sogar ersetzen können. Der Einsatz von Solarenergie ist hier besonders sinnvoll, da der Kühlbedarf direkt mit der Intensität und Häufigkeit der Sonneneinstrahlung korreliert. Eine 2-kWp-Anlage (z. B. mit 10x 200-Wp-Second-Life-Modulen) mit einer Speichereinheit kann eine kleine abgelegene Klinik unabhängig von einem Netzanschluss oder Dieselgeneratoren versorgen. Da der Platz in abgelegenen Gebieten oft keine Rolle spielt, wäre es sogar möglich, die Anlage mit Modulen von etwas geringerer Kapazität zu bauen, z. B. mit 12x 180-Wp-Modulen der zweiten Generation.

3.2.2. Anwendungsfälle für Niederspannungsnetze

Die SELV-Anwendung (Safety Extra Low Voltage) umfasst Systeme mit drei oder weniger Modulen und einer Gesamtspannung von höchstens 60 Volt, da dies eine sichere Spannung ist, die vor allem von technisch nicht versierten Personen genutzt werden kann. Für viele Geräte des täglichen Lebens reicht diese Spannung und die Kapazität der Module jedoch aus.

- I) Anwendung für die Mikromobilität:** Die Mikro-Elektromobilität revolutioniert derzeit die Art und Weise, wie sich Hunderte von Millionen Menschen in den Städten fortbewegen. Durch den Zugang zu gemeinsam genutzten Elektroleichtfahrzeugen (LEV) können Menschen direkt und schnell zwischen lokalen Zielen reisen, ohne ein Auto zu benötigen oder hohe Anfangsinvestitionen tätigen zu müssen. Allerdings sind diese Fahrzeuge, da sie elektrisch betrieben werden, auf einen regelmäßigen Zugang zum Stromnetz angewiesen, um aufgeladen werden zu können. In städtischen Gebieten sind die bürokratischen und finanziellen Hürden für die Errichtung eines Netzanschlusses für Ladestationen ein großes Hindernis für den Übergang zur Elektromobilität, während die Bereitstellung eines solchen Netzes in den meisten ländlichen Regionen kaum vorstellbar ist. Sowohl in ländlichen als auch in städtischen Gebieten könnte die Einrichtung dezentraler solarbetriebener Ladestationen die notwendige Infrastruktur bereitstellen, damit gemeinschaftlich und privat genutzte LEVs zu einem rentablen Verkehrsmittel werden. LEVs, wie z.B. E-Bikes und E-Scooter, haben eine integrierte Batterie, die mit einer Gleichspannung zwischen 36V und 42V geladen wird. Eine Standard-E-Bike-Batterie hat eine Kapazität von 500Wh und wird mit 42V 2A (84W) geladen. Ein kleines Solarsystem mit einer Leistung von 200 Wp (ein einziges Panel) könnte in 2,5 Stunden bei maximaler Sonneneinstrahlung genug Strom erzeugen, um die Batterie von 0 % auf 100 % aufzuladen, was einer emissionsfreien Fahrt von bis zu 160 km entspricht (Abbildung

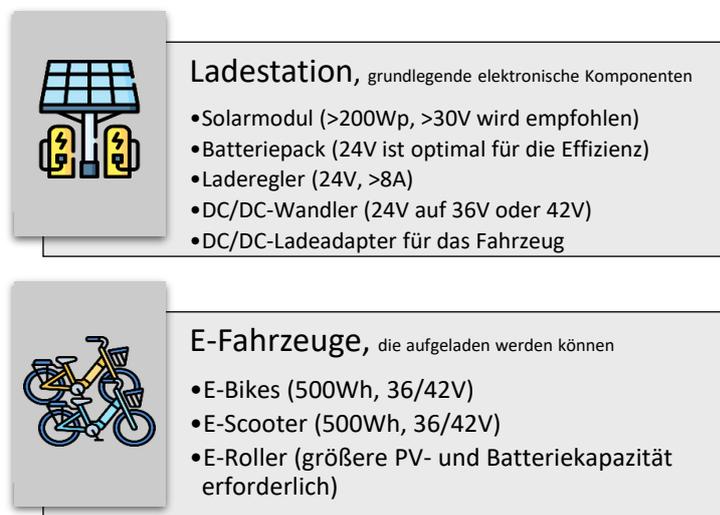


Abbildung 7: Anwendungsfälle in der Mikromobilität (eigene Darstellung)

- 7). Pro Station könnten bis zu zwei E-Bikes gleichzeitig aufgeladen werden.
- II) **Dezentralisierte Solar Home Systems:** Ein häufiger Anwendungsfall für Solarenergie in Subsahara-Afrika sind Solar Home Systems, bei denen netzunabhängige Solarsysteme zur Stromversorgung von Licht, zum Aufladen von Telefonen und sogar größeren Geräten wie Fernsehern eingesetzt werden. Besonders für Haushalte ohne oder mit unzuverlässigem Stromanschluss können diese Systeme eine große Erleichterung darstellen. Ein einzelnes Modul mit einer Restkapazität von 100 W kann beispielsweise ein "Plug&Play"-System bilden, bei dem Geräte direkt über das Modul geladen werden. Im Durchschnitt würde dies 0,4 kWh pro Tag erzeugen, was zum Aufladen von etwa 10 Smartphones pro Tag ausreicht (ein gewöhnliches Smartphone benötigt etwa 10Wh pro Ladung). Auch andere batteriebetriebene Geräte oder Powerbanks können tagsüber aufgeladen werden, um Strom für die Nacht zu speichern, wenn kein Solarstrom verfügbar ist. Falls die Spannung des verwendeten Moduls nicht mehr mit der auf dem Etikett angegebenen Spannung übereinstimmt, kann es durch Nachrüsten so verwendet werden, dass es ohne Wechselrichter funktioniert und eine Gleichspannung liefert, mit der USB-Geräte wie Telefone betrieben werden können, solange die Restspannung mindestens 5 Volt beträgt. Abgesehen von der Verwendung zu Hause kann dieser Fall auch für kleine Geschäfte genutzt werden, wo die Anzahl der aufladbaren Geräte durch Hinzufügen weiterer Solarmodule leicht skaliert werden kann.
- III) **Abgelegene Gemeinden und landwirtschaftliche Anwendungsfälle:** Abgelegene Haushalte und landwirtschaftliche Betriebe können Second-Life-PV-Module für solare Wasserpumpen und Bewässerungssysteme nutzen. Hier wird in der Regel eine Tauchpumpe eingesetzt, um Grundwasser aus unterschiedlichen Brunntiefen an die Oberfläche zu bringen. Je nach Pumpentyp, Brunntiefe und Wasserbedarf kann das System unterschiedlich dimensioniert sein (Abbildung 8). Soll die Anlage gleichstrombetrieben bleiben (mit direktem Anschluss vom Solarmodul ohne Wechselrichter), was am besten mit Second-Life-Modulen funktioniert, wird die Anwendung vergleichsweise kleiner sein. Ein System, das mit 24V betrieben wird, ist leistungsfähig genug für eine Brunntiefe von bis zu 16 Metern, was die Tiefen in vielen Gebieten Ghanas abdeckt. Das gewählte Modul sollte also entweder mindestens 24V haben, oder dies kann durch die Verbindung von zwei Modulen mit 12V oder anderen Kombinationen erreicht werden, oder es kann ein DC/DC-Wandler verwendet werden. In jedem Fall ist auch ein Laderegler mit 24V, 40A erforderlich. Das kleinste System mit einem 200-Wp-Panel kann bis zu 500 Liter pro Stunde in einer Tiefe von 1,8 m liefern. Wird die Leistung auf 500 Wp erhöht, steigt die Tiefe auf bis zu 7,6 Meter, wobei die Durchflussmenge in etwa gleich bleibt wie zuvor. Bei einem System mit 800 Wp hingegen steigen sowohl die Durchflussmenge als auch die Tiefe auf 1440 Liter pro Stunde bzw. 16,4 Meter.

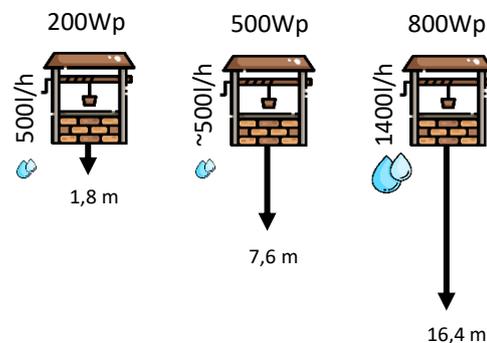


Abbildung 8: Anwendungsfälle für solare Wasserpumpen (eigene Darstellung)

Diese Optionen sind nur einige der Möglichkeiten, SELV-Solaranwendungen im kleinen Maßstab zu nutzen, aber die allgemeinen Parameter für sie sind die gleichen. Es sind weitere Anwendungen mit diesen Parametern denkbar, entweder für den kommunalen Gebrauch, für Geschäftszwecke oder für private Anwendungen, bei denen die Erschwinglichkeit und Nachhaltigkeit eines Second-Life-Moduls besonders sinnvoll ist. In beiden Szenarien werden die Anwendungsfälle durch den Einsatz von Bleisäure-Batterien der zweiten Lebensdauer zur Energiespeicherung unterstützt.

Ende von Stufe 2 als "LV-Reha" eingestuft werden, direkt in Stufe 5 überführt werden, selbst wenn Spezialausrüstung verfügbar ist. Bislang gibt es keinen internationalen oder nationalen Wiederverwendungsstandard für Solarmodule. Der vorliegende Leitfaden basiert auf den Erfahrungen der Firma SunCrafter bei der Bewertung und Sanierung von Solarmodulen sowie auf Literaturrecherchen und Experteninterviews und der Erstellung eines firmeneigenen Qualitätsstandards. Das Verfahren ist an die zu erwartenden Umstände vor Ort im Don Bosco Solar and Renewable Energy Centre in Tema, Ghana, angepasst.

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Stufen des entwickelten Bewertungsprozesses näher beschrieben.

Stufe 1: Visuelle Prüfung

In der ersten Stufe des Prozesses werden die Module zunächst durch visuelle Inspektion auf ihre allgemeine Eignung für eine Anwendung im zweiten Leben geprüft. Bestehen die Module diese Prüfung, gehen sie zum nächsten Schritt über, andernfalls werden sie dem Recycling zugeführt. Bestimmte Fehler führen dazu, dass das Modul direkt "recycelt" werden muss, da sie entweder die Leistung grundlegend beeinträchtigen oder ein Sicherheitsrisiko bei Inbetriebnahme darstellen. Module sollten dem direkten Recycling zugeführt werden, wenn sie einen der folgenden Mängel aufweisen:

- Bruch oder Riss im Frontglas,
- Brandflecken auf den Frontzellen, den Lötstellen, Leiterbahnen, Stromschiene, in der Nähe oder direkt auf der Anschlussdose,
- Verformung oder Aufblähung der Anschlussdose.

Eine ausführliche Darstellung mit visuellen Hilfsmitteln zur Überprüfung von Modulen ist im Anhang dieses Berichts beigefügt.

Stufe 2: Inspektion und Reparatur (Hoch- oder Niederspannung)

Im zweiten Schritt des Prozesses werden die Module, die die Sichtprüfung erfolgreich bestanden haben, weiter untersucht, gegebenenfalls repariert und in zwei Kategorien eingeteilt: HV-fähige und LV-fähige Module. Diese weitere Segmentierung führt zu einem komplexeren Prozess, bietet aber zwei wesentliche Vorteile:

- 1) Es wird sichergestellt, dass die Module in den Anwendungsfällen eingesetzt werden, für die sie ideal sind, d. h. das Gleichgewicht zwischen finanzieller Tragfähigkeit und technischer Machbarkeit wird optimiert.
- 2) Durch die Einbeziehung der Niederspannungskategorie wird die Qualitätsschwelle für die Module gesenkt und damit der Anteil der Module erhöht, die erfolgreich saniert werden können, was wiederum die Kosten pro saniertem Modul senkt.

Die Inspektion und Reparatur werden für einzelne Komponenten im Folgenden näher betrachtet.

Rahmen: Die Optionen in der Sanierungsphase hängen u.a. vom Schweregrad der Verbeulung oder Verformung des Rahmens ab. In der Regel kann der Rahmen repariert werden, indem er mit Silikon wieder aufgeklebt wird. So wird sichergestellt, dass an der Schadstelle keine Feuchtigkeit eindringen kann. Bei Unsicherheit, ob der Rahmen mit dieser Methode repariert werden kann, sollte das Modul dem Recycling zugeführt werden.

Rückseite: Viele Mängel, die auf der Rückseite des Moduls auftreten, können repariert werden, so dass das Modul wiederverwendet werden kann (Abbildungen 10 und 11). Wenn die Folie aufgebläht ist, muss die Blase aufgeschnitten, geglättet und mit einer EVA-Reparaturfolie mit einer Hitzebeständigkeit von bis zu 95°C repariert werden. Dasselbe gilt, wenn die Folie Kratzer oder Risse aufweist. Dies ist wichtig, damit keine Feuchtigkeit in die Zellen eindringen kann. Ist auf der Rückseite eine "Vergilbung", d.h. eine Verfärbung der Folie, sichtbar, sind die Zellen nicht betroffen, so dass das Modul weiterhin verwendet werden kann. Da dies aber darüber hinaus ein Anzeichen dafür ist, dass sich der Temperaturkoeffizient verändert hat, sollten die Module eher in einem Schutzkleinspannungsszenario verwendet werden.



*Abbildung 10: Blasen unter der Rückseitenfolie
(MoNaL Team, 2021)*



*Abbildung 11: Löcher und Blasen auf der Rückseite
(MoNaL Team, 2021)*

Kabel: Wenn die Kabel beschädigt sind, sollten sie mit Hilfe einer Zange durch normale MC4-Kabel und MC4-Stecker ersetzt werden. Selbst wenn sie nicht beschädigt sind, würde es die Kompatibilität erhöhen, die Kabel an allen Modulen auszutauschen, die wieder in Betrieb genommen werden sollen. Dies ist jedoch nicht unbedingt erforderlich.

Anschlussdose: Ein kritischer Punkt ist die Anschlussdose. Wenn sie verbeult, verformt, aufgebläht, verbrannt oder anderweitig beschädigt ist, sollte das Modul dem Recycling zugeführt werden. Wenn die Anschlussdose jedoch von außen unversehrt aussieht, kann sie geöffnet und auf Schäden im Inneren untersucht werden. Sind die Leiterbahnen verbrannt, sollte das Modul recycelt werden, da die Reparatur nicht wirtschaftlich ist. Wenn sie jedoch gut angeschlossen und die Dioden vollständig und nicht verbrannt sind, dann kommt es für eine HV-Sanierung in Frage. Wenn die Dioden in irgendeiner Weise beschädigt sind, sind sie gegen Standard-Schottky-Dioden auszutauschen. In diesem Fall können die Module nicht mehr in einem Standard-Stringsystem mit einer Spannung von mehr als 60 Volt verwendet werden. Sie können als NS-fähige Module verwendet werden.

Um die Gesamtkosten zu senken, können Module, die am Ende von Stufe 2 als "NS-Reha" eingestuft werden, direkt in Stufe 5 überführt werden, auch wenn eine spezielle Ausrüstung vorhanden ist.

Stufe 3: Kontrolle der Zellen

Um ein Solarmodul für höhere Spannungen und den Netzanschluss zu sanieren, sind genauere Messungen erforderlich. Zwei Tests werden empfohlen, bevor ein Solarmodul für höhere Spannungen eingesetzt wird: Elektrolumineszenzprüfung und Flash-Test. Beide Tests erfordern eine spezielle Ausrüstung, wie eine Blitzlichtkamera, eine Lampe und einen Elektrolumineszenz-Scanner.

Elektrolumineszenzprüfung: Durch diesen Test lässt sich mit Hilfe eines "Röntgenbildes" der physikalische Zustand der Waferzellen erkennen. (Mikro-)Risse, die mit dem Auge nicht sichtbar sind, können so erfasst werden (Abbildung 12). Dies hat große Auswirkungen auf die Sicherheit eines Hochspannungs-Stringsystems, da wechselnde Witterungsbedingungen die Risse im Laufe der Zeit verstärken können.

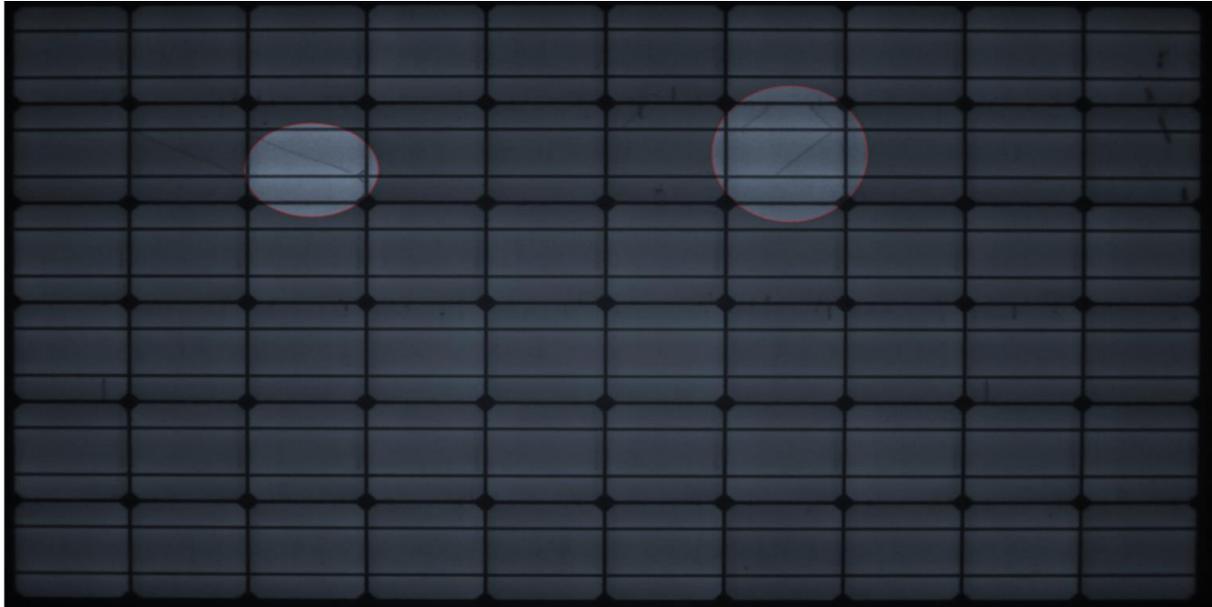


Abbildung 12: Elektrolumineszenzfoto eines Moduls mit Mikrorissen (MoNaL Team, 2021)

Stufe 4: Flash-Test

Dieser Test zeigt die tatsächliche Restkapazität des verwendeten Moduls. Dies kann darauf hinweisen, ob es weitere unentdeckte Defekte im Modul gibt, z.B. wenn die Spannung viel niedriger ist als erwartet. Auch ist diese Prüfung sinnvoll, um die Wirtschaftlichkeit eines Moduls zu bewerten, da die Leistungsdichte im Vergleich zu neuen Modulen dafür ein entscheidender Faktor ist. In einem Hochspannungseinsatzfall ist es notwendig, dass die Module in einem String so homogen wie möglich sind, um eine maximale Leistung zu erzielen. Ein Modul mit geringerer Kapazität beeinträchtigt die Leistung des gesamten Strings. Auch für den Verkauf der Module, ob für Hoch- oder Niederspannung, ist eine Kapazitätsangabe wichtig. So kann das Modul pro Wattleistung bepreist werden, statt eines Pauschalpreises, der für die Käufer weniger attraktiv wäre.

Stufe 5: Elektrische Prüfung und abschließende Sortierung

Bei den NS-fähigen Modulen erfolgt eine elektrische Prüfung, um festzustellen, ob das Modul die erwartete Leistung liefert. Im Idealfall hat das Modul eine Kennzeichnung des Originalherstellers auf der Rückseite, so dass bekannt ist, wie hoch die erwartete Spannung und Stromstärke sein sollte. Wenn das Modul nicht über eine Etikettenangabe verfügt, sollte ein Modul ähnlicher Bauart (Höhe, Breite, Gewicht, Zellenzahl, Aussehen) zum Vergleich mit diesen Parametern gefunden werden.

Damit die Messung genau ist, muss die Vorderseite zunächst von Schmutz, Staub, Moos oder anderen Verunreinigungen befreit werden. So kann die maximale Menge an Sonnenlicht absorbiert werden. Dann wird das Modul mit der Vorderseite in einem 90°-Winkel zum direkten Sonnenlicht aufgestellt. Zunächst wird die Spannung mit einer Gleichstrommesszange und einem Voltmeter gemessen. Ist die Nennspannung (V_{mp}) deutlich geringer als auf dem Originaletikett ($\frac{1}{2}$ weniger als auf dem Etikett), besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit für einen Diodenschaden. In diesem Fall sollten alle Dioden gegen Standard-Schottky-Dioden ausgetauscht werden und das Modul nicht mehr in einem Hochspannungsszenario verwendet werden. Wenn die Spannung nach dem Diodentausch und einer erneuten Messung immer noch zu niedrig ist, sollte überprüft werden, ob alle Dioden korrekt

eingesetzt sind. Wenn alle Anschlüsse intakt sind und die Spannung immer noch zu niedrig ist, liegt das Problem wahrscheinlich bei den Stromschienen. Dann ist die ursprüngliche Spannung nicht wiederherzustellen und das Modul kann nicht weiter repariert werden. In diesem Fall kann das Modul immer noch in einem Niederspannungsszenario verwendet werden, zum Beispiel zum Laden von USB-Geräten.

Anschließend wird der Kurzschlussstrom (I_{sc}) ebenfalls mit dem Gleichstrommessgerät gemessen. Auch hier sollte der Kurzschlussstrom in etwa so hoch sein wie auf dem Etikett angegeben. Ist dies nicht der Fall, sollte das Frontglas erneut überprüft werden (frei von Schmutz, Front in einem 90°-Winkel direkt auf das Sonnenlicht gerichtet). Wenn die erneute Messung immer noch nicht den korrekten Kurzschlussstrom anzeigt, liegt wahrscheinlich ein Defekt an der Stromschiene oder ein gebrochener Wafer vor. Eine Verwendung des Moduls ist nicht empfehlenswert und es sollte recycelt werden.

Nach Abschluss der Prüfung sollten die zur Wiederverwendung geeigneten (HV- und LV-) Module mit den gemessenen elektrischen Parametern gekennzeichnet und nach Abmessungen, Typ und elektrischen Parametern sortiert werden. Da die HV-Anwendungsfälle eine Homogenität der Module erfordern, werden die HV-fähigen Module in dem üblichen Bereich von $\pm 2\%$ gestapelt, in dem neue Module geliefert werden. NS-Module können weniger streng gestapelt werden, aber aus Gründen einer fairen Preisgestaltung mit einer Spanne von nicht mehr als 5 % \pm des Referenzmoduls. Detaillierte Anleitungen zu diesen Schritten sind im Anhang dieses Dokuments enthalten.

3.3. Recycling: Fachgerechte Entsorgung von Elektroschrott

Nahezu 80 % der weltweiten PV-Anlagen wurden erst in den letzten fünf Jahren installiert (IEA 2021). Dieser Trend wird sich angesichts der derzeitigen jährlichen Wachstumsrate von 25-30 % für neue PV-Anlagen voraussichtlich fortsetzen (IEA 2021). Zwei wesentliche Motive dafür dürften der politische Wille zur Dekarbonisierung des Energiesystems (IEA, 2021) und die sinkenden Kosten für PV-Module sein (Wirth 2022). Die daraus resultierende große Menge an Altgeräten aus PV-Modulen stellt jedoch eine große ökologische Bedrohung dar. Daher ist ein sauberes End-of-Life-Management von PV-Modulen für ein weiteres nachhaltiges Wachstum des Sektors unerlässlich.

Das MoNaL-Projekt hat in Zusammenarbeit mit der Reiling GmbH und Electro Recycling Ghana Limited (ERG), einem EPA-zertifizierten Recyclingunternehmen aus Ghana, den Recyclingprozess für PV-Solarmodule skizziert. In einem Experteninterview mit der Reiling GmbH wurden detaillierte Informationen über den Stand der Technik von Si-PV-Recyclingprozessen in der Praxis eingeholt. Das gleiche Verfahren soll in Ghana von weiteren Firmen (wie Electro Recycling Ghana Limited) nachgebaut werden. Im Folgenden wird ein Überblick über den Prozess gegeben.

Zum Verständnis der verschiedenen Recyclingverfahren für Si-PV-Module werden zunächst die Hauptkomponenten eines Si-PV-Panels und die für jede Komponente verwendeten Materialien sowie ihre Gewichtsanteile näher betrachtet.

Hauptkomponenten eines PV-Moduls und verwendete Materialien

Die verwendeten Materialien und Hauptfunktionen der Komponenten eines Si-PV-Moduls sind im Folgenden aufgeführt (Abbildung 13):

- **Aluminiumrahmen:** Der Rahmen besteht mit Ausnahme der Legierung aus Aluminium. Er spielt eine entscheidende Rolle, da er zum einen die Kante des Laminatabschnitts, in dem die

Zellen untergebracht sind, schützt. Zum anderen bietet er eine solide Struktur für die Befestigung des Solarmoduls in seiner Position.

- **Glas:** Bei den Komponenten aus Glas handelt es sich in der Regel um hochfestes, gehärtetes Glas mit einer Dicke von 3,0 bis 4,0 mm. Es ist so konzipiert, dass es mechanischen Belastungen und extremen Temperaturschwankungen standhält.
- **EVA:** "Ethylenvinylacetat", eine speziell entwickelte, hochtransparente Polymerschicht (Kunststoff), die die Zellen Einkapselt und während der Herstellung in Position hält.
- **Solarzellen:** Photovoltaik-Solarzellen oder PV-Zellen wandeln Sonnenlicht direkt in elektrische Gleichstromenergie um. Die Basis der PV-Zelle ist ein sehr dünner Silizium-Wafer, in der Regel 0,1 mm dick. Der Anteil von Silizium in der Solarzelle liegt i.d.R. bei über 90 %. Ein sehr geringer Anteil besteht aus Zinn, Blei und Silber.
- **Rückseitenfolie:** Die Rückseitenfolie besteht aus verschiedenen Polymeren oder Kunststoffen wie PP, PET und PVF, welche unterschiedliche Schutzniveaus, thermische Stabilität und langfristige UV-Beständigkeit bieten.
- **Anschlussdose:** Die Anschlussdose besteht aus Kunststoff und enthält Kabel, die mit Kupfer versehen sind. Sie ist der zentrale Punkt, an dem alle Zellsätze miteinander verbunden werden.

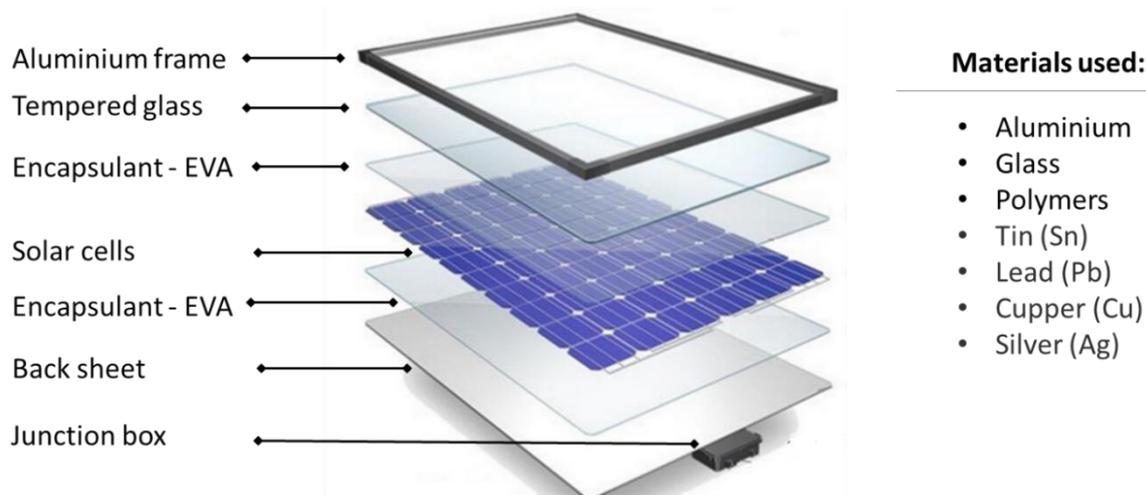


Abbildung 13: Hauptbestandteile von Si-PV-Paneelen und verwendeten Materialien (Eigene Darstellung basierend auf Svarc, 2020).

Gewichtsanteile der Materialien bei Si-PV-Panels

Nach dem Überblick über die verwendeten Komponenten und ihre Funktionsweise werden im Folgenden die Gewichtsanteile der Materialien untersucht. Diese spielen in vielen Ländern eine wichtige Rolle, um ggf. gesetzlichen Anforderungen für das Recycling zu erfüllen.

Abbildung 14 zeigt den Anteil der einzelnen Materialien am Gesamtgewicht der Module und in welchem Teil des Moduls die Materialien verwendet werden. Der genaue Materialanteil, welcher für eine Platte verwendet wird, variiert von Hersteller zu Hersteller. Ein marktübliches Beispiel auf der Grundlage der Daten von Tao et al. ist in Abbildung 14 dargestellt (Tao et al. 2020). Aluminium wird dabei als Leichtmetall getrennt von Metallen wie Silber oder Kupfer betrachtet, welche für Solarzellen bzw. Kabel verwendet werden.

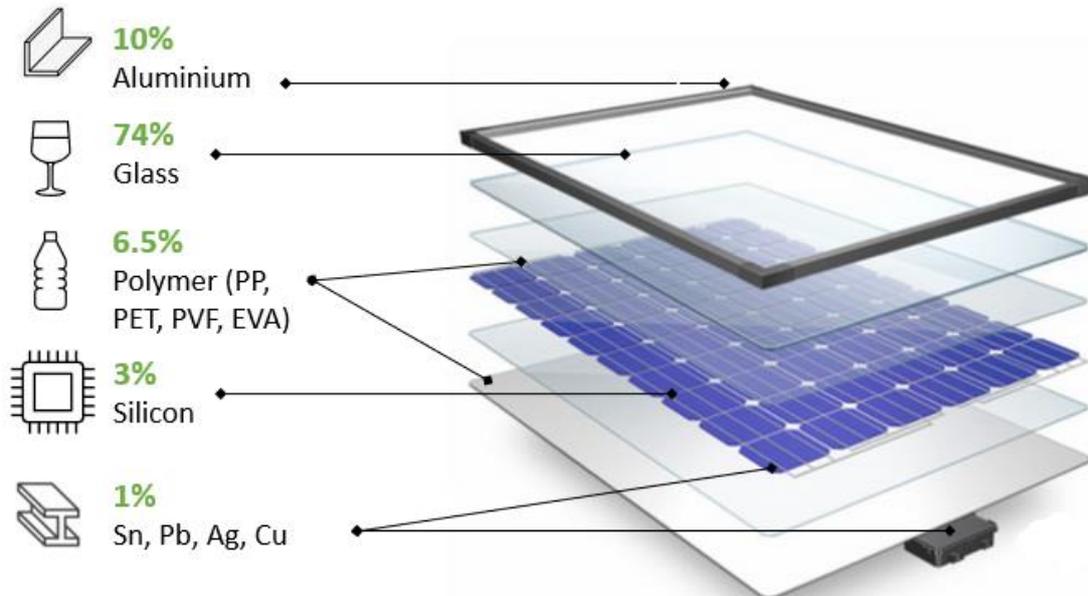


Abbildung 14: Materialien, die für ein PV-Paneel verwendet werden, und ihr Beitrag zum Gesamtgewicht (Eigene Darstellung basierend Svarc, 2020).

3.3.1. Leitlinien für das Recycling von gebrauchten PV-Modulen

3.3.1.1. Recyclingprozesse für Si-PV-Module unter Laborbedingungen

Basierend auf einer Literaturrecherche werden in Tabelle 2 verschiedene Typen bzw. Darstellungsweisen von Recyclingprozessen dargestellt.

<u>Autoren</u>	<u>Auslegung Recyclingprozess</u>
Chowdhury et al. (2020)	Unterteilung der Recyclingprozesse in die angewandten Prozesstypen: <ul style="list-style-type: none"> • Physikalisch • Thermisch • Chemisch
D'Adamo, Miliacca, and Rosa (2017)	Gliederung der Prozesse für PV-Paneele in verschiedene Verfahrensschritte: <ul style="list-style-type: none"> • Mechanische, chemische oder thermische Entlaminierung • Chemische Entschichtung • Chemische Extraktion/Raffinierung
Tsanakas et al. (2020)	Klassifizierung der Prozesse nach dem Wert der zurückgewonnenen Materialien: <ul style="list-style-type: none"> • "Massenrecycling" (Rückgewinnung von Materialien mit hohem Massenanteil, z. B. Glas, Aluminium, Kupfer und thermische Verwertung der Rückstände) • "Hochwertiges Recycling" (Rückgewinnung fast aller Materialien, einschließlich Halbleiter und Edelmetalle)

<p>Tao et al. (2020)</p>	<p>Definieren Recycling inkl. Aufarbeitung und Wiederverwendung von Abfallmodulen oder -komponenten, Kategorisieren drei mögliche Recyclingszenarien für alte Si-Module:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aufarbeitung und Wiederverwendung von Abfallmodulen • Extraktion und Wiederverwendung von Komponenten aus Abfallmodulen • Gewinnung und Wiederverwendung von Materialien aus Altmodulen.
---------------------------------	---

Tabelle 2: Auslegung Recyclingprozesse in der Literatur

Abbildung 15 zeigt ein modernes Recyclingverfahren, das auf einem neu entwickelten Laborverfahren von Fraunhofer basiert (Fraunhofer ISE, 2022).

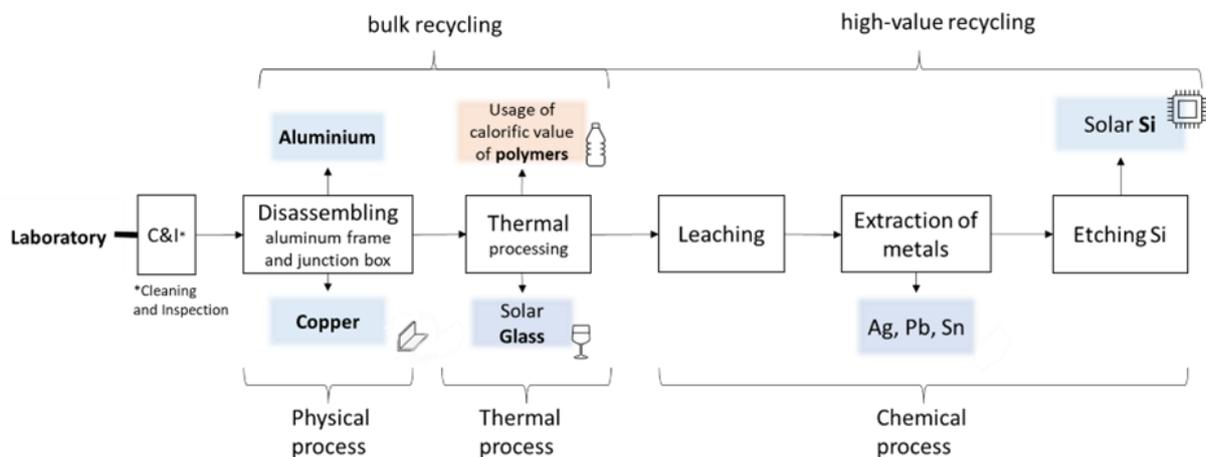


Abbildung 15: Laborverfahren zum Recycling von Si-PV-Modulen (Eigene Darstellung)

Nachdem das Paneel gereinigt und inspiziert wurde, werden der Rahmen und die Kabelbox mechanisch entfernt (physikalischer Prozess). Der restliche Teil des Paneels wird erhitzt, sodass das EVA und die Rückwandfolie verbrennen. So kann das Solarglas zurückgewonnen werden (thermischer Prozess). Nach diesem Prozess bleiben nur noch die Solarzellen übrig. Diese werden in ein chemisches Bad gelegt und ermöglichen die Extraktion der Reststoffe (chemischer Prozess). Wertvolle Metalle wie Silber können so extrahiert werden. Am Ende des Prozesses kann gereinigtes Silizium gewonnen werden, welches für neue Solarzellen verwendet werden kann.

3.3.1.2. Recycling von Si-PV-Modulen in der Praxis

Auf Grundlage der Recherchen und Gespräche mit Vertretern der Reiling GmbH wurde Abbildung 16 erstellt. Zur Veranschaulichung der oben genannten Kategorisierungen wird der Prozess in folgende Kategorien eingeteilt:

1. Wert der zurückgewonnenen Materialien und
2. Prozessarten

Im Gegensatz zu dem im Labor entwickelten Verfahren haben Experteninterviews mit Recyclingunternehmen wie PV-CYCLE oder der Reiling GmbH ergeben, dass in der Praxis keine hochwertigen Materialien wie Silizium, Silber, Blei oder Zinn aus den Recyclingprozessen gewonnen werden. Da die hydrochemischen Verfahren noch nicht rentabel sind und zudem aufgrund des Wasserbedarfs und der anfallenden Chemieabfälle eine schlechte Umweltbilanz aufweisen, reduziert sich der derzeitige Stand der Technik in der Branche auf das Massenrecycling. Gemäß der in Deutschland geltenden Auslegung der WEEE-Richtlinie werden über 85% der Materialien recycelt (§ 22, Para. 1 ElektroG). Die Abfallverwertungsquote in Deutschland soll 100% betragen und kann durch die Einbeziehung der thermischen Verwertung erfüllt werden. Abbildung 16 zeigt ein Beispiel für den Prozess der Reiling GmbH, welcher in den folgenden Abschnitten näher beschrieben wird.

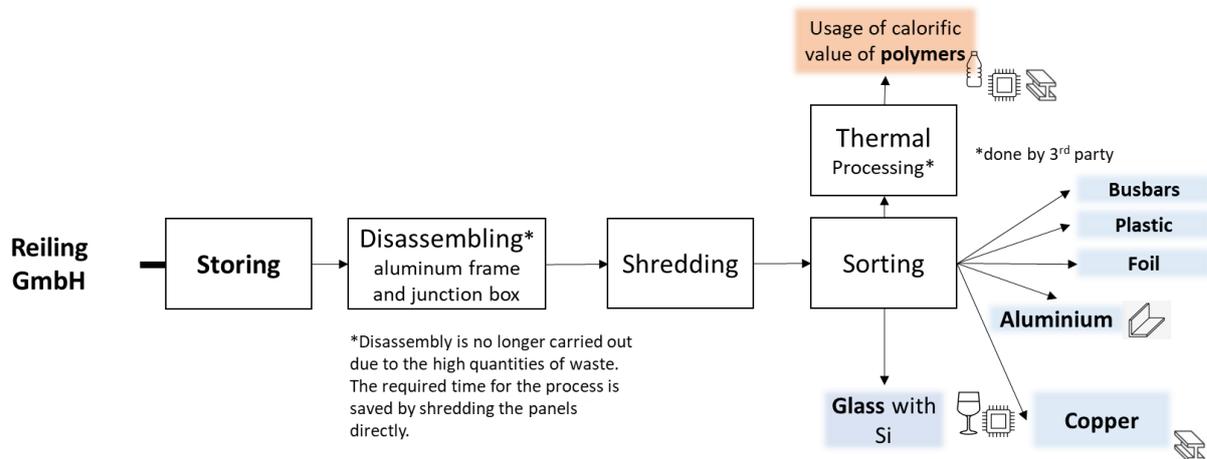


Abbildung 16: PV-Modell-Recyclingverfahren der Reiling GmbH (eigene Darstellung)

Lagerung:

Da der recycelbare Anteil je nach Typ und Zustand des PV-Moduls unterschiedlich ist, werden sie vorsortiert, gestapelt und gelagert (Abbildung 17).



Abbildung 17: Gelagerte und gestapelte PV-Module vor der Demontage (Bild: Reiling GmbH)

Demontage:

Die gelagerten Module, die noch im Ganzen vorliegen, werden im nächsten Prozessschritt von zwei Personen geprüft. Die aus der Kabel Box kommenden Kabel werden abgeschnitten, das Modul wird auf ein Tablett gehoben und für die Demontage positioniert (Abbildung 18). Die Kabel Box und der Rahmen des PV-Moduls werden maschinell entfernt. Nach der Trennung werden die Einzelteile von

den Mitarbeitenden sortiert und der Vorgang kann wiederholt werden. Die Maschine verarbeitet ein Modul nach dem anderen, sodass ein Prozessdurchlauf dauert etwa zwei bis drei Minuten.

Da die Menge der zu recycelnden PV-Module stark zugenommen hat, ist dieser Prozess aus Zeit- und damit Kostengründen nicht mehr durchführbar. Derzeit werden die Module im Ganzen geschreddert.



Abbildung 18: PV-Module werden für die Demontage in Position gebracht (Bild: Reiling GmbH)

Zerkleinerung:

Wie beschrieben kann es durch zu geringe Kapazitäten dazu kommen, dass der Prozessschritt "Demontage" entfällt. In diesem Fall werden die PV-Module in diesem Schritt direkt zerkleinert. Die Module werden in einen mobilen oder festen Shredder gehoben und zerkleinert (Abbildung 19). Das Ergebnis dieses Prozesses sind die zerkleinerten Module, welche in Abbildung 20 zu sehen sind. Grobe Teile wie die Stromschienen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. 21**) bleiben übrig und müssen in einem nächsten Prozessschritt aussortiert werden.



Abbildung 19: Paneele werden in einen Schredder gehoben (Bild: Reiling GmbH)



Abbildung 21: Stromschiene als Teil des geschredderten Materials (Bild: MoNaL-Team, 2022)



Abbildung 20: Geschredderte PV-Module (Bild: MoNaL-Team, 2022)

Sortierung: Das zerkleinerte Material wird anschließend verschiedenen Sortierprozessen unterzogen, beispielsweise einem optischen Sortierverfahren oder einem Wirbelstromabscheider. Die Materialien werden dann in die folgenden Fraktionen getrennt:

- Aluminium
- Kupfer
- Glas mit geringen Anteilen von Silizium, Silber, Zinn und Blei (Abbildung 22)
- Folie
- Stromschienen
- Kunststoff (z. B. Teile der Verteilerdose)
- Polymere mit geringen Anteilen von Silizium, Silber, Zinn und Blei.



Abschließend werden die recycelten Materialien verkauft. Ein künftiges Ziel ist es, die Materialien in

Abbildung 22: Recyceltes und sortiertes Glas (Bild: MoNaL Team, 2022)

Bestandteile zu zerlegen, aus denen Silizium und Silber zurückgewonnen werden können. Derzeit ist dies aus wirtschaftlichen (und damit verbundenen technischen) Gründen noch nicht möglich. In Abbildung 23 ist der Aufbau einer Pilotanlage dargestellt, in der die Prüfung, Sortierung und das Recycling von PV-Solarmodulen durchgeführt werden können.

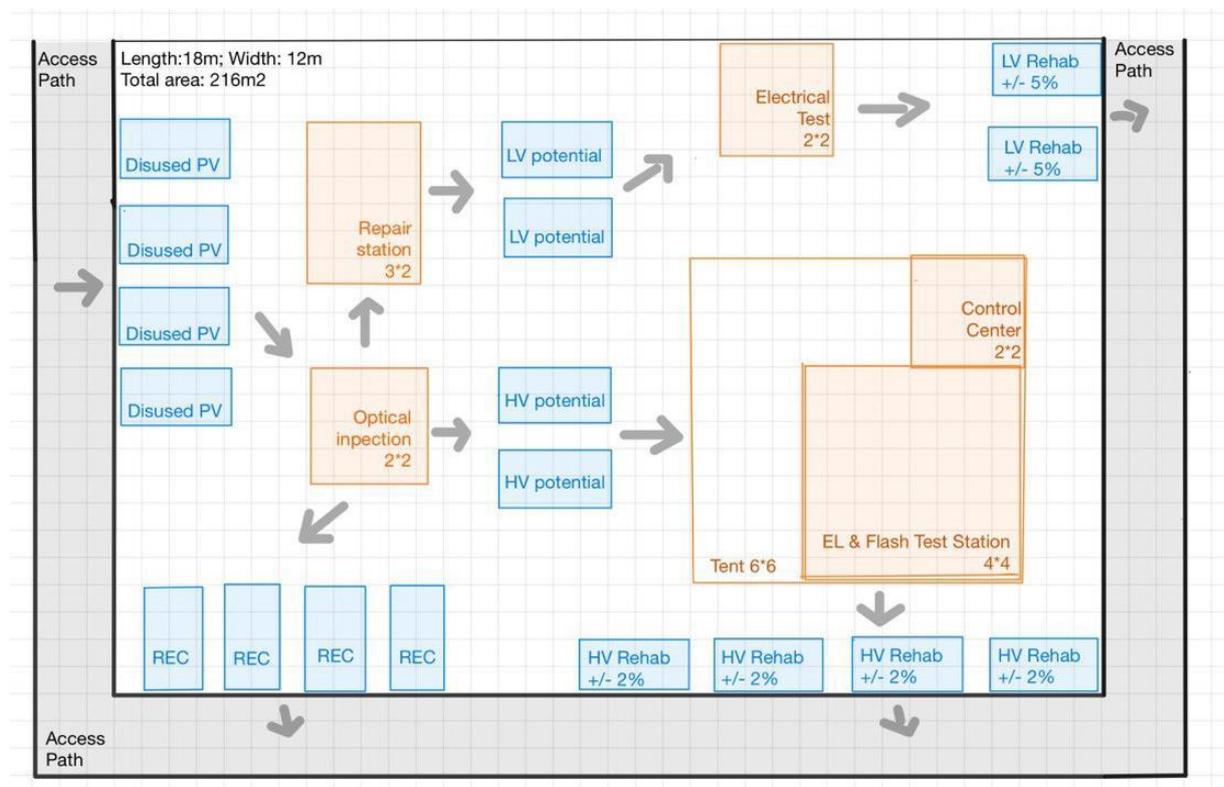


Abbildung 23: Anlagenlayout für die Prüfung von PV-Solarmodulen (Suncrafter GmbH)

3.3.2. Leitlinien für das Recycling von Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Batterien

Vor dem Hintergrund der Verwendung von Bleisäure- und Lithium-Ionen-Batterien als Energiespeicher für Anwendungen im MoNaL-Projekt wurde der Prozess für die Endverwertung dieser Technologien analysiert. Informationen über das Ende der Lebensdauer von Blei-Säure-Batterien erweist sich als wesentlich, da sie in Ghana nach wie vor das am häufigsten verwendete Energiespeichermedium sind. Lithium-Ionen-Batterien gewinnen an Bedeutung und werden aufgrund ihrer Verwendung in leichten Elektrofahrzeugen auf dem Campus mitberücksichtigt. Die im folgenden beschriebenen Standards und Prozesse können als Leitlinie für das Recycling von Bleisäure- und Lithium-Ionen-Batterien dienen. Gemeinsam mit dem Projektpartner Ingenieure ohne Grenzen führte das MoNaL-Projekt dazu Schulungen auf dem Campus des Don Bosco Solar and Renewable Energy Centre in Ghana durch.

Im Folgenden wird ein Überblick über die Leitlinien gegeben, wobei die ausführlichen Präsentationen im Anhang dieses Dokuments beigefügt sind.

3.3.2.1. Recycling von Blei-Säure-Batterien

Die Grundbestandteile einer Standard-Bleisäurebatterie sind die Bleikathode und -anode, die Säurelösung (Schwefelsäure) und das Polymergehäuse (Abbildung 24). Das End-of-Life-Management beginnt mit der Sammlung verbrauchter Batterien, der Entwässerung der Säure, dem Zerschneiden der Batterie, der Gewinnung von Bleischrott und dem Schmelzen von Bleibarren zur Gewinnung des wirtschaftlichen Werts (Abbildung 25). Da Blei giftig ist und in Ghana keine Einrichtungen zur Verfügung stehen, die diese Prozesse vollständig durchführen können, wird empfohlen, verbrauchte Batterien an registrierte Sammler für den Export im Rahmen des Basler Übereinkommens zu übergeben.



Abbildung 24: Standard Blei-Säure Batterie

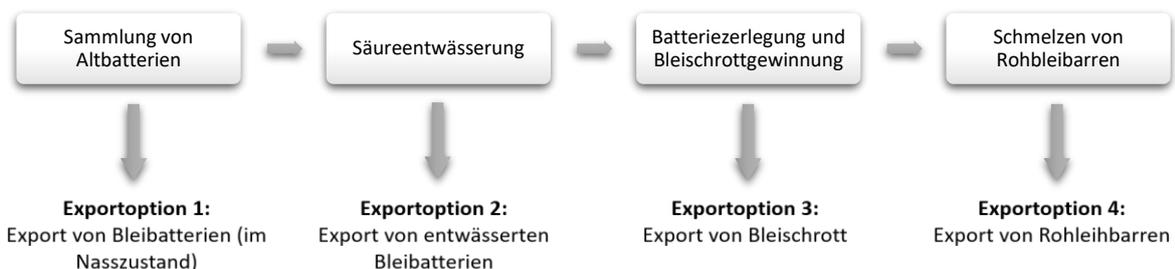


Abbildung 25: Flussdiagramm für die stoffliche Verwertung von Bleibatterien (eigene Darstellung)

Das MoNaL-Projekt und seine Partner haben Unternehmen für die Sammlung von LABs in Ghana ermittelt. Eine Liste von Firmen und Akteuren, die von der ghanaischen Umweltschutzbehörde gemäß dem ghanaischen Gesetz 917 über die Kontrolle und Verwaltung gefährlicher und elektronischer Abfälle für derartige Aktivitäten zugelassen sind, ist ebenfalls unten aufgeführt (Tabelle 3).

Firmenname	E-Mailadresse	Telefonnummer	Website
Zeal Environmental Technologies	info@zealenvironmental.com	+233 31 20 322153	http://www.zealenvironmental.com/
Presank Enterprises	info@presank.com	+233 24 477 5828	http://www.presank.com/
Closing the Loop	info@closingtheloop.eu	+31 20 75 26 506	https://www.closingtheloop.eu/

Zoomlion Ghana Ltd	info@zoomlionghana.com	+233 24 433 5140	https://zoomlionghana.com
Jekora Ventures Ltd	info@jekoraventures.com	+233 28 967 3514	https://jekoraventures.com/
Neweco	info@ghana-ewaste.com	+233 54 310 4082	https://www.ghana-ewaste.com/
Caritas Ghana	info@caritas-ghana.org	+233 30 701 0368	https://www.caritas-ghana.org/

Tabelle 3: Auswahl formeller Recyclingunternehmen in Ghana

3.3.2.2. Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

Verglichen mit vorherigen Batterietechnologien, sind Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) komplexer und anfälliger für Fragen der Sicherheit. LIBs bestehen aus organischen Elektrolyten, die volatil und brennbarer sind, sowie feine feste Partikel, z.B. Graphit und Metalloxid, die nach dem Austreten zu Brand- und Verschmutzungsrisiken führen können (Sojka et al., 2020). Dies erfordert eine besonders vorsichtige Handhabung und Verarbeitung. Da das Marktvolumen für Lithium-Ionen-Batterien weiterwächst, steigt auch der Bedarf nach einem effektiven, sicheren und umweltfreundlichen End-of-Life-Prozess. Der flächendeckende Einsatz von LIBs ist noch nicht weit verbreitet, weshalb sich auch die EoL-Behandlung noch in einem frühen Stadium befindet.

Lithium-Ionen-Batterien bestehen typischerweise aus mehreren Lithium-Ionen-Zellen, die in ein Modul integriert werden (Deng, 2015). Normalerweise besteht eine Lithium-Ionen-Zelle aus einer Kathode (positive Elektrode) und einer Anode (negative Elektrode) (Deng, 2015). Die Kathode und die Anode werden über einen Lithium-Ionen-haltigen Elektrolyten verbunden. Des Weiteren werden die Elektroden mittels eines Separators geteilt, was den Austausch von Lithiumionen ermöglicht und gleichzeitig den Austausch der Elektronen verhindert (Deng, 2015).

Die verschiedenen LIB-Technologien unterscheiden sich hauptsächlich durch das verwendete Material für die Kathode. Die am häufigsten verwendeten Kathodenmaterialien nach Baum et al. (2022) sind in Tabelle 4 dargestellt.

Batteriechemie		Eigenschaften
LCO	Lithium-Kobalt-Oxid	- Enthalten zumeist Kobalt (bis zu 25 %)
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid	- Hohe Energiedichte
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid	- Hoher Preis - Meistens in mobilen Anwendungen (tragbare Elektronik, Elektrofahrzeuge) verwendet
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat	- Kein Kobalt (0%) - Geringere Energiedichte - Niedrigerer Preis
LMO	Lithium-Mangan-Oxid	- Hauptsächlich in stationären Stromspeichern, Elektrobussen und Elektrofahrzeugen mit geringerer Reichweite verwendet

Tabelle 4: Verbreitete Arten von LIB basierend auf Manhart et al., 2022, p. 26.

Zu den Materialien, die zur Herstellung der Anode verwendet werden, gehören demnach metallisches Lithium, graphitischer Kohlenstoff, harter Kohlenstoff, synthetischer Graphit, Lithiumtitanat, zinnbasierte Legierungen und siliziumbasierte Materialien (Mishra et al., 2018, S. 183). Die als Elektrolyte verwendeten lithiumbasierten Materialien sind LiPF₆, LiClO₄, LiAsF₆ und LiCF₃SO₃ (Mishra et al., 2018). In der Regel wird der höchste Wert beim Recycling der Kathode erzielt (Baum et al., 2022).

3.3.2.3. *Stand der Technik des Recyclingprozesses*

Verfahren für das Recycling verbrauchter LIBs befinden sich noch in der Entwicklung. Derzeit gibt es drei Wege des Recyclings für LIBs: das hydrometallurgische Verfahren, das pyrometallurgische Verfahren sowie ein direktes, physikalisches Recyclingverfahren. Darüber hinaus behandeln einige Recycler die verbrauchten LIB nur vor und produzieren eine "schwarze Masse" aktiver Materialien, die an ein anderes Recyclingunternehmen für ein pyrometallurgisches oder hydrometallurgisches Verfahren verkauft wird (Sommerville et al., 2021).

Laut Baum et al. (2022) sind derzeit 32 Großanlagen weltweit zur Durchführung dieser Recyclingverfahren entweder bereits errichtet oder geplant. Diese befinden sich alle entweder in den USA, Mexiko, China, Japan, Korea oder Australien. Von diesen 32 Anlagen führen elf nur den hydrometallurgischen Prozess durch, sechs den pyrometallurgischen und sechs eine Kombination dieser beiden Prozesse. Baum et al. (2022) konnten keine geplanten oder etablierten großtechnischen Anlagen für die Endverarbeitung ermitteln.

Die drei unterschiedlichen Recyclingprozesse werden im Folgenden kurz erläutert.

Physikalischer Prozess

Physikalische Recyclingverfahren umfassen die Zerlegung und Sortierung der Batteriekomponenten in Fraktionen, die entweder in einem hydro- oder pyrometallurgischen Prozess weiterverarbeitet werden.

Pyrometallurgischer Prozess

Beim pyrometallurgischen Prozess werden sehr hohe Temperaturen für ein Schmelzverfahren zur Herstellung einer Metalllegierung genutzt, die in ihre Bestandteile und eine Schlacke getrennt werden kann (Ciez & Whitacre, 2019). Die gebildete Schlacke kann einer weiteren Behandlung zugeführt werden, beispielsweise einem hydrometallurgischen Prozess, um Lithium zu gewinnen (Manhart et al., 2022). Daher folgt auf den pyrometallurgischen Prozess häufig ein hydrometallurgischer Prozess. Die erzeugte Legierung besteht in der Regel hauptsächlich aus Kupfer, Kobalt und Nickel (Manhart et al., 2022). Da diese Methode eine hohe Effizienz bei der Rückgewinnung von Kobalt und nicht von Lithium aufweist, hängt die wirtschaftliche Rentabilität des pyrometallurgischen Prozesses in hohem Maße von der in den verbrauchten LIBs enthaltenen Kobalt-Menge sowie vom schwankenden Marktwert von Kobalt ab (Zhou et al., 2020).

Hydrometallurgischer Prozess

Das hydrometallurgische Verfahren wird in der Regel nach einer Vorbehandlung durchgeführt und beinhaltet in der Regel eine chemische Auslaugung zur Materialrückgewinnung (Heelan et al., 2016; Zhou et al., 2020). Dieser Prozess hat den Vorteil einer hohen Rückgewinnungsrate, eines geringen Energieverbrauchs und weniger Abgasemissionen als der pyrometallurgische Prozess (Zhou et al., 2020).

Optionen für die Vorverarbeitung

Da die Endverarbeitung und damit die endgültige Gewinnung von Materialien aus verbrauchten LIBs derzeit nicht in Afrika erfolgt, müssen die Batterien in andere Teile der Welt exportiert werden. Das stellt die Länder Afrikas jedoch vor einige zusätzliche Herausforderungen. Laut einer von Manhart et al. in Nigeria durchgeführten Studie akzeptieren die meisten Schifffahrtsunternehmen aufgrund von Sicherheitsbedenken keine Li-Ionen-Batterien auf dem Transportweg von Westafrika nach Europa (Manhart et al., 2022). Außerdem müssen die Batterien beim Transport im Ganzen in ein mit Sand gefülltes Fass mit ausreichendem Abstand gelegt werden. Dies führt zu einem ungünstigen Verhältnis

zwischen Batterie und Sand und damit zu hohen Kosten (Manhart et al., 2022). Wenn die Wiederverwendung oder Wiederverwertung nicht mehr praktikabel ist, besteht eine weitere Option für Recycler in Ländern wie Ghana darin, in Vorverarbeitungsmethoden zu investieren. Nach der Vorverarbeitung können die Zwischenprodukte sicherer verschifft und an Einrichtungen im Ausland zu verkauft werden.

In Manhart et al. (2022) werden drei Formen der Vorverarbeitung vorgeschlagen, nämlich mechanische Vorverarbeitung, manuelle Vorverarbeitung und thermische Vorverarbeitung. Bei der mechanischen Vorverarbeitung wird die LIB zerkleinert und anschließend die "schwarze Masse" abgetrennt. Es gibt zwei Unterformen der mechanischen Vorverarbeitung, die trockene Zerkleinerung und die nasse Zerkleinerung. Bei der trockenen Zerkleinerung werden die gesammelten EoL-LIBs entladen und in einen Schredder gegeben, der unter einer inerten Atmosphäre (z. B. Stickstoff) betrieben wird. Das entstandene Material wird erhitzt, um das Bindemittel zu deaktivieren und das Elektrolytlösungsmittel zu verdampfen, welches in einem Aktivkohlefilter absorbiert wird. Die entstandene schwarze Masse wird in Fässer verpackt und kann zur Endverarbeitung exportiert werden. Problematisch bei dieser Methode ist, dass die entstandene schwarze Masse leicht in die Luft gelangen und eingeatmet werden kann, was ein Sicherheitsrisiko darstellt. Bei der Nasszerkleinerung hingegen entfällt die Notwendigkeit einer inerten Atmosphäre, da die Zelle während des Zerkleinerungsprozesses in alkalischem Wasser deaktiviert wird und eine nasse "schwarze Masse" entsteht, wodurch die Staubbildung verringert wird.

4. Schlussfolgerung

Zurzeit werden in Ghanas überwiegend informell organisiertem Abfallverwertungssektor kaum bis keine fachgemäßen oder umweltfreundlichen Verwertungsmethoden für e-Waste eingesetzt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich der formelle Sektor in Ghana aufgrund von staatlichen Regelungen zunehmend weiterbildet. Weitere Bemühungen für eine umweltschonendere Sammlung und Lagerung von Elektroschrott sowie die sichere Aufbereitung für Reuse und Recycling können zu einem Wandel auch im informellen Sektor führen. Staatliche Institutionen wie das Ministerium für Umwelt, Wissenschaft, Technologie und Innovation, die Umweltschutzbehörde und Entwicklungsakteure wie die KfW und das GIZ-Abfallprogramm haben ihre Bemühungen auf die Formalisierung der Beschäftigten im informellen Sektor in diese Richtung gelenkt. Es wird erwartet, dass der noch junge formelle Sektor von einem zunehmend gut ausgebildeten informellen Sektor unterstützt wird und das Recycling von Elektroschrott in Ghana weiter vorantreibt (Owusu-Sekyere et al. 2022).

Bis diese Strukturen flächendeckend und in ausreichendem Maße verfügbar sind wurde in diesem Bericht Ansätze beschrieben, welche Maßnahmen zur Verminderung oder Vorverarbeitung von e-Waste bereits im Inland umgesetzt werden können. Diese können im Rahmen von qualifizierenden Schulungen an Fachkräfte in Ghana weitergegeben und genutzt werden. Dies ist bereits in kleinem Rahmen durch das MoNaL-Projekt geschehen. Die Umsetzung einzelner Verfahren, wie der skizzierte Recyclingprozess für PV-Module, ist bereits vom Projektpartner Electro Recycling Ghana Limited vor Ort geplant. Darüber hinaus können die in diesem Konzeptpapier vorgestellten Analysen und Leitlinien im Rahmen von politischen Umweltstandards zum fachgemäßen Umgang mit e-Waste beitragen.

Quellen

- Akon-Yamga, Gordon, Chux U. Daniels, Wilhemina Quaye, Blanche M. Ting, and Adelaide A. Asante. 2021. "Transformative Innovation Policy Approach to E-Waste Management in Ghana: Perspectives of Actors on Transformative Changes." *Science and Public Policy* 48 (3): 387–97. <https://doi.org/10.1093/scipol/scab005>.
- Amo-Aidoo, A., E.N. Kumi, O. Hensel, J.K. Korese, and B. Sturm. 2022. "Solar Energy Policy Implementation in Ghana: A LEAP Model Analysis." *Scientific African* 16 (July): e01162. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01162>.
- Chowdhury, Md. Shahariar, Kazi Sajedur Rahman, Tanjia Chowdhury, Narissara Nuthammachot, Kuaanan Techato, Md. Akhtaruzzaman, Sieh Kiong Tiong, Kamaruzzaman Sopian, and Nowshad Amin. 2020. "An Overview of Solar Photovoltaic Panels' End-of-Life Material Recycling." *Energy Strategy Reviews* 27 (January): 100431. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>.
- D'Adamo, Idiano, Michela Miliacca, and Paolo Rosa. 2017. "Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules." *International Journal of Photoenergy* 2017: 1–6. <https://doi.org/10.1155/2017/4184676>.
- Europäische Kommission. 2019. Photovoltaic geographical information system – Country and regional maps (2019). https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html
- Global Data Lab. 2023. Average household size. *Area Database (v4.2)*. <https://globaldatalab.org/areadata/table/hhsize/GHA/>
- Hoeltl, A., R. Brandtweiner, and R. Müller. 2017. "Approach to Solving the E-Waste Problem – Case Study Ghana." *International Journal of Sustainable Development and Planning* 12 (06): 1050–60. <https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N6-1050-1060>.
- IEA. 2021. "Renewables 2021 - Analysis and Forecast to 2026." <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5ae32253-7409-4f9a-a91d1493ffb9777a/Renewables2021-Analysisandforecastto2026.pdf>.
- Offei, Justice. 2022. "The Ghana Informal Sector Fact Sheet: A Vital Data For Transformative Agenda." November 27, 2022.
- Owusu-Sekyere, Karoline, Alexander Batteiger, Richard Afoblikame, Gerold Hafner, and Martin. Kranert. 2022. "Assessing Data in the Informal E-Waste Sector: The Agbogbloshie Scrapyard." *Waste Management* 139 (February): 158–67. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.026>.
- Peiry, Katharina Kummer. 2010. "BASEL CONVENTION ON THE CONTROL OF TRANSBOUNDARY MOVEMENTS OF HAZARDOUS WASTES AND THEIR DISPOSAL," 10.
- Reiling GmbH. Recycling & Produkte. <https://www.reiling.de/recycling-produkte#progress--anchor--157>
- Svarc, Jason. 2020. Solar Panel Construction. *Clean Energy Reviews*. <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>
- Tao, Meng, Vasilis Fthenakis, Burcak Ebin, Britt-Marie Steenari, Evelyn Butler, Parikhith Sinha, Richard Corkish, Karsten Wambach, and Ethan S. Simon. 2020. "Major Challenges and Opportunities in Silicon Solar Module Recycling." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 28 (10): 1077–88. <https://doi.org/10.1002/pip.3316>.
- Tsanakas, John A., Arvid Heide, Tadas Radavičius, Julius Denafas, Elisabeth Lemaire, Ke Wang, Jef Poortmans, and Eszter Voroshazi. 2020. "Towards a Circular Supply Chain for PV Modules: Review of Today's Challenges in PV Recycling, Refurbishment and Re-certification." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 28 (6): 454–64. <https://doi.org/10.1002/pip.3193>.
- Weiss de Abreu, Mariana, Daniel Viana Ferreira, Amaro Olimpio Pereira, Joilson Cabral, and Claude Cohen. 2021. "Household Energy Consumption Behaviors in Developing Countries: A Structural Decomposition Analysis for Brazil." *Energy for Sustainable Development* 62 (June): 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.03.001>.
- Wirth, Harry. 2022. "Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland." *Fraunhofer ISE*, 101.

Guideline for the Evaluation of Solar Module E-Waste and Professional Rehabilitation and Continued Use of Decommissioned PV-Modules

by SunCrafter GmbH

Berlin, 31.01.2021

Contents

1. List of figures	2
2. Abbreviations	3
3. Preface	4
4. Reuse options and terminology	5
5. List of necessary equipment	6
6. Health & Safety Instructions	7
7. Facility Layout	7
8. Flow chart overview	9
9. Visual Inspection	10
10. Repair	10
11. Cell Inspection	11
12. Flash test	12
13. Steps for the electrical inspection & final sorting	12
14. Financial Viability	13
15. Annex	18

1. List of figures

Figure 1 Optimal facility layout	8
Figure 2 Process flow chart.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Figure 4 Cost Structure HV rehabilitated module.....	14
Figure 3 Cost structure LV refurbished module	14
Figure 5 Sensibility to rehabilitation rate	15
Figure 6 Sensibility to rehabilitation volume.....	15

2. Abbreviations

c-Si	Crystalline silicon
DC	Direct current voltage
EVA	Ethylen-Vinylacetat
EL	Electroluminescence
HV	High Voltage
Isc	Short Circuit current
LV	Low Voltage
MC4	Multi-contact 4 millimeter
PV	Photovoltaic
REC	Recycle
SELV	Safety Extra Low Voltage
Vmp	Voltage (nominal)
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment

3. Preface

The following guideline summarises the process of module assessment and rehabilitation as outlined in detail in the presentation „Practical Guidelines for the Assessment and Rehabilitation of disused c-Si Solar Modules“ and puts in into broader context where necessary.

The focal point of the process is the module and its condition. To optimally match the rehabilitated modules to a use case and to save as many modules as possible from becoming waste, the modules are being processed into two distinct categories, namely high-voltage (HV) capable and low-voltage (LV) capable modules. LV modules do not need to fulfill the same high quality criteria as their application in low-voltage systems is less demanding. Minor defaults such as a repaired backfoil or standard diodes do not pose a safety risk, as the application of such modules in a high-voltage case potentially would.

The rehabilitation process suggested by SunCrafter follows three main criteria: Safety, Efficiency and Transparency. Pursuing the standard presented shall ensure the safe and reliable use of 2nd life modules in their respective use case. The process is optimised for efficiency by integrating the LV modules, which lowers the rehabilitation cost per 2nd life module, and by leaving out extensive repairs which would be too time or material intense. By making the rehabilitation process itself transparent as well as by quantifying the condition and capacity of the modules with a label, the buyer is supposed to receive a well documented, trustworthy product instead of a ‚black box‘ second-hand module.

There is to date no international or national reuse standard for solar modules. The guidelines here are based on many years of experience of SunCrafter in solar module assessment and rehabilitation, as well as on literature research, expert interviews and the creation of a company-own quality standard. The process is adapted to the expectable circumstances on site at the Don Bosco Campus in Tema, Ghana. SunCrafter recommends a two-day training for the staff members in charge of the rehabilitation process, to ensure safe and correct handling of teh equipment, demonstrate correct stacking of teh modules, develop an understanding of the results of the EL test and more, preferably conducted on site.

4. Reuse options and terminology

A plethora of reuse options and terminology can be found in the circular economy sector. As there is no universal delimitation of terminology, the definitions here are based on a mix of expert feedback and literature findings.

Reuse: In the European directive on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) the term “re-use” is indicating a variety of reuse options without further specifying. This seems to be an adequate deployment of the term, which shall be adopted in this study, albeit simply spelled “reuse”.

Direct Reuse: The IRENA (2016), Canals Casals et al. (2014) and some industry experts define “direct reuse” as the deployment of secondary modules without prior intervention such as repair or testing. Direct reuse leads to a complete ‘black box’ in terms of module condition and remaining capacity.

Repair: “to restore sth. (damaged, faulty or worn) to a good condition” (Oxford Online Language Dictionary).

Refurbish: The term is often used for valuable goods such as expensive electronics or furniture that are prepared for second use with all necessary measures, comprising cleaning, repairing, and repackaging.

Reconfigure: “Reconfiguration” means changing a system’s or product’s structure or settings, while preserving core functionality. In this case, it is used to describe the technical alteration of a PV module’s original voltage.

Rehabilitate: To return sth. to its former condition, or in this case to re-establish the full functionality of the module through interventions such as quality and functionality testing and protocolling.

It is important to note that in the case of higher voltage use cases only the rehabilitated modules qualify for a meaningful comparison to new modules, as only in this reuse option the performance parameters, such as remaining efficiency, are known.

SunCrafter advocates for a high-quality ‘rehabilitation’ pathway with specialized equipment, to ensure maximum safety and quality, to bring 2nd life modules into high-voltage AC use cases.

Refurbishment is deemed an accurate term for modules which will enter lower voltage use cases. Modules which have not undergone the extensive rehabilitation process, for example because no specialized testing equipment was available, can still undergo a simplified procedure to then be applied in less demanding low-voltage DC use cases. Both pathways

shall be outlined here, and be referred to as ‚refurbishment‘ and ‚rehabilitation‘ respectively. The flow chart is clustered into 5 stages, of which step 1,2, and 5 together constitute the refurbishment and 1 through 5 constitute the rehabilitation process. The term 2nd life PV shall in this study solely refer to rehabilitated and refurbished modules.

5. List of necessary equipment

For the following steps of visual and electrical inspection and refurbishment of used c-Si solar modules, this equipment is needed:

- Standard PPE: safety shoes, safety goggles, safety gloves
- Direct current clamp meter including voltmeter
- Crimping pliers, needle-nose pliers, combination pliers
- Small flathead screwdriver
- MC4 cables and MC4 plugs (cable connectors)
- EVA repair foil with heat resistance up to 95°C
- Standard Schottky-diodes

For a more advanced setup to rehabilitate modules you will need:

- Electroluminescence test machine
- Flash test system

The detailed description of the system components with the correlated cost is added to this report in the Annex.

6. Health & Safety Instructions

Required Safety Equipment per Worker

- Gloves
- Safety Shoes
- Long Work Pants
- Long Work Shirt
- High Visibility Vest
- (Safety Goggles)

7. Facility Layout

Considering the favourable climate in Tema, Ghana, an outdoor facility seems to be the most efficient option which enables technically feasible as well as financially viable module assessment and testing. The layout proposed for the testing facility on site is based on the following assumptions:

- an average of 3000 disused modules arriving for treatment annually
- two types of rehab paths, leading to LV & HV capable modules
- assuming 50% going into LV rehab & 50% into HV rehab
- assuming a total rehabilitation rate of 60%

The rehabilitation rate refers to the share of modules successfully rehabilitated divided by all modules entering the rehabilitation process. The higher the rehab rate, the lower the rehabilitation cost per output module. It is necessary to monitor the rehabilitation rate empirically, as it varies strongly with the quality and condition of the modules which arrive on site for treatment.

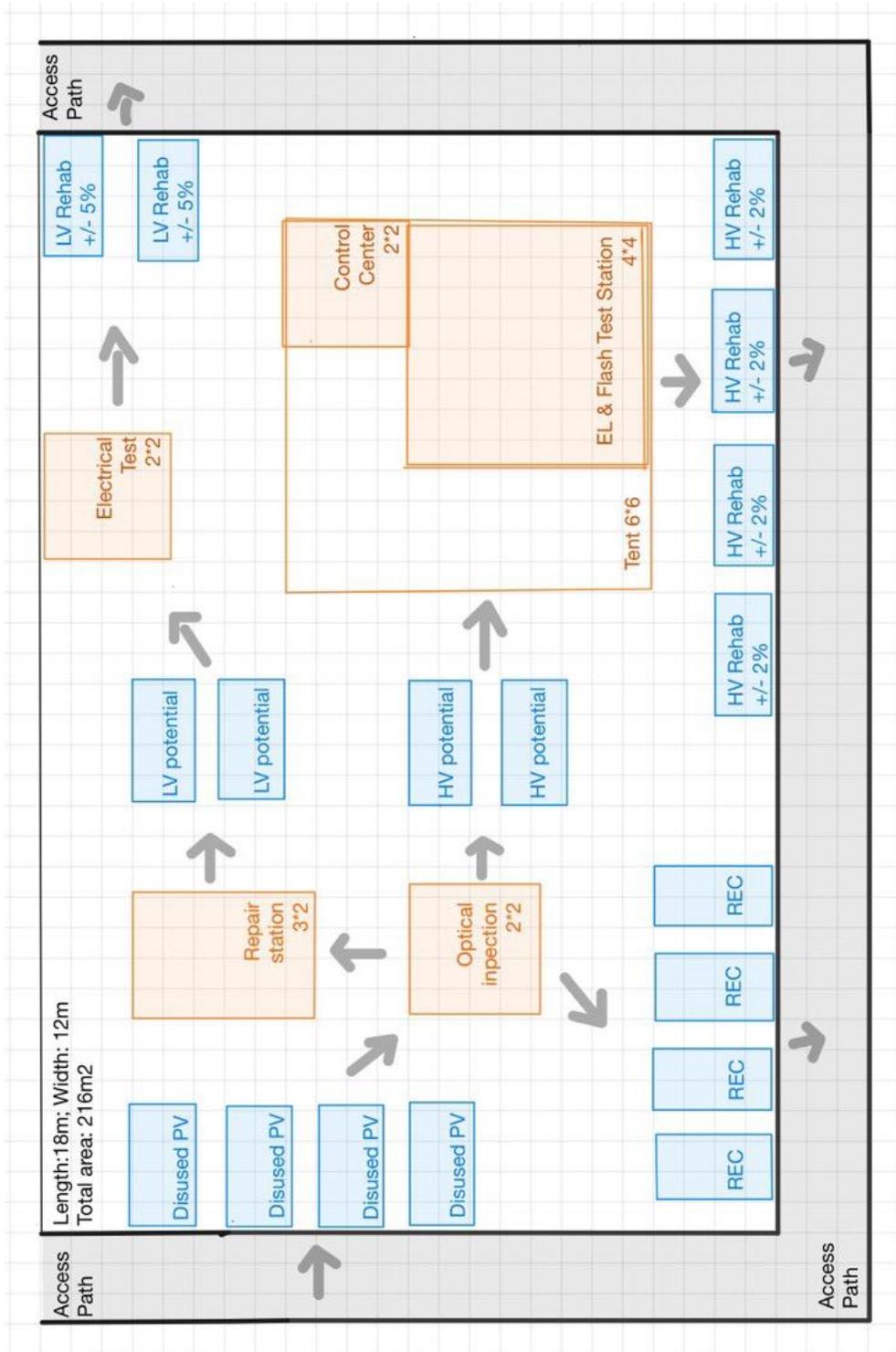


Figure 1 Optimal facility layout

8. Flow chart overview

The guidelines are based on this technical process. Every stage is explained in further detail in the next chapters, and is chronologically addressed in the „Practical Guidelines [...]“.

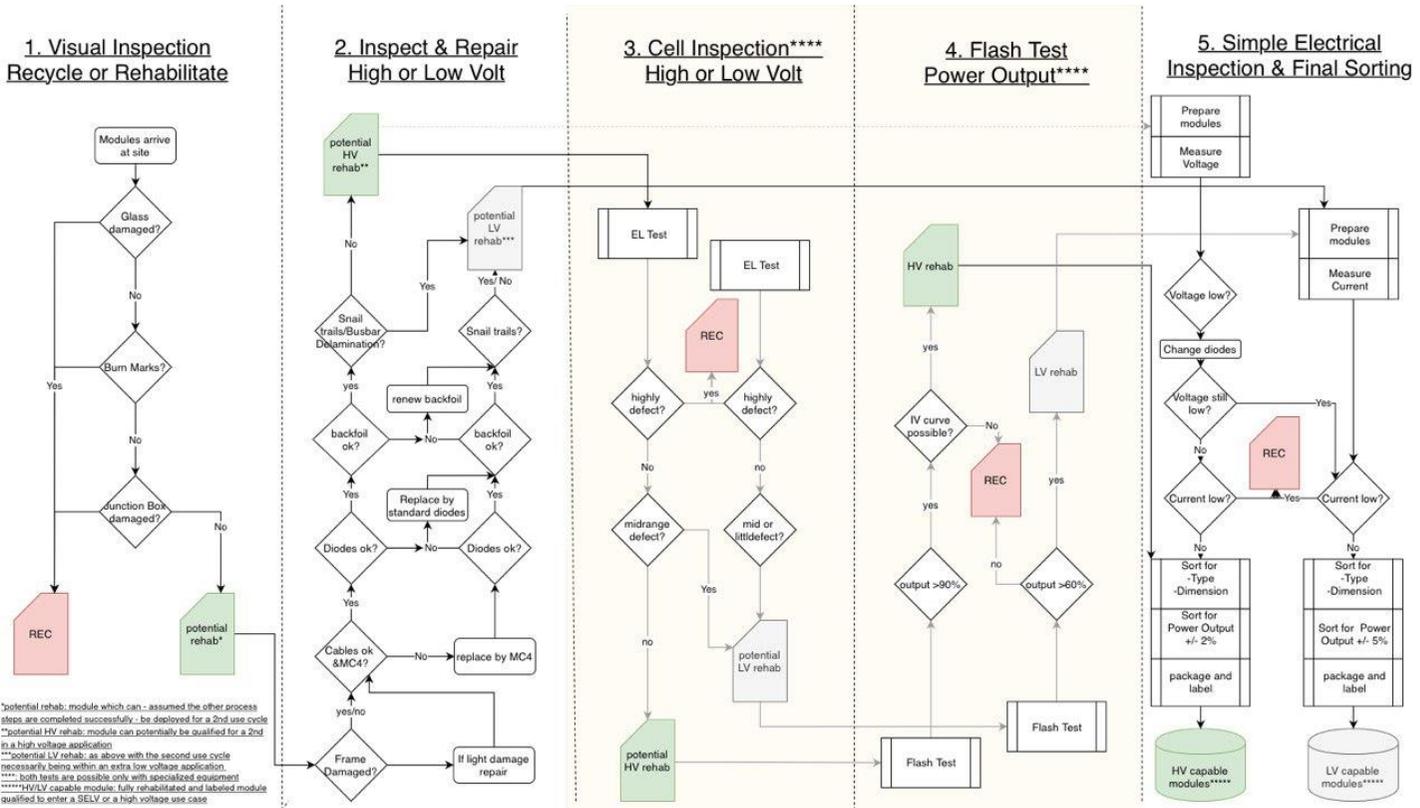


Figure 2 Flow Chart Assess, Refurbish, Rehabilitate

9. Visual Inspection

Please follow the instructions as outlined in the presentation 'Practical Guidelines for the Assessment and Rehabilitation of disused c-Si Solar Modules' chronologically. This written report serves as summary, not as practical instruction to the technical process of module assessment and rehabilitation.

In the first step of the process, modules will be scrutinized first for their general fit to a 2nd life application. If modules pass, they go on to the next step, if not they are sent to recycling. Certain faults will lead to the direct necessity to "recycle" the module, as they either inhibit the performance of the module fundamentally or will pose a safety risk if taken into operation.

Modules should be put to direct recycling if they exhibit **any** of the following faults:

- fracture or split in the front glass
- burn spots on the front cells, the solder joints, conducting paths, busbars, close to or directly on the junction box
- deformation or bloating of the junction box

10. Repair

In the second step of the process the modules which passed the visual inspection successfully are examined further, when necessary repaired, and categorized into two lots: HV capable and LV capable modules. This further segmentation causes a more complex process, but it brings two main advantages:

- 1) It ensures that modules are applied in use cases which they are ideal for, meaning the balance between financial viability and technical feasibility is optimized.
- 2) Including the low-voltage category drops the bar in terms of module quality and thus increases the share of modules which can be rehabilitated successfully, which in turn decreases the cost per module rehabilitated.

For efficiency it is suggested to only perform those repairs, which can happen quickly and at low material cost and to recycle all other damaged modules.

The following procedures should be included in the refurbishment stage: If the frame is dented or deformed, it depends on the severity. Usually, the frame can be repaired by gluing it back on with silicone, the target is to ensure no humidity can enter at the point of damage. If the technician is not sure whether the frame can be repaired with this method, the module should be put to recycling.

Many faults which occur on the backside of the module can be repaired, meaning the module can be reused. If the foil is bloated, the bloating bubble needs to be cut open, smoothed out and repaired by adding EVA repair foil with heat resistance up to 95°C. The same is the case if there are scratches or cracks in the foil. This is important so that no humidity can enter the cells. If “yellowing” is visible on the backside, meaning a discoloration of the foil, the cells are not affected, so the module can still be used, but since this is an indication that the temperature coefficient has changed, the modules should rather be used in a safety extra low voltage scenario.

Concerning the cables, if they are damaged, replace them with standard MC4 cables and MC4 plugs using the pliers. Even if they are not damaged, it would heighten compatibility to exchange cables on all modules which are supposed to go back into operation, yet it is not a necessity.

A very critical point is the junction box. As stated before, if it is dented, deformed, bloated, burned or in any other way damaged, it is a recycling case. But if the junction box seems unharmed from the outside, it can be opened and checked for damages inside. If the conduction paths are burned, the module should be recycled, because the repair is not economical. If they are however well connected and the diodes are complete and not burned, then it is a case for HV rehabilitation. If the diodes are in any way damaged, exchange them for the standard Schottky-diodes. In this case the modules cannot be used in a standard string system anymore with a voltage higher than 60 volts, so they become LV capable modules. To lower overall cost, modules which are classified ‚LV rehab‘ at the end of stage 2, might be transferred directly to stage 5, even if specialized equipment is available.

11. Cell Inspection

To rehabilitate for higher voltage use cases and grid connection, more precise measurements are obligatory. Two tests are recommended before bringing a solar module into a higher

voltage use case: electroluminescence testing and flash testing. Both tests require specialized equipment, such as a flash camera and lamp or an electroluminescence scanner. The rehabilitation process including these specialized tests is included in the “Practical Guidelines [...]” under stage 3 and 4.

The electroluminescence test shows via an “X-ray” the physical condition of the wafer cells, for example (micro-)cracks which are not visible to the eye. This has a large effect on the safety of a higher voltage string system, as changing weather conditions can make microcracks more severe over time.

It is difficult to objectify the rating of the module in terms of microcracks. In the 2 day introductory course into module assessment and rehabilitation, the rating process would be exemplified extensively, until the staff can judge according to the visual. The space covered by, the amount, the severity and the location of the microcracks on the module all impact on the rating as being ,highly, mildly‘, ‘ or ,little‘ defect.

12. Flash test

The flash test indicates the actual capacity left for the used module. This on the one hand can indicate if there are further hitherto undiscovered defects in the module, e.g. if the voltage is much lower than expectable. Also, it is valuable to rate a module's economic viability as the power density compared to new modules is here the decisive factor. Lastly, in a high voltage use case it is necessary that the modules in a string are as homogenous as possible for maximum output (one module with lower capacity affects the whole string performance). Also for selling the modules, high or low voltage, a capacity rating is important so that the module can be priced per W, instead of flat pricing which would be less attractive for buyers.

13. Steps for the electrical inspection & final sorting

The LV capable modules proceed with the electrical inspection to see if the module delivers the expected power.

Ideally, the module will have a label from the original manufacturer on the backside, so we know what the expected voltage and current should be. If the module does not have a label,

a module of similar build (height, width, weight, cell count, look) should be found to compare with these parameters.

For the measurement to be precise, the front side needs to first be cleaned from any dirt, dust, moss or other pollutant there may be, so the maximum amount of sunlight can be absorbed. Then, the module is placed front side at a 90° angle towards direct sunlight.

First, the voltage is measured with the DC clamp meter with voltmeter. If the nominal voltage (V_{mp}) is considerably less than on the original label (consider $\frac{1}{3}$ less than on the label), there is a high likelihood for a diode damage and ALL diodes should be exchanged for standard Schottky-diodes, which again means the module should not be used in a high voltage scenario anymore. If the voltage is still too low after changing the diodes and measuring again, check if all diodes are inserted correctly. If the connections are all intact and the voltage is still too low, the problem is probably with the busbars and the module cannot be repaired any further to regain original voltage. In this case, the module can still be used in an extra low voltage scenario, for example to charge USB devices.

Next, the current (I_{sc}) is measured also using the DC clamp meter. Again, the short circuit current should be about the same as on label. If this is not the case, front glass should be checked again. If it is free of any dirt and shade and the front is placed directly towards the sunlight at a 90° angle. If the re-measurement still does not show the correct short circuit current, it means there is probably a busbar defect or broken wafer and the module is not usable anymore and needs to be recycled.

Lastly, after the testing is finished, the modules fit for reuse should be labeled with the measured electrical parameters, as well as sorted according to dimensions, type, and those parameters. As the HV use cases require homogeneity of modules, the HV capable modules are stacked in the usual +/-2% range in which new modules are delivered. LV modules may be stacked less strictly, but for reasons of fair pricing with a range of no more than 5% +/- of the reference module.

14. Financial Viability

Under which circumstances is the rehabilitation of disused solar PV modules economically viable?

This question can only be answered with the help of a detailed economic model, which considers several cost dimensions, such as the equipment cost for assessment and

rehabilitation incl. maintenance (cFix & cQuasifix) and the cost of labour and parts needed for assessment, repair and rehabilitation (cVar). The labour cost assumed here is based on following qualification requirements and wage standards for Ghana: 900 GHS qualified electrician (EQF5), 600 GHS electrician in training (EQF2); annual work days: 226.

As the path of the LV and HV capable modules differs substantially, also the rehabilitation cost differs. This is due mainly to a divergence in the fix cost, which are significantly lower for the LV, refurbished modules. The model is based on an assumed total of 6000 modules arriving for treatment annually, with presumably 50% being treated as HV, 50% as LV modules and a share of successfully rehabilitated modules of 40, and 60% respectively (rehab rate). The indirect cost factor for both module types is set to 180%. The rehabilitation cost for HV modules amount to 10.90€ per module. The LV module costs 5.35€ to refurbish.

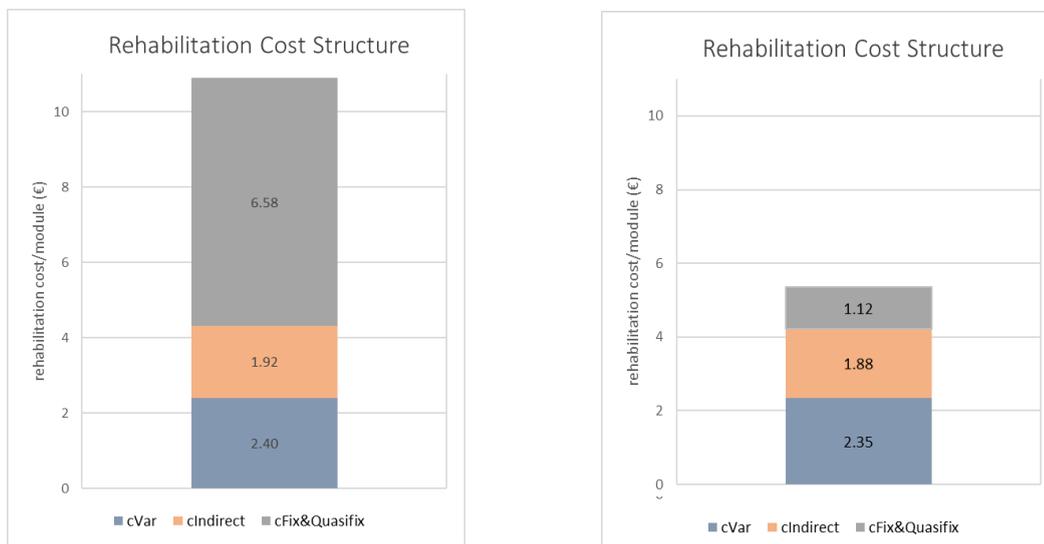


Figure 4 Cost Structure HV rehabilitated module Figure 3 Cost structure LV refurbished module

The rehabilitation cost per panel is supposedly *sensitive* to the rehabilitation rate (successfully rehabilitated modules/ all modules entering process) and the rehabilitation volume (number of modules entering rehabilitation process).

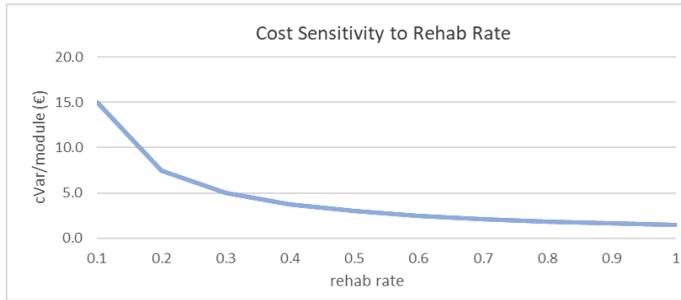


Figure 5 Sensibility to rehabilitation rate

The sensitivity analysis shows that the effect of the rehabilitation rate on overall rehab cost for HV modules is lower than expected. This is due to the low labour cost in the labour intense rehabilitation process.

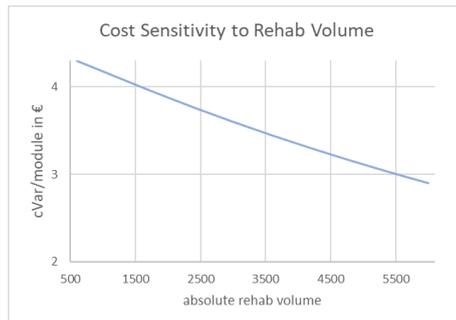


Figure 6 Sensibility to rehabilitation volume

The sensitivity to the rehabilitation volume needs to be empirically verified. Based on company experience an output elasticity factor of 0.95 was assumed. The cost elasticity factor describes the reduction in cost per 10000 modules tested, due to effects of scale.

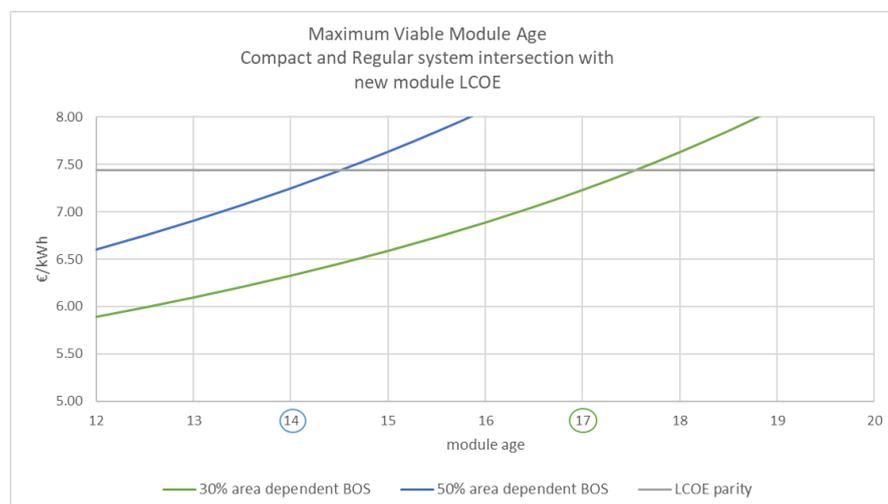
Economic viability here is defined as LCOE parity, meaning the price equivalence of the kWh produced by a system with the 2nd life modules and a system with new modules.

The determining factor is the module AGE as it influences several parameters decisive for the LCOE calculation at once. These are the original power output of the disused module which relates to the year of its production, the remaining power output after degradation with the degradation being a function over time in years, and the remaining lifetime which influences remaining generation and WACC.

All of these impact on the relative power density of the 2nd life compared to the new modules. The relative power density affects the cost competitiveness via the area requirement and the area dependent BOS cost. While the cost for and varies strongly depending on geography, the area dependent BOS cost are a more objective factor. The lower the power density the higher the area dependent BOS cost. A last factor to consider is the share of area dependent BOS cost in relation to total BOS cost, which might differ depending on the type of solar system the 2nd life module will be integrated to. In a regular, roof mounted, residential solar system the share of area dependent BOS cost amounts to about 50%. It is assumed that these cost differ for standalone systems, with only 30% of BOS cost being area-dependent.

The HV rehabilitated module was used as a basis for the regular solar case, the LV refurbished module as basis for the compact standalone solar system. The analysis shows that a

rehabilitation of modules capable of high-voltage energy generation in a regular solar system is financially viable for modules which are up to 14 years old before the treatment. For the low-voltage capable modules the refurbishment process for the compact, standalone, off-grid use case is viable for modules which are up to 18 years old.



This result is very context specific and based on a plethora of hypothetical values, ranging from the rehabilitation volume to the rehabilitation rate and more. In case of installing such a facility for refurbishment and rehabilitation it is mandatory to closely monitor these variables and update the assumptions empirically.

Does knowing the maximum viable module age help making the investment decision pro or contra a professional rehabilitation facility? The share of modules disused younger than the maximum viable module age of 14 or respectively 18 years is not known and there are little data available on solar PV waste volume and condition. However, according to IRENA/IEA 2016 about 7% of modules are discarded before 15 years of deployment time.

The PV market and especially the off-grid PV market is growing exceptionally fast (IRENA, 2019), which indicates significant deployment potential for price competitive 2nd life modules. Even, if LCOE parity is not achieved because the module age does not allow for it, the lower investment cost for the 2nd life system as compared to a system with new modules can still help customer groups with low bankability accessing solar power in the first place.

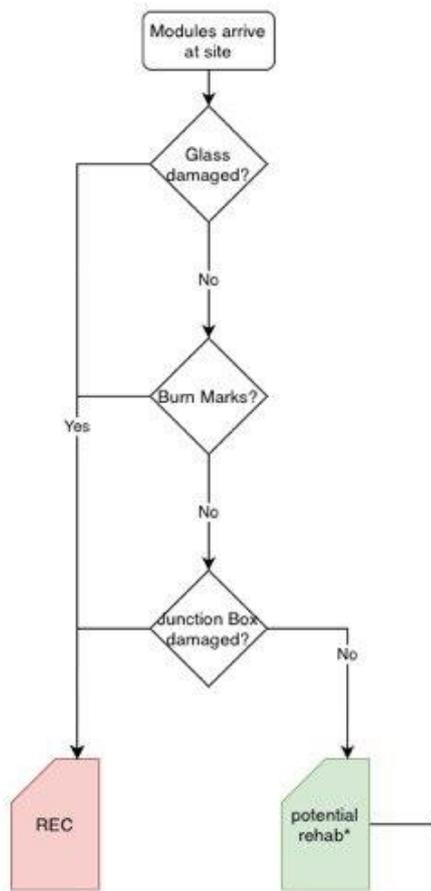
The combination of rehabilitation and recycling might be interesting to render recycling more cost competitive, especially in the light of decreasing returns of material value. If the combination of recycling and rehabilitation was more profitable than landfill or incineration, a broader change to sustainable module EoL treatment could be possible.

The rapid developments in PV technology can alter the assumptions and results of this analysis quickly. Technological advances such as glass/glass modules will likely affect the economics of 2nd life modules as well as other value dimensions. As solar PV is developing into one of the most prominent generation technologies, close attention to reuse as treatment option for rising waste volumes is called for.

15. Annex

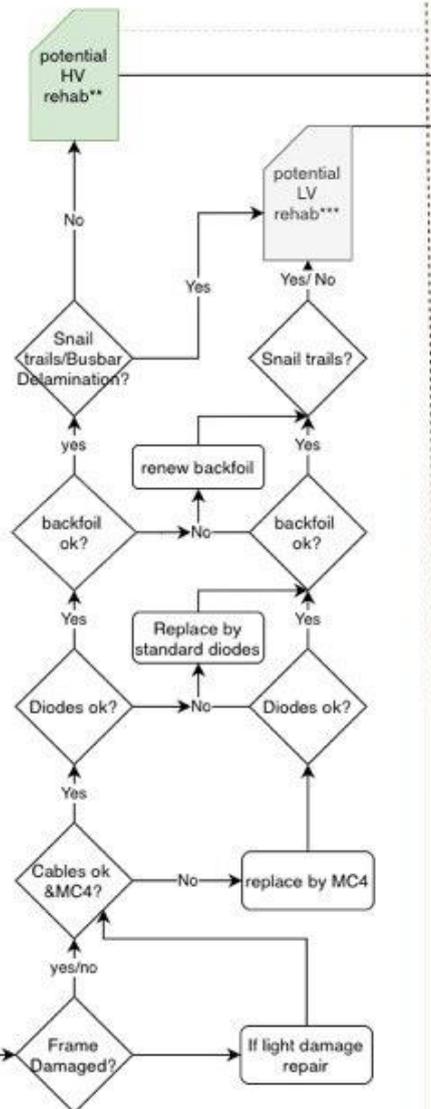
Process Flow Chart

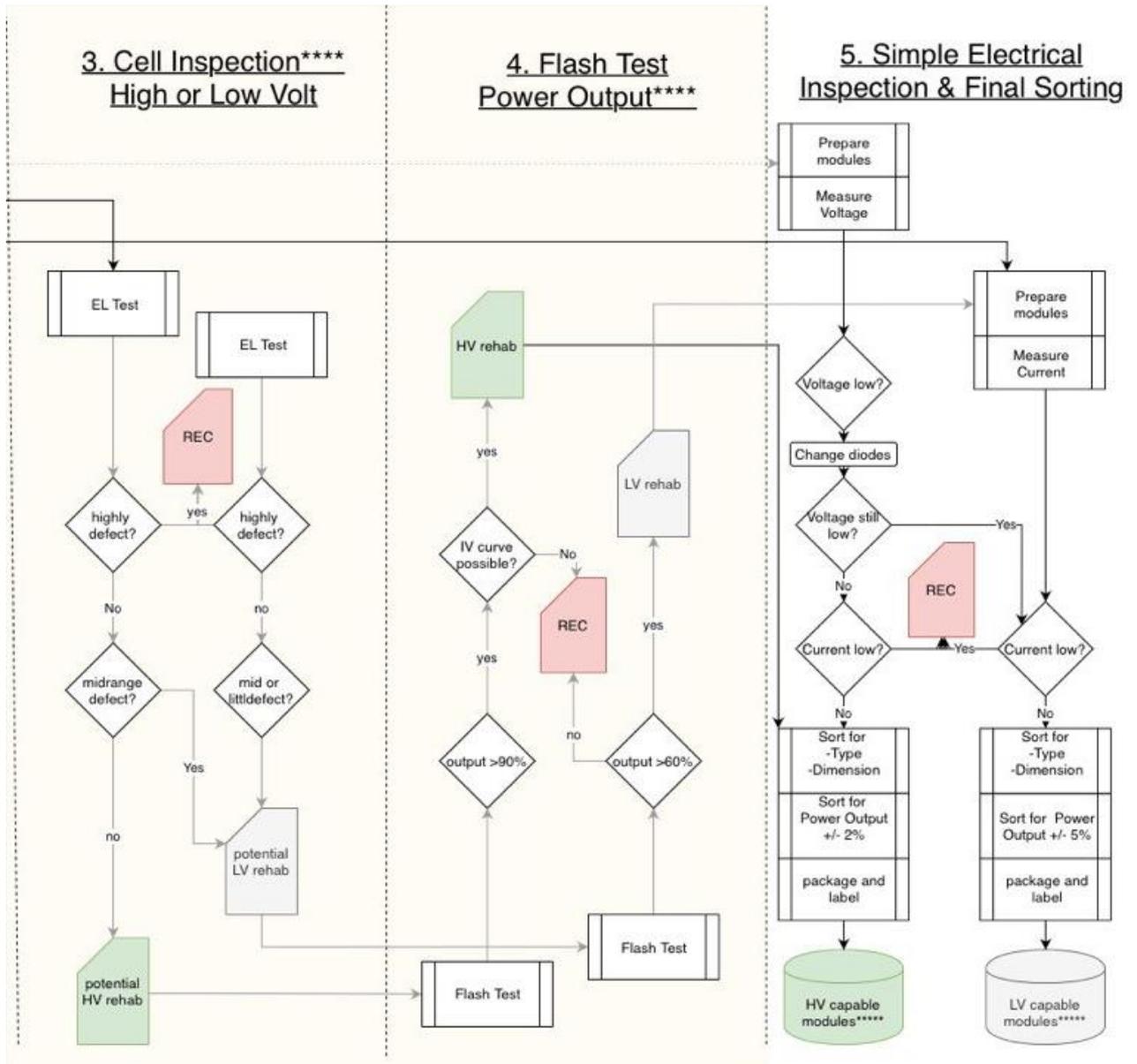
1. Visual Inspection Recycle or Rehabilitate



*potential rehab: module which can - assumed the other process steps are completed successfully - be deployed for a 2nd use cycle
 **potential HV rehab: module can potentially be qualified for a 2nd in a high voltage application
 ***potential LV rehab: as above with the second use cycle necessarily being within an extra low voltage application
 **** both tests are possible only with specialized equipment
 *****HV/LV capable module: fully rehabilitated and labeled module qualified to enter a SELV or a high voltage use case

2. Inspect & Repair High or Low Volt





Cost Table Testing Station

Testing Station 1							
Refurbishment	Electrical Test	4,500€	Incl.	Measuring Device	Hardware	Software	Scanner
Test Station 2							
Rehabilitation	Flash Test	15,000€	Incl.	Measuring Device	LED Flasher	Software	Frame
	EL Test	25,000€	Incl.	Measuring Device	Kamera	Software	Frame
	Trailer	5,000€	Incl.	Build Out			
	Control Center	5,000€	Incl.	Computers	Monitors	Scanners	Table & Chair
	Tent	1,000€	Incl.	Tent			
Operational							
	Fork Lift	3,000€	Incl.	1 piece			
	Pallet Jack	1,000€	Incl.	2 pieces			
	Pallet	300€	Incl.	30 pieces			
	Total	55,500€					

Guideline for the Assessment & Rehabilitation of Used c-Si Solar Modules

by SunCrafter GmbH



Contents

A) PREFACE

B) PROCESS FLOW

1. VISUAL INSPECTION I

2. VISUAL INSPECTION II

3. CELL INSPECTION

4. FLASH TEST

5. SIMPLE ELECTRICAL INSPECTION & SORTING

C) EQUIPMENT

D) HEALTH & SAFETY INSTRUCTIONS

E) IDEAL FACILITY LAYOUT

F) ECONOMIC VIABILITY

PREFACE

The following guideline intends to give a step-by-step overview of module assessment and rehabilitation. The intention is to give an electrically pre-qualified audience an easy-to-follow manual to check disused solar modules for their reusability and conduct the necessary steps to ensure the modules functionality and safety.

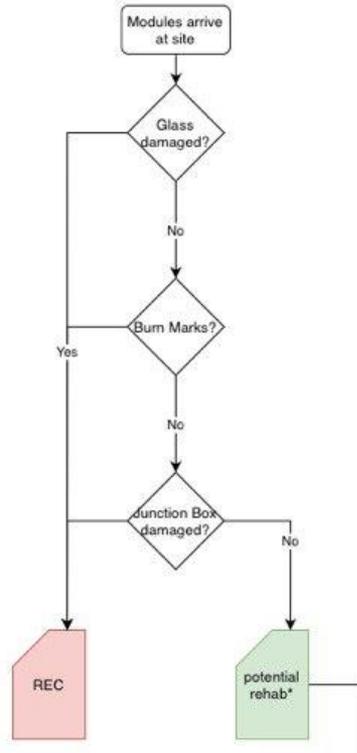
There are different types of reuse, which qualify modules for different use cases. To bring 2nd life modules into high-voltage AC use cases, SunCrafter advocates for a high-quality 'rehabilitation' pathway with specialized equipment, to ensure maximum safety and quality. Modules which have not undergone this extensive process, for example because no specialized testing equipment was available, can still undergo a simplified procedure to then be applied in less demanding low-voltage DC use cases. Both pathways shall be outlined here, and be referred to as 'simple rehabilitation' and 'qualified rehabilitation' respectively. The flow chart is clustered into 5 stages, of which step 1,2, and 5 together constitute the simple and 1 through 5 constitute the qualified process.

The focal point of the process is the module and its condition. High-voltage rehabilitation (HV rehab) is set as the standard path the modules follow. Recycling (REC) and low-voltage rehabilitation (LV rehab) are the alternative pathways, which result from deficiencies in the module in this process. Or as discussed above from the lack of availability of the specialized equipment required for process steps 3 and 4. To lower overall cost, modules which are classified 'LV rehab' at the end of stage 2, might be transferred directly to stage 5, even if specialized equipment is available.

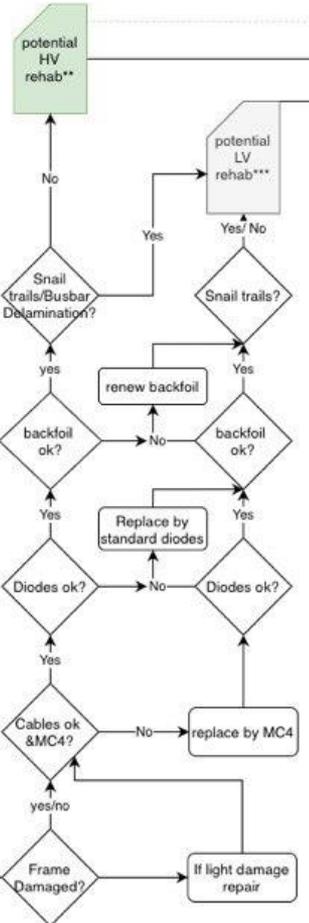
There is to date no international or national reuse standard for solar modules. The guidelines here are based on many years of experience of SunCrafter in solar module assessment and rehabilitation, as well as on literature research, expert interviews and the creation of a company-own quality standard. The process is adapted to the expectable circumstances on site at xx, Accra.

2. PROCESS FLOW CHART

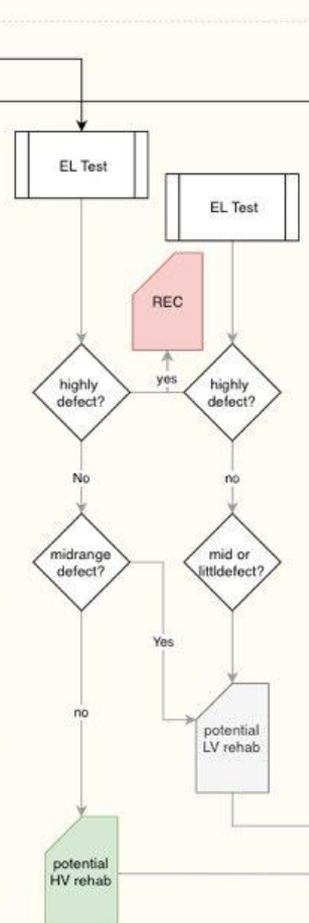
1. Visual Inspection Recycle or Rehabilitate



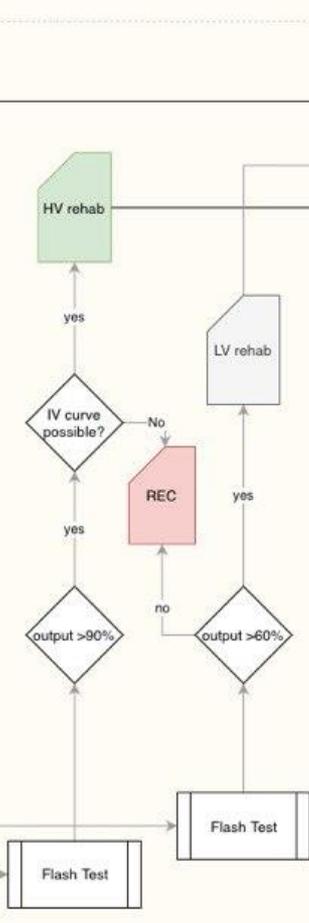
2. Inspect & Repair High or Low Volt



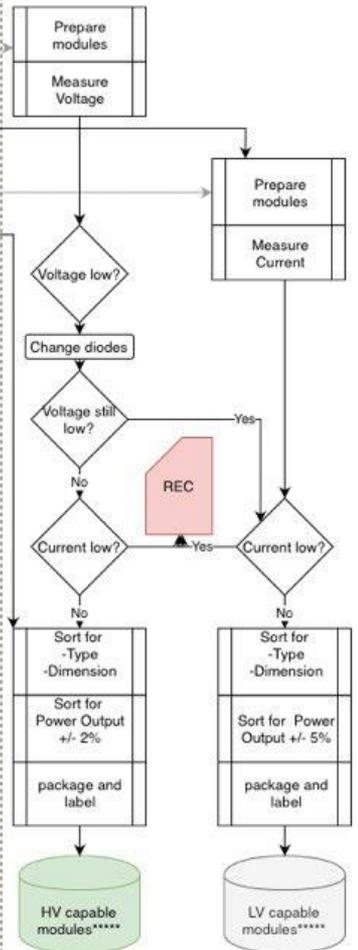
3. Cell Inspection**** High or Low Volt



4. Flash Test Power Output****



5. Simple Electrical Inspection & Final Sorting



*potential rehab: module which can - assumed the other process steps are completed successfully - be deployed for a 2nd use cycle
 **potential HV rehab: module can potentially be qualified for a 2nd in a high voltage application
 ***potential LV rehab: as above with the second use cycle necessarily being within an extra low voltage application.
 ****: both tests are possible only with specialized equipment
 *****HV/LV capable module: fully rehabilitated and labeled module qualified to enter a SELV or a high voltage use case

3. VISUAL INSPECTION I

Recycle or Rehabilitate

GLASS CONDITION

RECYCLE if there are

- fractures in the glass cover, such as hail indents*, splits, shattered glass** even in small areas of the module

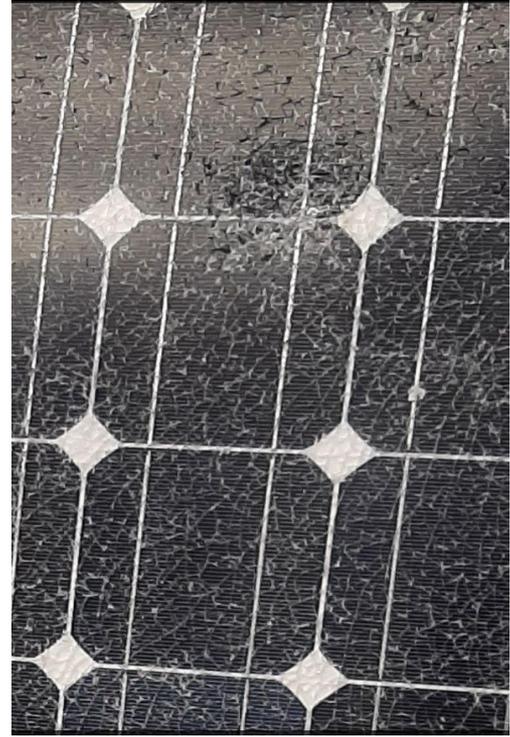
POTENTIAL REHAB if no damage is visible

*in Europe 2nd most common reason for premature dismantling of plant

**often due to poor dismantling and transport



Hail damage



Shattered glass

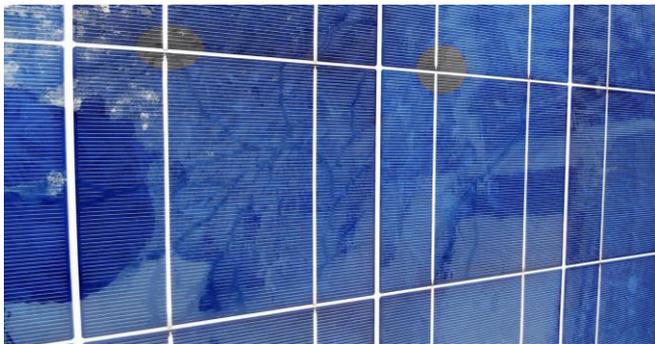
WAFER CONDITION

RECYCLE if there are

- burn spots on the cells or conducting paths*
- corrosion on conducting paths
- busbar damages

POTENTIAL REHAB if no damage is visible

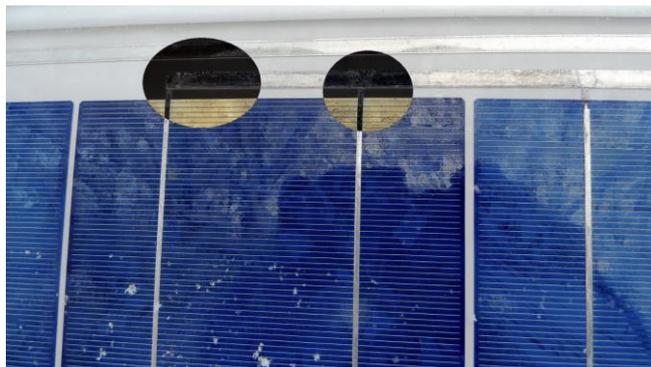
*mostly due to surge damage



Burn marks on busbars



Burn mark between cells



Corrosion of conducting paths

JUNCTION BOX CONDITION

RECYCLE if

- the junction box has burn marks, is bloated or dented*
- the conducting paths and diodes have burn marks

POTENTIAL REHAB if no damage is visible

*due to so called ,surge damage‘ - most common reason for premature dismantling of solar modules



Burned diodes and junction box



Burned and damaged junction box

Bloated junction box

3. INSPECT & REPAIR

High or Low Volt

FRAME CONDITION

RECYCLE if there are

- severe dents or deformations in the frame

REPAIR & REUSE FOR LV REHAB if

- the frame came loose: glue back using silicone

This will stop humidity from entering and damaging the module.

CABLE CONDITION

REPAIR & REUSE FOR LV REHAB if

- the cables are damaged or not MC4 cables: replace with standard MC4 cables and MC4 plugs using the pliers

Even if they are not damaged, it will heighten compatibility to exchange cables on all modules.

DIODE CONDITION

REPAIR & REUSE FOR LV REHAB if there are

- damages directly on the diodes: replace by standard Schottky diodes

Modules **without original diodes** should not be used in strings anymore, only apply in low voltage, standalone cases (unless you can replace diodes with the same type as the originals)!

BACKFOIL CONDITION

REPAIR & REUSE FOR LV REHAB if there are

- bloated bubbles in the foil: cut open, smooth out and repaired by adding EVA repair foil with heat resistance up to 95°C
- scratches or holes in the foil: repaired by adding EVA repair foil with heat resistance up to 95°C

This will stop humidity from entering and damaging the module.



Bloated bubbles in backfoil



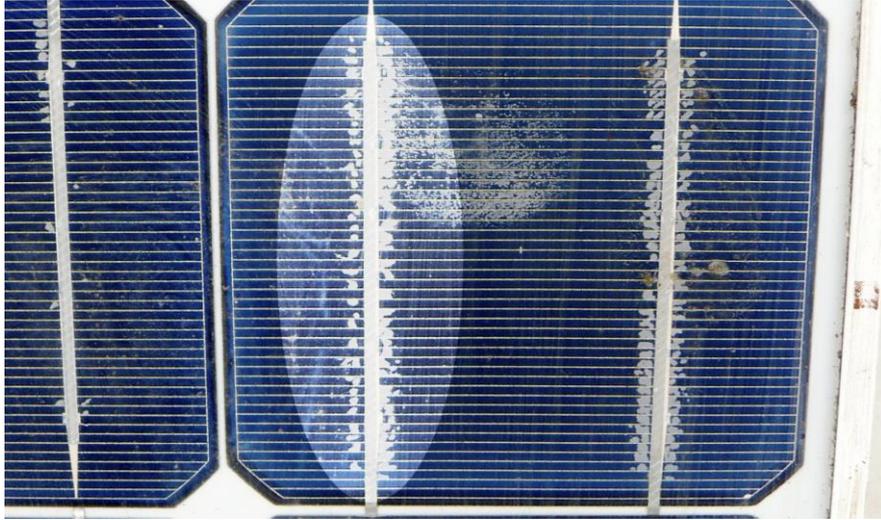
Holes and bloats in backfoil

CELL CONDITION

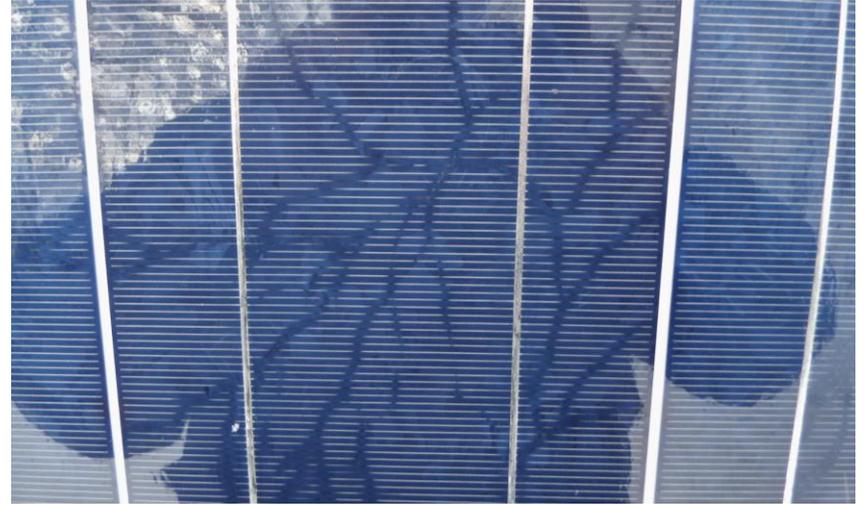
REUSE FOR LV RAHB if there are

- “snail trails”, i.e. thin lines on the cells
- delaminations on busbars

No repair required



Delamination on busbars



Snail Trails

4. CELL INSPECTION

High or Low Volt

ELECTROLUMINESCENCE TEST (EL)

- shows via an “X-ray” the physical condition of the wafer cells, for example microcracks which are not visible by the eye
- this affects safety of higher voltage strings, as microcracks can become more severe over time

ELECTROLUMINESCENCE TEST (EL)

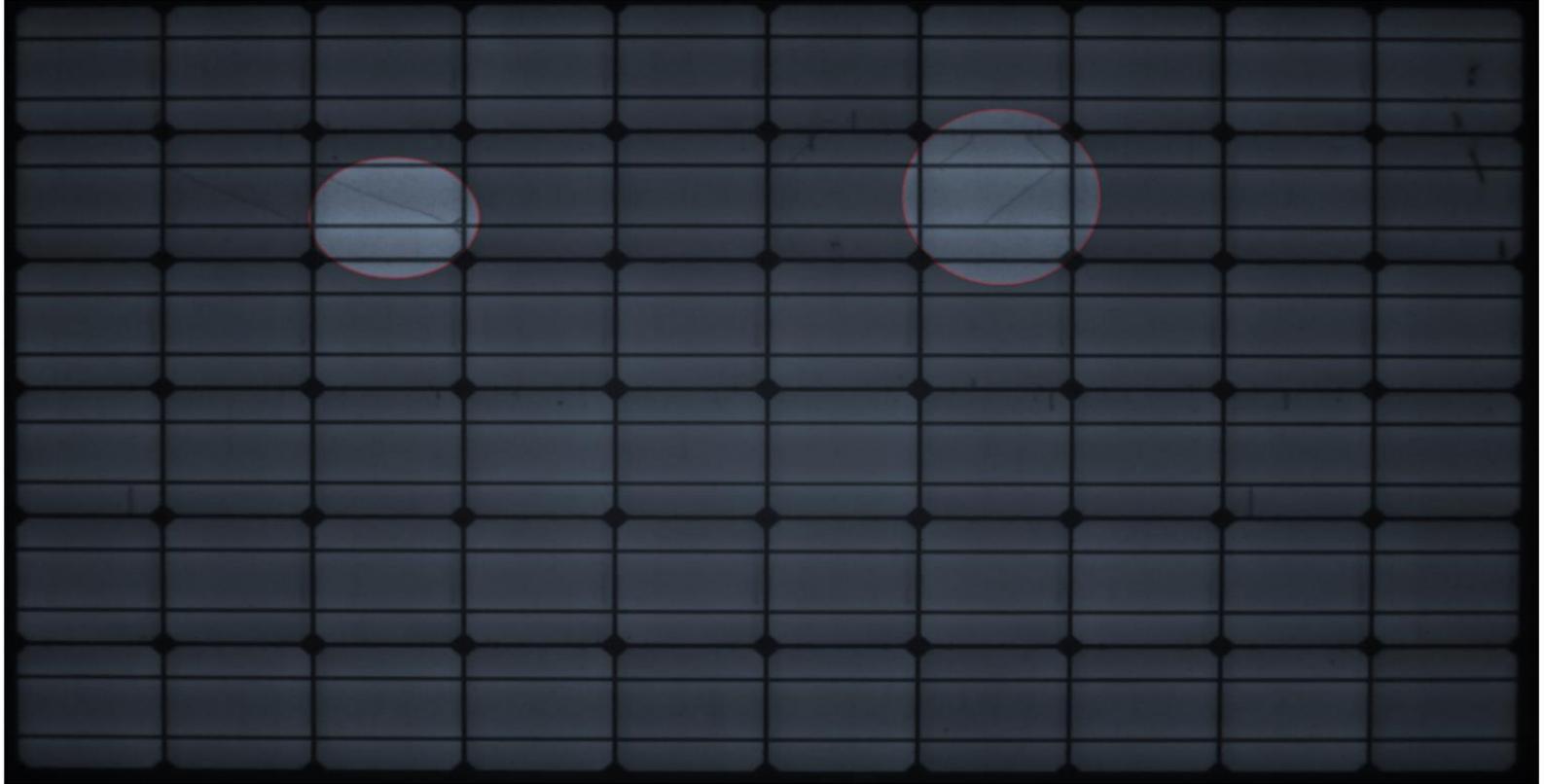
RECYCLE if

- Cells show severe defects*

REPAIR FOR LV REHAB if

- Cells show moderate yet noticeable defects*

*this rating is difficult to objectify and requires training through an experienced professional



Electroluminescence photo of module with microcracks

FLASH TEST

- indicates actual capacity of the used module, which is necessary for larger strings, because the modules should be as homogenous as possible for maximum output (one module with lower capacity affects the whole string performance)
- only with knowledge on actual remaining power output can rehabilitated modules be compared against new modules for cost competitiveness

FLASH TEST

RECYCLE if

- Remaining power output is below LV rehab requirements*

REUSE FOR LV REHAB if

- Remaining power output is below HV rehab requirements*

*the required minimum power output is set by the rehabilitation agent and depends on **1) functionality**: if the module shows a remaining power output which is lower than explainable through degradation it likely suffers from other defaults which haven't been discovered until this step and **2) financial viability**: the threshold of cost competitiveness against new modules indirectly depends on the remaining power output

4. SIMPLE ELECTRICAL INSPECTION*/** & FINAL SORTING

*only if step 3 and 4 were not performed on the modules

** SunCrafter recommends to only use the simply rehabilitated modules in low-voltage DC use cases

MODULE PREPARATION*

1. Clean front of the panel of all pollutants, e.g. dust, sand, moss, etc.
2. Check the label of the module (on the back side) for “**Max. Power Voltage (V_{mp})**” and “**Short Circuit Current (I_{sc})**” and note them down to compare
→ If there is no label, find a module of similar build (height, width, weight, cell count, look) with a label to compare those parameters
3. Place the module in direct sunlight at 90 degree angle, without any shade falling on the front

CURRENT (I) MEASUREMENT: I_{sc}^*

- Measure current with DC clamp meter

REUSE FOR LV REHAB If

The Short Circuit Current (I_{sc}) corresponds to label

RECYCLE if

problem remains as then either a busbar or wafer defect is to be expected

VOLTAGE (U) MEASUREMENT: V_{mp}^*

1. Measure voltage with DC clamp meter with voltmeter
2. If the voltage on the meter corresponds to the voltage on the label (V_{mp}), proceed to the next slide
3. If U is considerably less than on the original label (consider $\frac{1}{3}$ less than on the label), change diodes to standard Schottky-diodes & re-measure
4. If U is still low, check if diodes are correctly inserted, measure connector against 0
5. If the problem remains, the busbar is faulty → use module only for low voltage cases, e.g. USB charging

REUSE FOR LV REHAB if problem remains, as then probably the busbar is faulty

FINAL STEPS

1. Label the modules according to the electrical parameters you measures previously
2. Sort the modules according to dimensions, type and electrical parameters
3. Stack the modules according to dimensions, type and electrical parameters. -
 - Only homogenous modules can be put together in one string. Therefore package HV capable modules with a +/-2% deviation from the reference module.
 - To enable performance oriented pricing package LV capable modules with a +/- 5% deviation from the reference module.
4. Package,label, store and transport carefully

1. EQUIPMENT

For the following steps, you will need this equipment:

Simple Rehabilitation

- DC clamp meter incl. voltmeter
- Crimping pliers, needle-nose pliers, combination pliers
- Small flathead screwdriver
- MC4 cables and MC4 plugs (cable connector)
- EVA repair foil with heat resistance up to 95°C
- Standard Schottky-diodes

Qualified Rehabilitation

- Electroluminescence test machine
- Flash test system

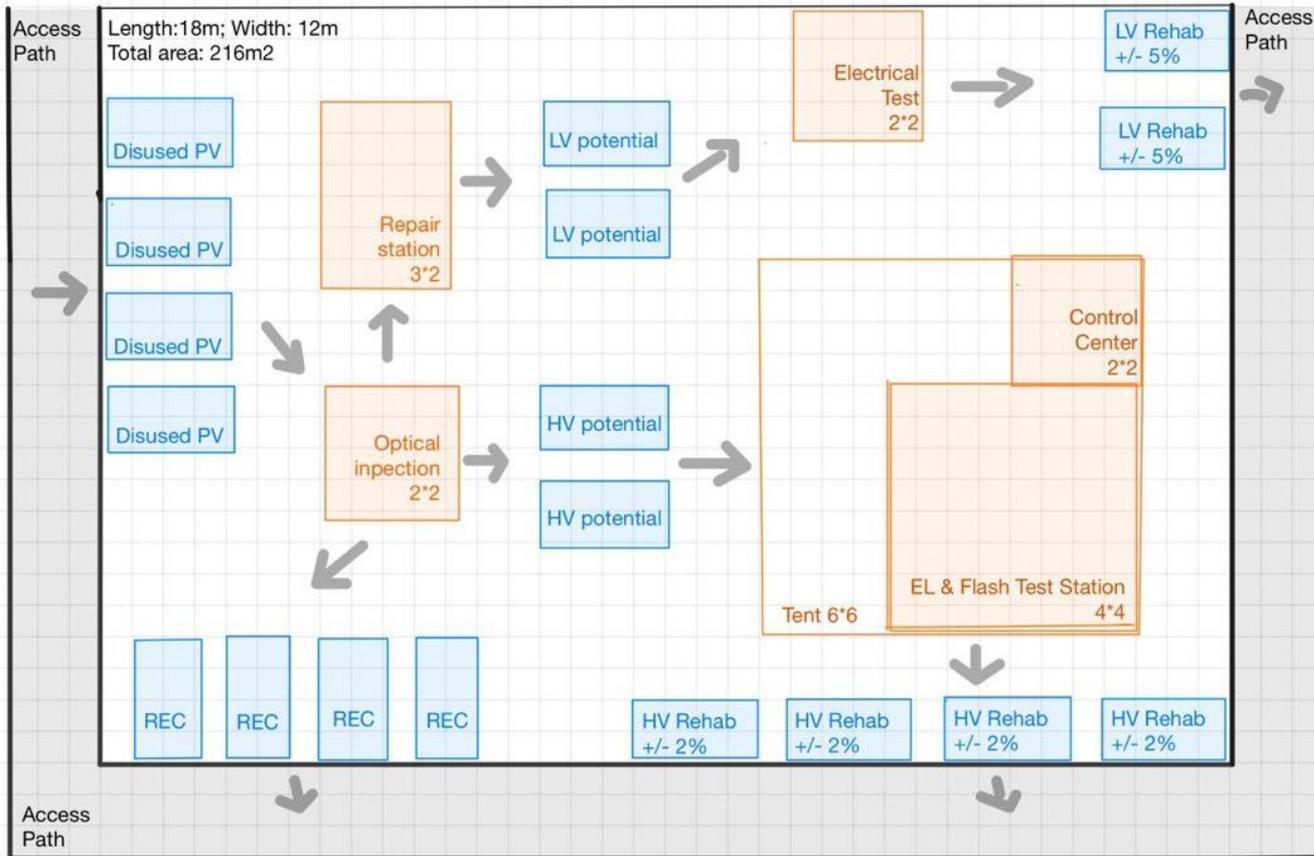
2. HEALTH & SAFETY

Required Safety Equipment per Worker

- Gloves
- Safety Shoes
- Long Work Pants
- Long Work Shirt
- High Visibility Vest
- (Safety Goggles)

FACILITY LAYOUT

Proposed layout for outdoor testing facility on site



- assuming an average of 3000 disused modules arriving for treatment annually
- accounting for two types of rehab modules: LV & HV capable
- assuming 50% going into LV rehab & 50% into HV rehab
- assuming a total rehabilitation rate of 60%

FINANCIAL VIABILITY

Rehabilitation cost model

Under which circumstances is the rehabilitation of disused solar PV modules economically viable?

The economic model is based on the following input variables:

- Equipment cost for assessment and rehabilitation incl. maintenance (cFix & cQuasifix)
- Labour* and parts needed for assessment, repair and rehabilitation (cVar)

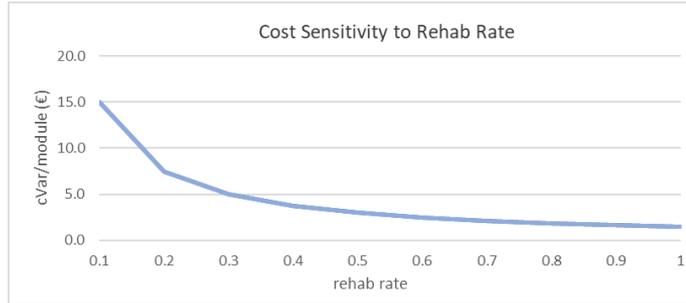
The rehabilitation cost per panel is supposedly *sensitive* to two factors:

- Rehabilitation rate (successfully rehabilitated modules/ all modules entering process)
- Rehabilitation volume (number of modules entering rehabilitation process)**

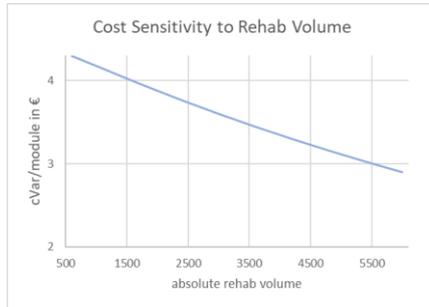
*Assumed labour cost based on following qualification requirements and wage standards for Ghana: 900 GHS qualified electrician (EQF5), 600 GHS electrician in training (EQF2); annual work days: 226

**6000 modules assumed to arrive at plant annually, 50% of them following the HV rehabilitation path, 50% the LV rehab path

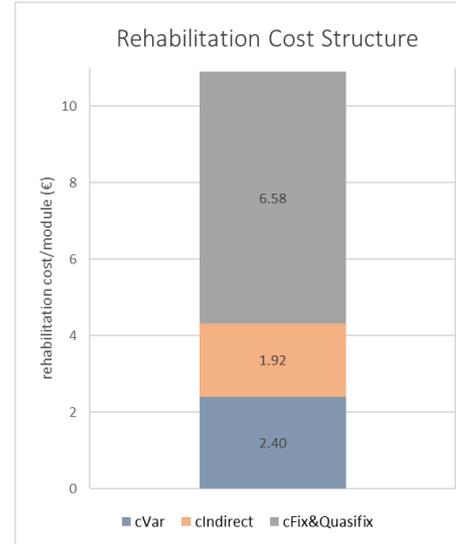
Rehabilitation cost structure



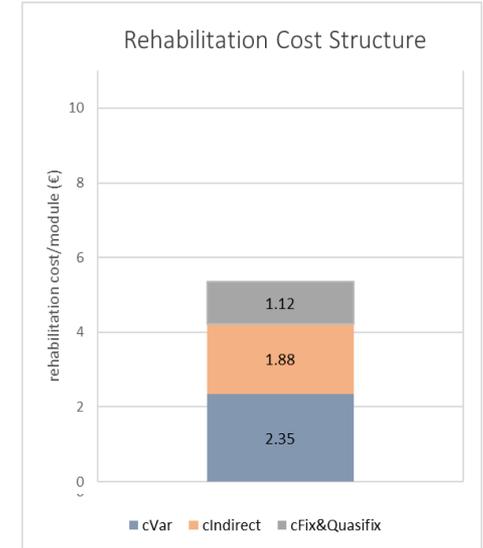
Sensitivity to rehabilitation rate lower than in Europe as the labour cost are lower



Sensitivity to rehabilitation volume for an assumed output elasticity factor of 0.95



Rehabilitation cost for HV capable module: 10.90€



Rehabilitation cost for LV capable module: 5.35€

LCOE comparison

Economic viability = LCOE parity

Module AGE is the determining factor as it influences

- original power output of disused module
- remaining power output after degradation
- relative power density compared to new modules
- remaining lifetime influencing remaining generation and WACC

One more factor is the share of area dependent BOS cost as the lower the power density the higher the area dependent BOS cost

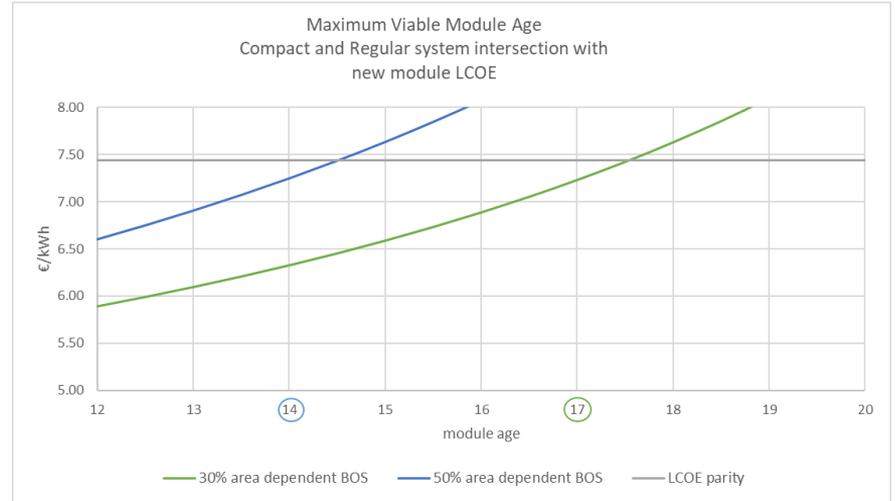
- regular system e.g. roof mounted, grid connected: 50% area dependent BOS cost
- compact system e.g. standalone, off-grid: 30% area dependent BOS

LCOE comparison

Economic viability sensitive to module age and share of area dependent BOS cost.

Maximum viable module age for rehabilitation

- Regular system: 14 years
- Compact system: 17 years



Older modules are not worth rehabilitating as the cost of electricity per kWh generated would be higher than compared to new modules.

Potentially the lower upfront cost for the second life system are still a financial incentive to rehabilitate even older modules, especially if the discount rate/interest for the upfront investment is high

ANALYSIS OF USE CASES FOR 2ND LIFE SOLAR MODULES

by SunCrafter GmbH

Contents

Introduction	2
Use cases for higher voltage systems	3
Use cases for lower voltage systems	5

Abbreviations

A	Ampere
c-Si	Crystalline silicon
DC	Direct current voltage
kWh	Kilowatt hour
kWp	Kilowatt peak
LCOE	Levelized cost of electricity
LEV	Light electric vehicles
MW	Megawatt
SELV	Safety extra low voltage
V	Volts
W	Watt
Wh	Watt hour
Wp	Watt peak

1. Introduction

The Ghanaian solar sector is growing rapidly, the current installed capacity of about 75 MW is supposed to increase to 1360 MW by 2030, according to the Ghanaian government targets. This means a lot of crystalline silicon (c-Si) solar modules are flooding the country with yet no means to effectively and formally recycle or reuse the waste. Despite the average use time of 20 years of a solar plant, a high volume of panels will already be decommissioned within this timeframe because of defects or damage cases. In many cases, though, the defects are minor and the panels can still be used in other applications, mostly in smaller installations. For the analysis of use cases for second life c-Si solar modules, a division into "use cases for less than three modules (lower voltage)" and "use cases for more than three modules (higher voltage)" is sensible, as the modules used for the various cases demand varying performance parameters.

For higher voltage cases, where several modules are interconnected in a string, together forming a higher capacity and higher voltage, the modules have to be "in better shape". This means the modules should have very little damage, contain their original parts, especially concerning diodes, and be very similar to each other in build and electrical parameters, such as voltage and current. Here, it is also necessary to perform more rigorous testing, with the specialized equipment called electroluminescence test system and flash test device, in order to ensure safety and avoid electrical fires. In lower voltage use cases, the module quality does not have to be as impeccable as in the higher voltage cases, because safety is more ensured through the lower voltages. Anything below 60 volts is considered lower voltage, specifically "safety extra low voltage" (SELV), anything above 60 volts is considered higher voltage in these cases.

For this analysis, the higher voltage scenarios will be shortly illuminated as a whole with a few examples, while the main focus lies on the SELV uses, because this is where the case for second life is stronger, as the requirements for modules are lower and space is not as much of a constraining factor.

2. Use cases for higher voltage systems

In order to use second life modules for string systems with a higher voltage than 60 volts, meaning anything more than three modules, the panels have to be very similar in type, dimensions and electrical performance. This means, the first hurdle to overcome for these scenarios is to have a sufficient amount of well-kept, homogenous modules. Additionally, the panels for these scenarios need to be tested more diligently for microcracks, which are not visible by eye, via the electroluminescence process. If there is a high amount of cracks in the cells, changing weather conditions would cause them to become more severe and in the worst case lead to an electrical fire. Moreover, since similar electrical parameters are important, as an underperformance of one module can inhibit the entire string, a flash test should also be conducted to gather the most precise performance data of each module. If these preliminaries are all given, the modules can be used in a standard higher voltage power generation process.

I) A classic application for a higher voltage case are rooftop installations. Depending on the size of the rooftop and/or the demand of the user, a set amount of modules are connected, mounted on the roof, equipped with an inverter, a battery and other components. For a household, a typical installed capacity is less than 10 kWp. Because there is limited space on a rooftop, where the panels should ideally face south in the Northern hemisphere, only the best performing modules should be used, with at least 200 Wp remaining capacity. Putting together a string of 5 modules would then equal 1 kWp, which in turn generates between 1350 kWh in Southern Ghana to 1650 kWh in Northern Ghana¹. Data from the World Bank suggest the per capita electricity consumption in Ghana amounts to 351 kWh annually², so that such a solar array could meet the demand of roughly 3,8 people in Southern to 4,7 people in Northern Ghana (excluding rebound effect), while the average household size in Ghana is 4.5 people.

Concerning competitiveness to new modules, according to project partner Don Bosco, new solar modules in Ghana costs about 0,34€/Wp and it is highly probable that used modules will cost less than half of that. The more meaningful indicator to compare cost competitiveness between new and 2nd life modules in a such a use case though is LCOE parity³. A model to calculate and compare the LCOE of new and rehabilitated modules of different ages and conditions has been developed by SunCrafter prior to this project and can be applied when favorable.

II) Another sensible use case for the rehabilitated modules is solar-powered cooling. Solar-powered cooling refers to powering devices such as refrigerators, freezers,

¹ PVGIS Ghana: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html#!

² World Bank Data: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC?locations=GH>

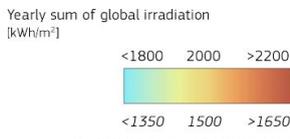
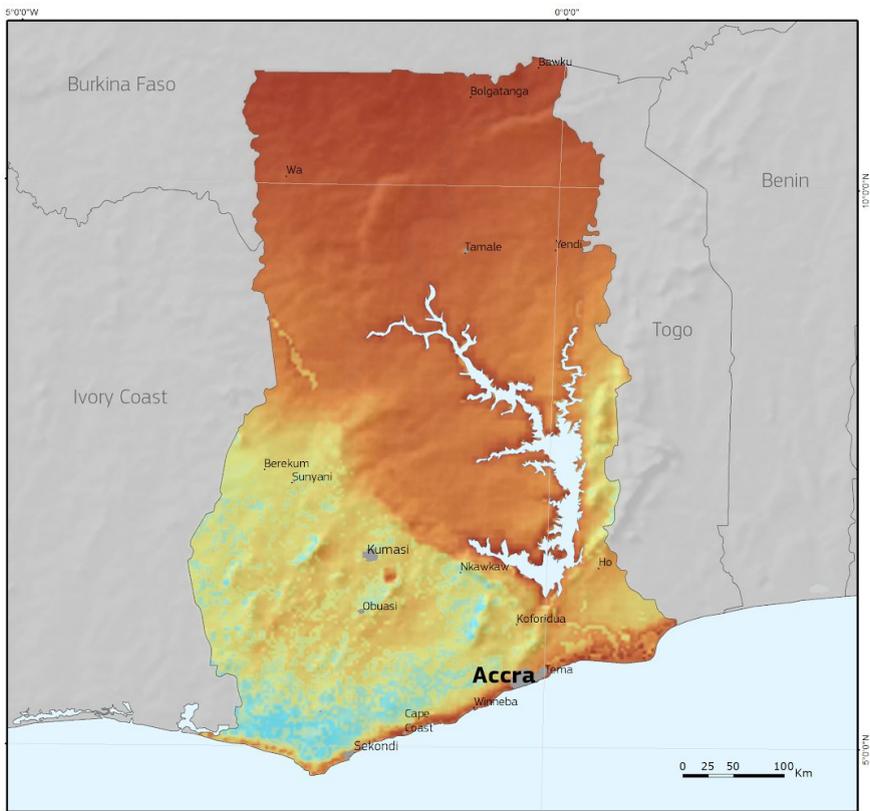
³ Levelized cost of electricity are the costs per energy unit (e.g. kWh) of a power generating system (e.g. solar system)

ventilators, and air-conditioners. It can be used to conserve produce or medicine/vaccines in areas with unreliable or no access to grid electricity is available. Remote health posts and small shops could largely benefit from such a solar system, as they can often supplement or even substitute diesel generators. Using solar power here is especially sensible, as the need for cooling directly correlates with the intensity and prevalence of sunlight. A 2 kWp array (e.g. using 10x 200Wp second life modules) with a storage unit can power a small remote health clinic independent of a grid connection or diesel generators. Considering that space is often not a constraint in remote areas, it would even be possible to build the array with modules of slightly less capacity, such as 12x 180 Wp 2nd life modules.



Global irradiation and solar electricity potential
 Optimally-inclined photovoltaic modules

GHANA



Yearly sum of solar electricity generated by 1kW_p system with performance ratio 0.75 [kWh/kW_{peak}]



Authors: Thomas Huld, Irene Pinedo-Pascua
 European Commission - Joint Research Centre
 Institute for Energy and Transport,
 Renewables and Energy Efficiency Unit
 PVGIS <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

3. Use cases for lower voltage systems

Safety extra low voltage (SELV) use cases refer to systems of three panels or less, together totalling not more than 60 volts, as this is an extremely safe voltage to handle, especially for people without much electrotechnical know-how. Yet, for many daily appliances this voltage and capacity of the module(s) will supply enough electricity to function.

I) Micro e-mobility is currently revolutionising the way hundreds of millions of people move within cities. With access to shared light electric vehicles (LEV), people can travel directly and fast between local destinations without the aid of a car or high initial capital investment. The problem is that as these vehicles are electric, they are dependent on regular access to electricity to recharge. In urban areas, bureaucratic and financial hurdles of laying a grid connection for charging stations is a major obstacle in the e-mobility transition, while providing such a grid connected network in most rural regions is viably almost unimaginable.

In both rural and urban areas, the implementation of decentralised solar powered charging stations could provide the necessary infrastructure for shared and private LEVs to become a viable mode of transport. LEVs, such as e-bikes and e-scooters, have an integrated battery which is charged with a DC voltage generally between 36V and 42V. A standard e-bike battery has a capacity of 500Wh and is charged with 42V 2A (84W). A small 200Wp solar system (single panel), could generate enough electricity in 2.5 hours of peak sun to charge the battery from 0% to 100%, the equivalent of up to 160 km of emissions-free travel⁴. Up to two e-bikes could charge simultaneously per station.

Basic electronic components of a charging station:

- Solar panel (>200Wp, >30V is recommended)
- Battery pack (24V is optimal for efficiency)
- Charge controller (24V, >8A)
- DC/DC converter (24V to 36V or 42V)
- DC/DC charging adapter for vehicle

Vehicles that can be charged:

- e-bikes
- e-scooters
- e-rollers (larger PV and battery capacity require)

II) A common use case for solar energy in sub-Saharan Africa is the Solar Home System, where off-grid solar systems are used to power light, charge phones and even bigger devices such as TVs. Especially for homes without any or with unreliable electricity access, these systems can bring great relief. A single module

⁴ <https://www.bosch-ebike.com/en/service/range-assistant/>

with a remaining capacity of 100W, for example, can create a “plug&play” system, where devices are charged directly from the module. On average, this would generate 0,4 kWh per day⁵, which sounds little, but is enough to charge about 10 smartphones per day (a common smartphone needs about 10Wh per charge). Similarly, other battery-powered devices or power banks can be charged during the day to store power for nighttime, when no solar power is available. In case the voltage of the used module does not correspond to the initial one from the label anymore, it can still be used by retrofitting it to work without inverter, with a direct current voltage output that can power USB-devices such as phones, as long as the remaining voltage is at least 5 volts.

Other than as a home use, this case can also be applied as a business case for small shops, where the amount of chargeable devices can be easily scaled by adding more solar modules.

III) Moreover, remote households and farms can use the modules for solar water pumping and irrigation systems. Here, a submersible pump is usually used to bring ground water from varying well depths to the surface. Depending on the type of pump, well depth and water required the system can have different dimensions. If the system is to remain DC-operated (with direct connection from solar module without inverter), which works best with second life modules, the application will be comparably smaller.

A system that runs on 24V is powerful enough for a well-depth up to 16 meters, which covers the depths in many areas of Ghana. So the chosen module should either have at least 24V or this can be achieved by connecting two modules with 12V or other combinations, or a DC/DC converter can be used. In any case, a charge controller with 24V, 40A will also be necessary. The smallest system with a 200Wp panel can deliver up to 500 litres per hour at a depth of 1.8 metres. Increasing capacity to 500Wp increases depth up to 7.6 meters while delivering about the same flow rate as before. With an 800 Wp system, however, both flow rate and depth increase to 1440 litres per hour and 16.4 meters, respectively.

These options are only some of the possibilities to use small-scale SELV solar applications, but the overall parameters for them are the same: voltage below 60V, capacity below 1000 Wp and often used to power battery-enabled devices, so that the energy generated only by day can be stored for later use. More applications with these parameters can be thought of, either for community use, business cases or private applications, where the affordability and sustainability of a second life module is especially sensible.

⁵ at an average 1500 kWh/kWp annually in Ghana