

Swiss PV Circle

Arbeitspaket 2 – Geschäftsmodell

Leitfaden Wiederverwendung für Installationsbetriebe

Arbeitspaket-Nummer	AP2
Arbeitspaket-Titel	Geschäftsmodell
Arbeitspaket-Lead	SENS eRecycling
Deliverable-Nummer	AP2-2
Deliverable-Name	Leitfaden Wiederverwendung für Installationsbetriebe
Status	Finaler Bericht
Autor:innen	Roger Nyffenegger
Verbreitungsebene	Öffentlich
Veröffentlichungsdatum	16.06.2025

Inhalt

1. Ausgangslage	2
2. Vorgehen Wiederverwendung	3
2.1 Wirtschaftliche Einschätzung	4
2.2 Technische Einschätzung	4
2.3 Test- und Demontageverfahren	5
2.4 Weiterführende Tests	7
Literatur	9

1. Ausgangslage

Die Wiederverwendung von PV-Modulen und -Anlagen ist in der Schweiz bislang weder systematisch etabliert noch weit verbreitet. Zwar gibt es lokale Akteure, die demontierte, noch funktionsfähige PV-Module und -Komponenten nach bestem Wissen und Gewissen lokal wiederverwenden, jedoch bleibt dies die Ausnahme. In den kommenden Jahren ist jedoch mit deutlich höheren Mengen an PV-Modulen zu rechnen, die das Ende ihres ersten Lebenszyklus erreichen und für die Wiederverwendung geeignet sind (siehe Deliverable 3.1).

Vor diesem Hintergrund haben der Branchenverband Swissolar und das Rücknahmesystem SENS eRecycling sich im Rahmen des Projekts Swiss PV Circle entschieden, die Wiederverwendung in der Schweiz zu fördern. Um eine standardisierte Herangehensweise innerhalb der Branche zu etablieren, wurde dieser Leitfaden hier entwickelt, der sich speziell an Installationsbetriebe widmet. Er soll das Bewusstsein für das Thema Wiederverwendung schärfen und betroffenen Akteuren praxisorientierte Handlungsempfehlungen für den Umgang mit wiederverwendbaren PV-Modulen bieten.

Der Leitfaden ist chronologisch aufgebaut und beschreibt das Vorgehen einer Wiederverwendung von PV-Modulen (siehe Abbildung 1). Zunächst werden die wesentlichen Aspekte einer wirtschaftlichen Einschätzung des Wiederverwendungspotenzials erläutert (Kap. 2.1), gefolgt von einer technischen Einschätzung (Kap. 2.2). Anschliessend werden die Test- und Demontageverfahren vor Ort beschrieben (Kap. 2.3). Im letzten Schritt liegt der Fokus auf weiterführenden Tests, einschliesslich Reinigung, Prüfung und Reparatur (Kap. 2.4). Dieser strukturierte Ansatz soll Installationsbetriebe dabei unterstützen, die Wiederverwendung von PV-Modulen ins Auge zu fassen und bestenfalls als valable Alternative zum Recycling zu etablieren.

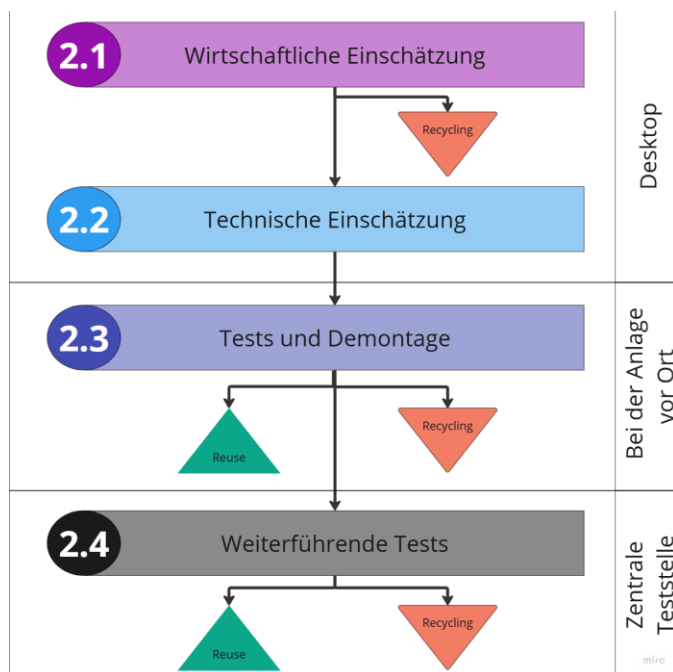


Abbildung 1: Vorgehen zur Wiederverwendung von PV-Modulen.

2. Vorgehen Wiederverwendung

Wenn Installationsbetriebe mit potenziell für die Wiederverwendung geeigneten PV-Modulen konfrontiert sind, stellen sich verschiedene wirtschaftliche, technische und prozessuale Fragen, welche wir hier adressieren möchten. Ein detaillierter Entscheidungsbaum (Abbildung 2) hilft dabei, einen schnellen Überblick über diese Fragen zu erhalten.

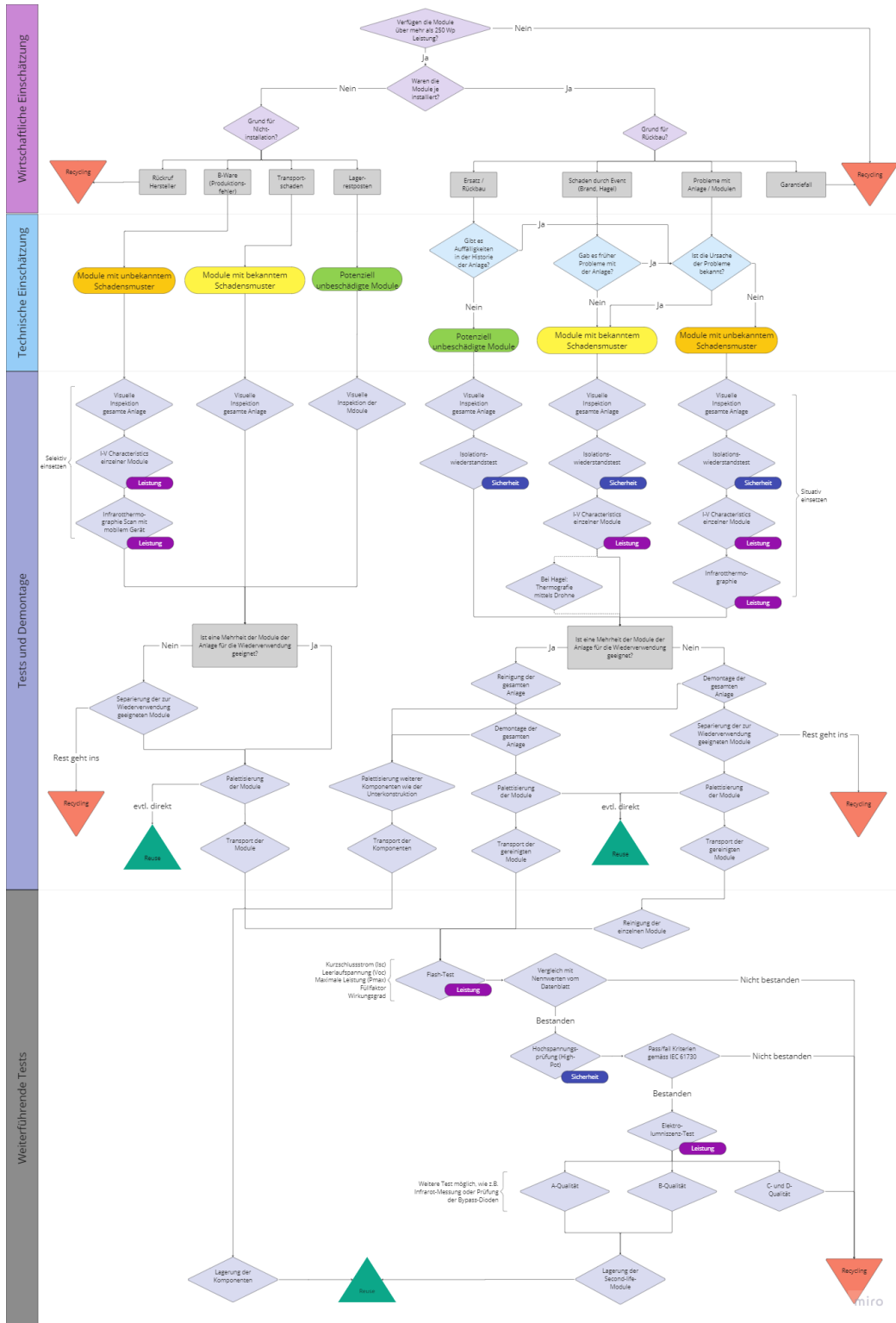


Abbildung 2: Entscheidungsbaum Wiederverwendung.

2.1 Wirtschaftliche Einschätzung

Vor der Demontage sollte zuerst das wirtschaftliche Potenzial einer Wiederverwendung von PV-Modulen oder der gesamten PV-Anlage bewertet werden. Diese Einschätzung ist entscheidend zur Sicherstellung der Rentabilität der Wiederverwendung. Die zentrale Frage ist, ob gebrauchte Photovoltaik-Module auf dem Markt Abnehmer finden. Dies hängt massgeblich von ihrer verbleibenden Nennleistung sowie ihrer Nutzungshistorie ab, insbesondere davon, warum sie zur Wiederverwendung angeboten werden. Wie die allgemeine Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (siehe Deliverable 2.1) zeigen, kann auch eine Wiederverwendung von weiteren Komponenten (Unterkonstruktion, Kabel, Elektroinstallation, Beschwerung) eine wichtige Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit eines Projekts haben.

Idealerweise ist der neue Installationsort bereits vor der Demontage bekannt. Dies erleichtert die Planung, da so die Anzahl der benötigten Module, die Wiederverwendung weiterer Komponenten wie der Unterkonstruktion und die Preissensibilität der zukünftigen Eigentümer:innen bei der Auswahl des geeigneten Testverfahrens berücksichtigt werden können.

Als Richtwert empfehlen wir, ausschliesslich Module mit einer Nennleistung von mehr als 250Wp für die Wiederverwendung in Betracht zu ziehen (siehe Abbildung 2). Module mit dieser Leistung sind in der Regel nicht älter als 15 Jahre. Andere europäische Wiederverwendungsakteure haben ähnliche Kriterien in Bezug auf Leistung und Alter.

Zudem ist es für die wirtschaftliche Bewertung essenziell zu wissen, warum ein Modul überhaupt für die Wiederverwendung verfügbar ist. Dabei gibt es verschiedene Gründe. Grob können Module in zwei Kategorien eingeteilt werden: nie installierte und bereits installierte, aber frühzeitig deinstallierte Module (siehe Abbildung 2).

- Nie installierte Module können aus Lagerrestbeständen stammen, beim Transport beschädigt worden sein, als B-Ware mit leichten Produktionsfehlern deklariert oder durch den Hersteller zurückgerufen worden sein.
- Bereits installierte Module können beispielsweise aufgrund einer Anlagenerweiterung oder eines Anlagenaustauschs (Re-Powering) rückgebaut worden sein, durch externe Einflüsse wie Hagel oder Feuer teilbeschädigt sein, als Garantiefall zurückgebaut oder sonstige Probleme vorweisen, die zum frühzeitigen Rückbau geführt haben.

Basierend auf diesen Gründen, können unterschiedliche Schlussfolgerungen bezüglich des Wiederverwendungspotenzials sowie des nötigen Testverfahrens und der damit verbundenen Kosten gezogen werden. Beispielweise wird bei Modulen, welche vom Hersteller zurückgerufen wurden oder bei Garantiefällen die Wiederverwendung nicht empfohlen. Solche Module erfüllen die Qualitäts- oder Sicherheitsanforderungen des Herstellers nicht mehr.

2.2 Technische Einschätzung

Vor der Demontage sollte eine technische Einschätzung vorgenommen werden. Dabei ist es ratsam, die Performance- und/oder Monitoring-Daten der Anlage aus dieser Zeit zu analysieren. Dabei stellen sich zwei Fragen (siehe Abbildung 2):

- Weist die Anlagenhistorie Auffälligkeiten auf? Dies können beispielsweise längere Phasen mit verminderter oder fehlender Leistung, aber auch einzelne Ausreisser-Strings sein. Dabei gilt es die

Leistungsverlustrate (performance loss rate, PLR) über Zeit zu prüfen, wo über längere Zeit beobachtete Abweichungen zwischen dem tatsächlichen und zu erwartenden Leistungsverlust auf bisher unbekannte technische oder betriebliche Probleme hindeuten können. Über die Wechselrichterdaten können ausserdem bisher unbekannte Isolationsprobleme identifiziert werden.

- Wies die Anlage früher Probleme oder Ereignisse auf, die bereits identifiziert und gegebenenfalls behoben wurden? Solche historischen Ereignisse können je nach Art und Behebung einen Einfluss auf die Eignung zur Wiederverwendung haben. Hierbei können Ereignisse wie Unwetterschäden zum Beispiel infolge Hagel, überdurchschnittliche Teilverschattungen durch Vegetation, starke Verschmutzung oder andere Probleme eine Rolle spielen. Bei der Bestimmung der Probleme und Ereignisse können Fehler- und Wartungsprotokolle helfen (siehe Deliverable 2.3)

Am Ende der technischen Einschätzung können die Module einer Anlage in folgende Kategorien aufgeteilt werden (siehe Abbildung 2):

1. potenziell unbeschädigt
2. mit einem bekannten Schadensmuster
3. mit einem unbekanntem Schadensmuster

Diese Erkenntnisse beeinflussen die nachfolgenden Testverfahren. Bei Modulen, die nie installiert waren, gestaltet sich die technische Einschätzung einfacher. Lagerrestposten können in der Regel als potenziell unbeschädigt betrachtet werden. Module mit Transportschäden weisen ein bekanntes Schadensmuster auf, während Module mit kleineren Produktionsfehlern (B-Ware) ein unbekanntes Schadensmuster aufweisen können.

2.3 Test- und Demontageverfahren

Vor der Demontage der PV-Anlage sollten in einem nächsten Schritt vor Ort Abklärungen vorgenommen werden. Dabei kann die Dokumentationsvorlage aus dem Projekt Swiss PV Circle verwendet werden (siehe Deliverable 2.3). Dabei gilt der Grundsatz, den Testumfang auf das notwendige Minimum zu reduzieren, aber gleichzeitig die Sicherheit und Qualität der Module sicherzustellen. Daher unterscheidet sich der Testumfang je nach Klassifizierung der Module – potenziell unbeschädigt, mit bekanntem Schadensmuster oder mit unbekanntem Schadensmuster – im Umfang und somit auch bezüglich des Zeit- und Kostenaufwandes (siehe Abbildung 2). Ebenso wird empfohlen, Umfang und Art der durchgeführten Tests den Bedürfnissen der nächsten Eigentümer:innen anzupassen.

Potenziell unbeschädigte Module

Bei potenziell unbeschädigten Modulen wird eine visuelle Inspektion der Module und der restlichen Anlagenkomponenten empfohlen. Gegebenenfalls können sich zusätzliche Isolationswiderstandstests auf Anlagen- oder String-Ebene lohnen (IEC 61730-2:2023, IEC 62446-1:2016). Bei PV-Anlagen mit einer Nennleistung von bis zu 10kWp ist der Isolationswiderstand mit der in Tabelle 1 angegebenen Prüfspannung zu messen. Das Ergebnis ist zufriedenstellend, wenn jeder Stromkreis einen Isolationswiderstand aufweist, der nicht unter dem entsprechenden Wert in Tabelle 1 liegt.¹ Für Anlagen mit einer Nennleistung von über 10kWp kann der gleiche Test auf String-Ebene durchgeführt und anhand der gleichen Zielwerte bewertet

¹ Tsanakas et al., "Toward Reuse-Ready PV"; van der Heide et al., "Re-Use of PV Modules: Progress in Standardisation and Learnings from a Real Case Study."

werden. Der Isolationswiderstandstest ist von entsprechend den geltenden Normen qualifiziertem Personal durchzuführen.

Tabelle 1: Minimumwerte für Isolationswiderstandstest

Maximale Systemspannung (berechnet nach IEC 62548) V	Prüfspannung V	Minimaler Isolationswiderstand MW
<120	250	0.5
120 bis 500	500	1
500 bis 1'000	1'000	1
1'000 bis 1'500	1'500	1

Sollte die visuelle Inspektion sowie der Isolationswiderstandstest bei potenziell unbeschädigten Modulen positive Ergebnisse liefern, kann eine direkte Wiederverwendung in Betracht gezogen werden, ohne dass weiterführende Tests (siehe Kap. 2.4) erforderlich sind. Dies ist vor allem bei Modulen der Fall, die im Zuge einer Anlagenerweiterung oder eines Anlagenaustauschs (Re-Powering) demontiert werden und gemäss den technischen Einschätzungen keine unbekannt Schädigungen aufweisen. Optional kann es sinnvoll sein, einzelne Module stichprobenartig den weiterführenden Tests zu unterziehen.

Module mit bekanntem Schadensmuster

Auch das Testverfahren bei Modulen mit bekanntem Schadensmuster startet mit einer visuellen Inspektion sowie einem Isolationswiderstandstest. Zusätzlich sollten die Strom-Spannungs-Kennlinien einzelner Module oder Strings mit einem tragbaren Messgerät geprüft (IEC 61829:2015) und mit den ursprünglichen Datenblattwerten verglichen werden (IEC 60891:2021), soweit diese es ermöglichen, das erwartete Schadensmuster zu identifizieren.

Handelt es sich beim Schadensmuster um Hagelschäden, empfiehlt es sich, eine Infrarot-Thermografie, zum Beispiel mit einer Drohne, durchzuführen (IEC TS 62446-3:2017), um Hotspots zu identifizieren, die Module für die Wiederverwendung ungeeignet machen. Sicherlich ungeeignet sind Module mit Hotspot(s), wo der Temperaturunterschied zwischen dem Hotspot und den angrenzenden Bereichen des Moduls mehr als 40°C beträgt². Auch empfiehlt es sich, alle Module mit bekanntem Schadensmuster in weiterführenden Tests individuell zu prüfen (siehe Kap 2.4).

Module mit unbekanntem Schadensmuster

Bei Modulen mit unbekanntem Schadensmuster wird eine umfassendere technische Einschätzung empfohlen. Dazu gehören neben der visuellen Inspektion, dem Isolationswiderstandstest und der Prüfung der Strom-Spannungs-Kennlinie einzelner Module auch eine Infrarot-Thermografie-Untersuchung einzelner Module mit einem portablen Gerät (IEC TS 62446-3:2017). Module mit unbekanntem Schadensmuster sollten immer individuell in weiterführenden Tests getestet werden (siehe Kap. 2.4).

² van der Heide et al., "Re-Use of PV Modules: Progress in Standardisation and Learnings from a Real Case Study."

Die verschiedenen Testverfahren gilt es situativ und je nach individuellen Gegebenheiten anzuwenden. Die situative Anwendung dieser Tests basiert dabei auf der zuvor durchgeführten wirtschaftlichen und technischen Einschätzung sowie der visuellen Inspektion vor Ort. Wenn die gesamte Anlage oder ein Grossteil der Module für die Wiederverwendung infrage kommt, kann es finanziell sinnvoll sein, die Module bereits vor der Demontage vor Ort zu reinigen. Dies hängt davon ab, ob die Reinigung im installierten Zustand möglich und effizient ist, sowie von den Reinigungskapazitäten der Organisation, welche die Wiederverwendung durchführt. Je weniger Module für die Wiederverwendung geeignet sind, desto weniger sinnvoll ist eine Reinigung vor Ort. Nicht wiederverwendbare Module, die dem Recycling zugeführt werden, sollten klar gekennzeichnet werden, um sie einfach von den wiederverwendbaren Modulen trennen zu können. Die Ausserbetriebnahme einer Anlage sollte bei Pronovo gemeldet werden (siehe Deliverable 2.3).

Die wiederverwendbaren Module gilt es danach sorgfältig, mit der Glasfläche nach oben, idealerweise auf Spezialpaletten, welche über die Modulränder hinausragen, für den Weitertransport zu stapeln. Wenn EURO-Paletten verwendet werden, empfiehlt es sich, die Module quer zu stapeln, damit die Module auf dem Rahmen aufliegen. Pro Palette sollten nicht mehr als 30 Module übereinandergestapelt und diese mit Zurrgurten befestigt werden. Optimalerweise werden schützende Stapelhilfen aus Karton, Plastik oder ähnlichen Materialien verwendet, insbesondere um die Ecken zu schützen. Auch andere Anlagenkomponenten wie Unterkonstruktionen, Kabel, Befestigungen, Ballast und Ähnliches sollten für die Wiederverwendung in Betracht gezogen und entsprechend palettiert werden. Je mehr Komponenten wiederverwendet werden, desto höher ist der ökonomische und ökologische Nutzen in der zweiten Nutzungsphase (siehe Deliverable 2.1).

Bei Modulen, die nie installiert waren, ist der Prozess ähnlich (siehe Abbildung 2). Eine visuelle Inspektion wird in jedem Fall empfohlen, weitere Tests können situativ angewendet werden. Da in solchen Fällen meist keine weiteren Anlagenkomponenten vorhanden sind, kommen in der Regel nur die Module für die Wiederverwendung infrage.

2.4 Weiterführende Tests

Um die Sicherheit, Langlebigkeit und Leistung der wiederverwendbaren Module systematisch zu untersuchen, empfiehlt es sich, alle Module einzeln zu testen. Dies stellt auch sicher, dass es pro Modul ein Testprotokoll gibt, welches den neuen Eigentümer:innen als Garantie der Funktionstüchtigkeit der Module abgegeben werden kann, was wiederum die Verkaufswahrscheinlichkeit erhöht. Um jedoch die Wirtschaftlichkeit der Wiederverwendung zu gewährleisten, kann es auch sein, dass weiterführende Tests für alle Module zu umfangreich sind. Vor allem bei Anlagenerweiterungen oder einem Anlagenaustausch (Re-Powering), wo alle Module potenziell unbeschädigt sind und noch dieselbe Qualität aufweisen sollten, können Stichprobentests sinnvoll sein und den Zeit- und Kostenaufwand signifikant verringern.

Als erster weiterführender Tests eignet sich ein Flash-Test zur Bestimmung von Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung, maximaler Leistung, Füllfaktor und Wirkungsgrad. Die Werte können mit den Nennwerten vom Produktdatenblatt oder – noch besser – mit den Resultaten der initialen Flash-Tests während der Produktion verglichen werden, um für die Wiederverwendung ungeeignete Module dem Recycling zuzuführen. Module sollten als ungeeignet für die Wiederverwendung betrachtet werden, wenn ihre Leistung um mehr als 20% von der erwarteten Nennleistung oder um mehr als 10% von der durchschnittlichen Leistung

innerhalb der Testgruppe abweicht³. Ebenso sind Module auszuschliessen, deren I-V-Kurven deutliche Abweichungen von der Nennkurve zeigen, beispielsweise in Form von Stufen oder steilen Steigungsabfällen.

Um die Sicherheit der Module zu gewährleisten, sollte weiter eine Hochspannungsprüfung (High Pot) durchgeführt werden (IEC 61730-2). Damit lässt sich sowohl die Durchgängigkeit der Erdung und der Widerstand zwischen allen vier Rahmenteilern messen als auch der Isolationswiderstand. Das pass/fail-Resultat zeigt, ob ein Modul noch sicher ist, um als secondhand wiederverwendet zu werden.

Ein Elektrolumineszenz-Test sollte durchgeführt werden, um inaktive Bereiche sowie für das menschliche Auge unsichtbare Mikrorisse in den Zellen sichtbar zu machen. In der Regel werden die betroffenen Bereiche einer Zelle in drei Schweregrade unterteilt: unkritisch, wenn weniger als 1% der Zelle betroffen ist, kritisch, wenn 1–20 % der Zelle betroffen sind, und sehr kritisch, wenn mehr als 20% der Zelle betroffen sind. Module, bei denen eine oder mehrere Zellen mit dem Schweregrad sehr kritisch vorhanden sind oder bei denen mehr als acht Zellen als kritisch eingestuft werden, fallen in die Kategorien D beziehungsweise C und werden dem Recycling zugeführt. Module mit weniger als acht Zellen im Schweregrad „kritisch“ werden der Kategorie B zugeordnet, während Module mit Schweregrad unkritisch oder ohne Beanstandungen der Kategorie A entsprechen (Einordnung gemäss dem Swiss PV Circle Piloten). Die Zuteilung zu den Kategorien kann je nach künftigen Einsatzort der Module strenger oder weniger streng definiert werden.

³ van der Heide et al.

Literatur

Heide, Arvid van der, Daniela Maria Godinho Ariolli, Guillermo Oviedo Hernandez, Serge Noels, and Jan Clyncke. "Re-Use of PV Modules: Progress in Standardisation and Learnings from a Real Case Study," 2023. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC2023/5DO.15.6>.

Tsanakas, Ioannis (John) A., Gernot Oreski, Gabriele Eder, Anika Gassner, Arvid Van Der Heide, Daniela M. Godinho Ariolli, Guillermo Oviedo Hernandez, David Moser, and Karsten Wambach. "Toward Reuse-Ready PV: A Perspective on Recent Advances, Practices, and Future Challenges." *Advanced Energy and Sustainability Research*, December 11, 2024, 2400237. <https://doi.org/10.1002/aesr.202400237>.