

Swiss PV Circle

Arbeitspaket 2 – Geschäftsmodell

Ökonomische und ökologische Aspekte der Wiederverwendung von Photovoltaikanlagen

Arbeitspaket-Nummer	AP2
Arbeitspaket-Titel	Geschäftsmodell
Arbeitspaket-Lead	SENS eRecycling
Deliverable-Nummer	AP2.1
Deliverable-Name	Ökonomische und ökologische Aspekte der Wiederverwendung von Photovoltaikanlagen
Status	Finaler Bericht
Autor	Michael Gasser
Verbreitungsebene	Öffentlich
Veröffentlichungsdatum	16.06.2025

Inhalt

Executive Summary	2
1. Einleitung	3
2. Wirtschaftlichkeit von wiederverwendeten Anlagen	4
2.1 Ausgangslage	4
2.2 Wiederverwendung von Modulen: Kosten der Aufbereitung	4
2.3 Wiederverwendung von Modulen: Einfluss der Testmethoden	7
2.4 Wiederverwendung von ganzen Anlagen	7
2.5 Einfluss der Einmalvergütung	8
3. Ökologie von wiederverwendeten Anlagen	9
3.1 Ausgangslage	9
3.2 Einfluss der Prüfung von Photovoltaikmodulen	9
3.3 Wiederverwendung auf Flächen ohne Beschränkungen (Szenario 1a)	10
3.4 Wiederverwendung auf Flächen mit einer eingeschränkten Lebensdauer (Szenario 1b)	10
3.5 Wiederverwendung auf Flächen, die keine Neuanlage zulassen (Szenario 2)	11
4. Fazit	11
Anhang	14
Literatur	15

Executive Summary

Die Wiederverwendung von Modulen und weiteren Komponenten von PV-Anlagen, die frühzeitig zurückgebaut werden, hat bedeutendes ökonomisches und ökologisches Potential. Das Projekt Swiss PV Circle verfolgt das Ziel, die Wiederverwendung von PV-Anlagen zu fördern und hat untersucht, wann eine Wiederverwendung ökonomisch und ökologisch sinnvoll sein kann.

Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass es Umstände gibt, unter denen eine Wiederverwendung ökonomisch und wie auch ökologisch sinnvoll sein kann. Aus ökologischer Sicht ist eine Wiederverwendung unter vielen Bedingungen sinnvoll und hängt insbesondere davon ab, wie lange eine wiederverwendete Anlage im Vergleich zu einer neuen Anlage betrieben werden kann.

Aus ökonomischer Sicht ist eine Wiederverwendung herausfordernder. Ein grosses Hindernis stellen hierbei die Kosten für das Testen von gebrauchten PV-Modulen dar. Heute müssen Module in Tendenz einzeln getestet und rezertifiziert werden. Die Entwicklung und Akzeptanz von alternativen Testmethoden mit tieferen Kosten würde bedeutende Kosteneinsparungen in der Wiederverwendung ermöglichen und so die ökonomischen Vorteile einer Wiederverwendung verstärken oder erst ermöglichen.

Sowohl aus ökonomischer wie ökologischer Sicht ist eine Wiederverwendung insbesondere dann sinnvoll, wenn nicht nur PV-Module, sondern auch weitere Komponenten (z.B. Wechselrichter und Unterkonstruktion) wiederverwendet würden. In der Praxis gestaltet sich eine Wiederverwendung dieser Komponenten als schwierig, da sie spezifisch auf den Standort und die Anlage angepasst sind. Um die Wiederverwendung zu fördern, und dabei möglichst alle Komponenten zu berücksichtigen, wurde im Projekt Swiss PV Circle ein Formular erarbeitet, in welchem Informationen zusammengefasst sind, die für eine Beurteilung der Wiederverwendbarkeit von Anlagen nötig sind (siehe Deliverable 2.3). Ausserdem wurde ein Leitfaden zur Wiederverwendung für Installationsbetriebe erstellt (siehe Deliverable 2.2).

1. Einleitung

Wird eine PV-Anlage erstellt, so ist dies mit finanziellen und ökologischen Kosten verbunden. Die Komponenten müssen hergestellt und installiert werden, was sowohl finanzielle wie ökologische Auswirkungen hat.

Während dem Betrieb einer Anlage wird Strom produziert, welcher einen ökonomischen und ökologischen Wert hat. Aus ökologischer und ökonomischer Sicht ist es sinnvoll, eine bestehende Anlage möglichst lange zu nutzen. Heutzutage wird in Ökobilanzen und Wirtschaftlichkeitskalkulationen angenommen, dass PV-Installationen eine Lebensdauer von rund 25-30 Jahren aufweisen.¹

Aufgrund der technologischen Entwicklungen steigt die Effizienz von PV-Modulen. Aus diesem Grund kann es wirtschaftlich sinnvoll sein, bei beschränkten Flächen bestehende und funktionierende Anlagen vor ihrem technischen Lebensende zurückzubauen. Ebenso können äussere Umstände den früheren Rückbau von funktionierenden PV-Anlagen und -Komponenten verursachen (z.B. Dachsanierung, Aufstockung, Hagelschäden). Diese Anlagen und Komponenten werden heute grösstenteils nicht wiederverwendet, sondern über die Branchenlösung von SENS eRecycling und Swisssolar dem Recycling zugeführt.

Die zurückgebauten PV-Anlagen und -Komponenten könnten grundsätzlich wiederverwendet werden und stellen so ein Potential für die Kreislaufwirtschaft und den Ausbau der erneuerbaren Stromproduktion dar.

Abbildung 1 zeigt exemplarisch, wie sich ökonomische und ökologische Gesamtkosten und -nutzen von PV-Anlagen über die Zeit verändern und welche Auswirkungen ein frühzeitiger Ersatz oder eine Wiederverwendung haben können. Je nach angewandtem Bewertungsansatz – sei es eine ökonomische oder ökologische Kosten-Nutzen-Analyse – und abhängig von der gewählten Methodik zur Quantifizierung ökologischer Aufwendungen (z. B. in Form von CO₂-Äquivalenten oder Umweltbelastungspunkten [UBP]) können die Ergebnisse, insbesondere die Höhe der dargestellten Balken, signifikant variieren.

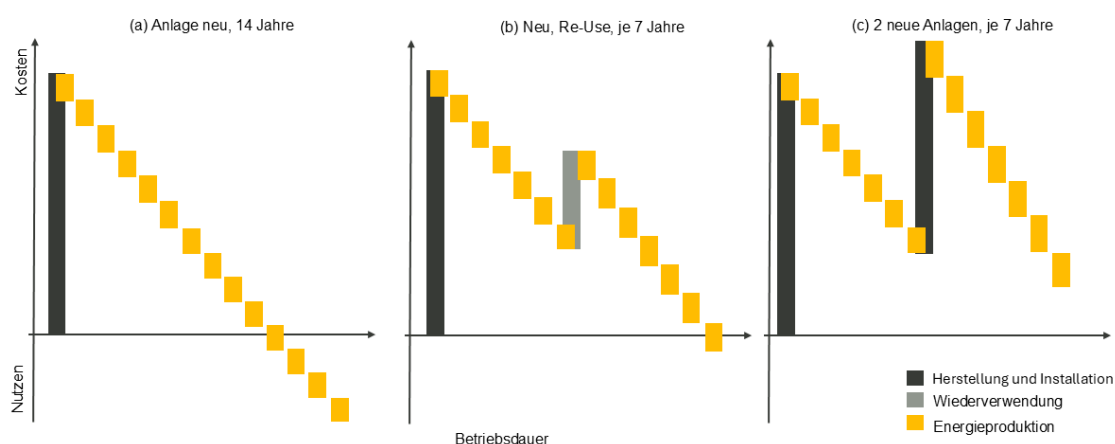


Abbildung 1: Entwicklung von Kosten und Nutzen der Herstellung und Nutzung einer PV-Anlage über mehrere Betriebsjahre.

Ein Rechenbeispiel mit Zahlen der Preisbeobachtungsstudie vom Bundesamt für Energie (BFE) zeigt, wie hoch das wirtschaftliche Potential von Wiederverwendung sein könnte.² Der Anteil von PV-Modulen an den

¹ Frischknecht et al., "Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic 2020."

² Bloch and Sauter, "Photovoltaikmarkt: Preisbeobachtungsstudie 2023."

Gesamtkosten einer Anlage lag 2023 zwischen 14% (Anlagen 2-10kWp) und 36.9% (300-1000kWp). Für die häufigsten Anlagengrösse von 10-30kWp liegen die Modulkosten bei rund 20%. Könnten Module aus der Wiederverwendung gratis beschafft werden, so würden die Kosten entsprechend um diesen Anteil reduziert werden. Ähnliche Berechnungen können auch für die ökologische Betrachtung erstellt werden.

Im Rahmen des Projekts Swiss PV Circle wurde untersucht, unter welchen Bedingungen eine Wiederverwendung funktionstüchtiger Komponenten oder Bauteile ökologisch oder ökonomisch sinnvoll ist. Ziel dieser Untersuchungen war es, sinnvolle Anwendungsbereiche für die Wiederverwendung von PV-Anlagen zu identifizieren. Für die Untersuchung wurden PV-Anlagen vereinfacht in die drei Komponenten PV-Module, Elektronik und Wechselrichter sowie Unterkonstruktion aufgeteilt. Eine neue Anlage bezieht sich hierbei auf eine Anlage, in der alle Komponenten neu sind. Eine wiederverwendete Anlage bezieht sich auf eine Anlage, bei der mindestens die PV-Module bereits eine vorherige Nutzung erfahren haben. Wiederverwendete Anlagen können jedoch auch zusätzliche wiederverwendete Komponenten nutzen. Zur Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Wiederverwendungsgrade wurden verschiedene Szenarien entwickelt und untersucht, um die ökonomischen und ökologischen Implikationen dieser Ansätze zu bewerten.

Grundlage der Berechnungen waren stets Anlagen mit derselben Nennleistung. Der Effekt einer höheren Energieproduktion einer neuen Anlage mit höherem Wirkungsgrad im Vergleich zu einer wiederverwendeten Anlage bei einer begrenzten Installationsfläche wurde somit nicht berücksichtigt, d.h. es wurde angenommen, dass die für die PV-Anlage verfügbaren Flächen die Wiederverwendung nicht einschränken. Ausserdem beziehen sich alle Berechnungen auf Aufdach-Anlagen.

2. Wirtschaftlichkeit von wiederverwendeten Anlagen

2.1 Ausgangslage

Um die Wirtschaftlichkeit von wiederverwendeten Anlagen zu berücksichtigen, sind sowohl die Kosten für die Aufbereitung von gebrauchten Komponenten wie auch die Installationskosten zu berücksichtigen. Können aufbereitete Komponenten kostengünstiger als vergleichbare neue Komponenten beschafft werden, so ist es möglich, aber nicht zwingend, dass eine wiederverwendete Anlage wirtschaftlich ist. Für eine vollständige Beurteilung sind zusätzlich Unterschiede in der Lebensdauer, Energieproduktion und allfällige Unterschiede von Installationskosten (Sicherheitsvorkehrungen, Arbeitskräfte, Projektplanung) zu berücksichtigen. Im Projekt Swiss PV Circle wurden insbesondere die Kosten für die Aufbereitung von PV-Modulen auf die Wirtschaftlichkeit untersucht, da zu erwarten ist, dass die Installationskosten von wiederverwendeten Anlagen mit Neuanlagen vergleichbar sind.

2.2 Wiederverwendung von Modulen: Kosten der Aufbereitung

Die Aufbereitung gebrauchter PV-Komponenten umfasst die Demontage, Prüfung, Bereitstellung sowie die damit verbundenen Transport- und Lagerkosten. Während sich die Kosten für Demontage und Bereitstellung auf Basis branchenüblicher Erfahrungswerte relativ zuverlässig abschätzen lassen, stellt die Prüfung gebrauchter Komponenten einen spezifischen Prozess dar, dessen Kosten individuell kalkuliert werden müssen. Besonders relevant sind dabei die Tests von PV-Modulen, da Defekte an diesen Komponenten erhebliche sicherheits- und kostenrelevante Konsequenzen nach sich ziehen können.

Für das Prüfen der Sicherheit, Langlebigkeit und Produktionsleistung von PV-Modulen existieren verschiedene technische Methoden. Sie wurden ursprünglich für die Beurteilung von Anlagenschäden (Hagel, Brand), der Inbetriebnahme von Anlagen oder aus der Qualitätskontrolle bei der Herstellung entwickelt. Die Methoden erlauben grundsätzlich eine gute Aussage darüber, in welchem Zustand sich ein Modul befindet. Innerhalb vom Projekt Swiss PV Circle haben wir daraus einen Leitfaden zur Wiederverwendung von Secondhand-PV-Modulen erstellt (siehe Deliverable 2.2).

Eine vollständige Aussage über den Zustand eines gebrauchten PV-Moduls kann mit den vorliegenden Methoden nur dann gemacht werden, wenn jedes Modul einzeln getestet wird. Interviews mit potenziellen Abnehmer:innen im Rahmen von Swiss PV Circle zeigen, dass die Akzeptanz von bereits genutzten Modulen bei Besitzer:innen und oder Abnehmer:innen insbesondere dann gegeben ist, wenn Einzelmodultests vergleichbar mit denen von Neomodulen durchgeführt werden. Dies ist sicherlich auch darauf zurückzuführen, dass die Wiederverwendung von Komponenten eher ein neues Thema ist und frühzeitige Ausfälle bedeutende Kostenfolgen haben können. Ein Workshop im Rahmen von Swiss PV Circle mit internationalen Stakeholdern zeigt, dass sich auch international zurzeit die Tendenz durchsetzt, dass jedes einzelne Modul für eine Wiederverwendung vollständig getestet werden muss (siehe Deliverable 5.1).

Aufgrund dieser Ausgangslage hat sich das Projekt Swiss PV Circle auf die Erhebung der Kosten Einzelmodultests fokussiert. Es wurden zwei Pilotversuche für das Testen von gebrauchten PV-Modulen unterstützt und durchgeführt, um die Kostenfolge des Testens erfassen und modellieren zu können. Der erste Pilot wurde in Zusammenarbeit mit Services Industriels de Genève (SIG)³ und der Gemeinde Meyrin⁴ durchgeführt, der zweite mit dem Verein RE-WIN⁵. Im ersten Piloten wurde mit einer mobilen Testanlage für PV-Module der Ostschweizer Fachhochschule (OST)⁶ rund 270 Module, im zweiten Piloten rund 20 Module mit Handtestgeräten der Firma Solarenergie Küng GmbH⁷ sowie mit einem Prototyp eines Plug & Play-Kennlinienmessgerätes der Berner Fachhochschule (BFH)⁸ getestet.

Die Kosten für das Testen der Module belief sich je nach Testmethode zwischen 30-50 CHF und 50-90 CHF pro Modul (Tabelle 1). Die Miete einer mobilen Testanlage ist ab einem Lot von rund 100 Modulen kostengünstiger als die Verwendung von Handtestgeräten, da ein höherer Durchsatz erzielt wird. Diese Kosten sind anwendbar auf die heute im Markt vorherrschende Mengenstruktur (kleine Jahresmengen, die Module sind auf wenigen Anlagen im Rahmen von einzelnen Projekten zu testen). Die erhobenen Kosten berücksichtigen die Miete der Geräte sowie das für das Testen notwendige Personal, nicht jedoch weitere Kosten wie Lagerung und Transport, die von den Anlagenbesitzern getragen wurden.

Würde die Nachfrage von gebrauchten Modulen steigen und sich die Mengenstruktur ändern, so könnte ein alternatives produktionsbasiertes Geschäftsmodell finanziell effektiver sein. In diesem Geschäftsmodell tätigt eine Firma spezifische Investitionen in eine Testanlage und betreibt diese mit hoher Auslastung, um das Prüfen der PV-Module so kostengünstig wie möglich zu gestalten. Das Volumen für ein solches Geschäftsmodell wäre hierbei grundsätzlich vorhanden. Die Menge über SENS eRecycling entsorgter PV-

³ <https://Ww2.Sig-Ge.Ch/>."

⁴ <https://Meyrin.Ch/Fr.>."

⁵ <https://Re-Win.Ch/>."

⁶ <https://Www.Ost.Ch/de/Forschung-Und-Dienstleistungen/Technik/Erneuerbare-Energien-Und-Umwelttechnik/Spf-Institut-Fuer-Solartechnik/Testing/Mobiles-Pv-Labor.>."

⁷ <https://Www.Solarenergie-Kueng.Ch/>."

⁸ Jäggi and Bucher, "Plug & Play-Kennlinienmessgerät Für Photovoltaik-Module."

Module lag 2022 bei knapp 50'000 Stück, Tendenz weiter steigend (siehe Deliverable 3.1). Bei einem solchen Geschäftsmodell müsste ein Unternehmen eigenständig die nötige Menge und Qualität an rückgebauten PV-Modulen beschaffen, diese in eigener Infrastruktur testen, gegebenenfalls lagern und vermarkten.

Tabelle 1: Übersicht der im Projekt Swiss PV Circle erhobenen Testkosten für PV-Module

Mengenstruktur	Art	CHF / getestetes Modul ¹	Rp. / Wp ²
Kleinmengen	Manuell mit Handtestgeräten	50-90	22 - 40
Einzelne Projekte	Miete mobile Testanlage pro Einsatz (ab 100 Module / Lot)	30-50	13 - 22
Kontinuierlicher Mengenstrom	Mobile Testanlage vor Ort	45 (bei 1'000 M/J) ³ 39 (bei 3'000 M/J)	17 - 20
	Test-Center Schweiz (Festinstallation) (ab 5'000 Module / Jahr)	43 (bei 3'000 M/J) 28 (bei 10'000 M/J) 25 (bei 30'000 M/J)	11 - 19

¹ ohne Berücksichtigung von Modulen, welche die Tests nicht bestehen.

² bei durchschnittlich 250 Wp / Modul und 90% der Module, welche die Tests bestehen.

³ M/J: Module / Jahr

Vollkostenrechnungen von Swiss PV Circle zeigen, dass dieses Geschäftsmodell ab einem Testvolumen von 3'000-5'000 Modulen pro Jahr trotz zusätzlicher Kosten (Flächen, Administration, Transport, Lager, Amortisation, Zinsen etc.) kosteneffektiver wird und Testkosten im Bereich von 25-45 CHF, abhängig von der Jahresmenge, erreicht werden können.

Die Testkosten pro Modul sind unabhängig von Grösse und Wirkungsgrad des Moduls ähnlich, da immer jedes Modul einzeln getestet werden muss. Werden die Testkosten bezogen auf die Nennleistung berechnet, so sind die Kosten für ältere Module, mit einer kleineren Fläche und einem tieferen Wirkungsgrad weitaus höher als für neuere Module. Bei Testkosten pro Modul von 50 CHF würde ein älteres Modul mit einer Nennleistung von 250Wp Testkosten von rund 0.2 CHF/Wp aufweisen, während ein neueres Modul mit einer Nennleistung von 350Wp Testkosten von rund 0.14 CHF/Wp aufweisen würde. Diese Kosten sind leicht tiefer bis ähnlich hoch wie Marktpreise von herkömmlichen Neumodulen (Stand Januar 2025), berücksichtigen aber weder potenzielle Kosten in der Planung und Projektierung oder der Unterkonstruktion (alte Befestigungssysteme, Mehrfläche) noch die potenziell eingeschränkte Betriebsdauer.

Anfragen aus dem Markt während der Projektdauer lassen darauf schliessen, dass im Moment vorwiegend Anlagen mit Modulen von einem Leistungsbereich unter 250Wp zurückgebaut werden. Unter der Voraussetzung, dass Module für eine Wiederverwendung alle einzeln getestet werden müssen, zeigen die im Projekt erhobenen Testkosten, dass die Wiederverwendung solcher Module in der heutigen Mengenstruktur gegenüber Neumodulen kaum ökonomisch attraktiv ist. Dies insbesondere auch unter der Berücksichtigung, dass Risikozuschläge sowie Margen nicht berücksichtigt sind. Ökonomisch interessanter sind Module mit einer höheren Leistung (>350Wp), welche in hohen Mengen baugleich zur Verfügung stehen, wie z.B. bei einer industriellen Anlage.

Bei einer veränderten Marktlage mit höheren Neumodulpreisen und steigender Verfügbarkeit von wiederverwendbaren Modulen (siehe Deliverable 3), könnte eine Wiederverwendung finanziell interessanter werden.

2.3 Wiederverwendung von Modulen: Einfluss der Testmethoden

Die heute für die Wiederverwendung eingesetzten Einzelmodultests sind kostenintensiv, verursachen einen hohen Aufwand und skalieren nur bedingt mit steigenden Stückzahlen. Könnten die Anforderungen an die durchzuführenden Tests reduziert werden und trotzdem vertrauenswürdige und belastbare Informationen über den Zustand von PV-Modulen und -Anlagen gesammelt werden, so hätte dies einen bedeutenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Wiederverwendung von Modulen.

In einem optimistischen Szenario mit heutigen Mengenstrukturen und Einzelmodultests ist eine Kostenreduktion von rund 20% gegenüber Neumodulen möglich. Unter Berücksichtigung der Kostenanteile von PV-Modulen an den Gesamtanlagekosten hätte dies Reduktionen von 3% bei Anlagen mit 10-30 kWp und 7% bei Anlagen mit 300-1'000 kWp Leistung zur Folge (berechnet auf Basis EnergieSchweiz, 2024). Diese Einsparungen sind unter Berücksichtigung der Risiken und potenziellen Mehraufwänden (Anlagenwartung) eher klein. Mit alternativen Testmethoden, welche z.B. eine Einsparung von 80% gegenüber Neumodulen ermöglichen könnten, würden die Gesamtkosten von Anlagen um 11-29% reduziert.

Der durchgeführte Pilotversuch in Zusammenarbeit mit SIG zeigt die Grenzen der angewendeten technischen Prüfverfahren auf. Im Versuch wurden insgesamt 273 Module mit einem Alter von 20 Jahren auf die Eignung einer Wiederverwendung geprüft. Hierbei wurden 49 (18%) aufgrund von sichtbaren Mängeln mit einer einfachen visuellen Kontrolle von der Wiederverwendung ausgeschlossen (Ablösung von Backsheets, Oxidation, defekte Kabel, Stecker oder Dioden, Glasbruch etc.). Nur 8 weitere Module (3%) wurden aufgrund Nichtbestehens der technischen Prüfungen von einer Wiederverwendung ausgeschlossen.

Diese Zahlen zeigen die Wichtigkeit, Module vor einer technischen Prüfung einer visuellen Vorprüfung zu unterziehen, um die Kosten einer technischen Prüfung zu reduzieren. Ebenso zeigen sie, dass Module von Anlagen, die ohne nennenswerte Probleme in ihrem ersten Leben betrieben wurden und keine sichtbaren Mängel aufweisen, grösstenteils in einem zweiten Leben eingesetzt werden können. Eine Garantie über die Dauer eines zweiten Lebens kann auch mit allen Einzelmodultests nicht gemacht werden. Technische Prüfverfahren können vereinzelte Defekte entdecken, es ist jedoch zu hinterfragen, ob eine kostenintensive Prüfung jedes einzelnen Moduls zielführend ist, oder ob nicht Tests von gesamten Anlagen bzw. String zielführender sind. String- und anlagenbasierte Messungen inkl. historische Produktionsdaten und Modultests von einzelnen Modulen, gekoppelt mit dem Sicherheitsnachweis für die Inbetriebnahme einer wiederverwendeten Anlage, könnten also grundsätzlich ausreichen, um genügend Informationen für die technische Beurteilung einer Wiederverwendbarkeit zu erhalten. Einzelmodultests könnten auf eine Selektion von wenigen Modulen (problematische Strings, zufällige Auswahl) reduziert werden.

2.4 Wiederverwendung von ganzen Anlagen

Können weitere Anlagenkomponenten wiederverwendet werden, so steigen die potenziellen Kostenersparnisse. Als Idealfall kann hierbei eine Verschiebung einer bestehenden Anlage inklusive aller Komponenten auf eine neue Fläche, ohne jegliche Testkosten, berücksichtigt werden. Hierbei fallen nur Arbeits- und Sicherheitskosten an, die in der Summe zwischen 28% (300-1000 kWp) und 37% (2-10 kWp) der Gesamtanlagekosten ausmachen.⁹ In einem solchen Szenario könnten demnach maximal 60-70% der Anlagekosten eingespart werden.

⁹ Bloch and Sauter, "Photovoltaikmarkt: Preisbeobachtungsstudie 2023."

Wird ein erhöhter Arbeitsaufwand angenommen oder müssen bestimmte Komponenten ersetzt werden, so reduziert sich der Kostenvorteil rasch. Aus finanzieller Perspektive erscheint die Wiederverwendung von Wechselrichtern und elektronischen Komponenten attraktiver als die von Montagesystemen, obwohl Letztere in der Praxis möglicherweise leichter zu implementieren sind. Ein Montagesystem trägt rund 10-15%, Wechselrichter und Elektronik gemeinsam tragen rund 15-27% zu den Anlagekosten bei.¹⁰

2.5 Einfluss der Einmalvergütung

Mit einer Einmalvergütung (EIV) erhalten Anlagenbetreiber von PV-Anlagen einen einmaligen Investitionsbeitrag. Einmalvergütungen für PV-Anlagen werden auf Basis von verschiedenen Einflussgrössen, inklusive des Neigungswinkels und der Anlagenleistung und auf Basis von durchschnittlichen Kosten gewährt.

Da potenzielle Kosteneinsparungen aus der Wiederverwendung nicht in diese Erhebung der Kosten einfließen und die Vergütung pauschal erfolgt, kann die Einmalvergütung mit einem hohem Wiederverwendungsanteil prozentual einen höheren Einfluss haben. Eine Anlage, die vor Berücksichtigung der EIV dank Wiederverwendung mit einer Kosteneinsparung von 30% gegenüber einer Neuanlage realisiert werden kann, hat nach Berücksichtigung der EIV einen Preisvorteil von 40% gegenüber einer Neuanlage (Tabelle 2). Diese Berechnungen nehmen an, dass am selben Standort eine Anlage mit gleicher Leistung gebaut wird, obwohl eine Anlage mit wiederverwendeten Modulen einen höheren Flächenbedarf hat (Optimierung des Eigenverbrauchs, d.h. Kontext Eigenheim).

Wird eine wiederverwendete Anlage mit weniger Leistung mit einer neuen Anlage mit höherer Leistung verglichen (Nutzung der vorhandenen Fläche, tiefere Leistung von wiederverwendeten Modulen), so tritt dieser Effekt abhängig von den Annahmen nicht oder nur begrenzt auf.

Tabelle 2: Einfluss der EIV auf die Gesamtkosten von PV-Anlagen mit und ohne EIV

Anlage¹	Anlagekosten ex. EIV² CHF	EIV³ CHF	Anlagekosten inkl. EIV CHF	Spezifische Nettokosten, CHF/kWp
20 kWp Neu	45'000	8'000 (18%)	37'000	1'850
20 kWp, Re-Use+ ⁴	30'000	8'000 (26%)	22'000	1'110
20 kWp, Re-Use- ⁵	40'500	8'000 (20%)	32'500	1'625
15 kWp, Re-Use+ ⁴	24'000	6'000 (25%)	18'000	1'200
15 kWp, Re-Use- ⁵	33'000	6'000 (18%)	27'000	1'800

¹ Annahme: derselbe Standort, Anlage mit gleicher Leistung, mit wiederverwendeten Modulen, aber höherer Flächenbedarf

² Gemäss EnergieSchweiz, 2024, 20kWp (45'000 CHF) und 15kWp (36'500 CHF), berechnet gemäss Formeln 2023.

³ Gemäss Tarifrrechner EIV von Pronovo¹¹

⁴ Optimistisches Rechenbeispiel, 30% Kostenreduktion ggü. Neuanlage

⁵ Realistisches Rechenbeispiel, 10% Kostenreduktion ggü. Neuanlage

¹⁰ Bloch and Sauter.

¹¹ "[https://Pronovo.Ch/de/Services/Tarifrrechner/.](https://Pronovo.Ch/de/Services/Tarifrrechner/)"

3. Ökologie von wiederverwendeten Anlagen

3.1 Ausgangslage

Um die Möglichkeiten und Grenzen einer Wiederverwendung für die Nachhaltigkeit von PV-Anlagen zu untersuchen, wurden folgende Szenarien untersucht:

- **Vergleich Wiederverwendung mit neuer Anlage:** Am Standort für die Wiederverwendung kommt auch die Installation einer neuen Anlage in Frage.
- **Wiederverwendung auf Flächen ohne Beschränkungen der Lebensdauer:** Die Lebensdauer der Anlage ist durch den Anwendungsort nicht beschränkt (d.h. es ist davon auszugehen, dass eine neue Anlage 25-30 Jahre Lebensdauer erreicht).
- **Wiederverwendung auf Flächen mit eingeschränkter Lebensdauer:** Die Betriebsdauer der Anlage ist aufgrund des Installationsortes beschränkt (z.B. Ersatzneubau, Dachsanierung oder Aufstockung geplant, starke Verschmutzung).
- **Wiederverwendung auf Flächen, die keine Neuanlage zulassen:** Eine neuwertige Anlage kommt am Zweitnutzungsstandort nicht in Frage bzw. es kann nicht garantiert werden, dass eine Neuanlage entstehen würde.

Sämtliche Berechnungen wurden sowohl für CO₂-Emissionen wie auch für Umweltbelastungspunkte (UBP) durchgeführt. UBP kombinieren eine Vielzahl von Umweltauswirkungen nach der Methode der ökologischen Knappheit.¹² Bei UBP haben unter anderem in Elektronik enthaltene Technologiemetalle wie Kupfer und Gold eine höhere Gewichtung.

Die Verwendung von ökologischen Gutschriften in Ökobilanzen im Energiebereich wird nicht mehr empfohlen, da mit verschiedenen Annahmen und Werten sehr unterschiedliche Ergebnisse erzeugt werden.¹³ Entsprechend wurde die Kosten-Nutzen-Betrachtung mit folgender Frage untersucht: Ab welcher Lebensdauer produziert eine wiederverwendete Anlage Energie, die unter Berücksichtigung der Emissionen aus der Bereitstellung, tiefere Emissionen verursacht als eine neue PV-Anlage? Die detaillierten Annahmen für die Berechnungen finden sich in Anhang 1.

3.2 Einfluss der Prüfung von Photovoltaikmodulen

Bei der ökonomischen Bewertung hat das Testen von PV-Modulen einen signifikanten Einfluss, während es aus ökologischer Perspektive vergleichsweise unbedeutend ist. Die Testprozesse verzeichnen einen geringen Wasserverbrauch zur Reinigung der Module sowie den Energiebedarf für den Betrieb der Testeinrichtungen und -geräte, die jedoch mehrfach verwendet werden können. Zusätzlich ist der Transport der Module zu stationären Testanlagen oder der Einsatz mobiler Testeinrichtungen vor Ort zu berücksichtigen. Untersuchungen von Mija Fossard von der Hochschule für Wirtschaft und Ingenieurwissenschaft des Kantons Waadt (HEIG-VD) im Rahmen des REMCO-Projekts¹⁴ zeigen, dass die ökologischen Aufwände des Testens

¹² BAFU, "Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit."

¹³ Frischknecht et al., "Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic 2020."

¹⁴ "<https://www.hes-so.ch/en/recherche-innovation/research-projects/detail-projet-recherche/remco-reemploi-des-materiaux-de-construction-etat-des-lieux-sur-les-defis-logistiques>."

gemessen in UBP und CO₂-Emissionen bei einem Test vor Ort vernachlässigbar sind. Ein Testen von PV-Modulen ist somit auch bei einer nur kurzfristigen Weiterverwendung immer ökologisch sinnvoll.

3.3 Wiederverwendung auf Flächen ohne Beschränkungen (Szenario 1a)

Bei der Wiederverwendung auf Flächen ohne Beschränkungen ist die Auswirkung des Wiederverwendungsgrads vollständig sichtbar. Eine Wiederverwendung einer gesamten Anlage ist bereits ab einer zweiten Lebensdauer von ca. 4 (CO₂) und 2.5 (UBP) Jahren ökologischer als der Bau einer neuen Anlage (Abbildung 2).

Werden nur die Module wiederwendet und sonst neue Komponenten eingesetzt, so ist eine zweite Lebensdauer von 10-13 (CO₂) und 12.5-13.5 (UBP) Jahren nötig. Dies ist abhängig vom Flächenbedarf der Module für dieselbe Nennleistung und der entsprechenden Menge an Unterkonstruktion. Werden weitere Komponenten wiederverwendet, so ist die nötige Betriebsdauer tiefer, da die produzierte Energie auf weniger Emissionen verteilt werden müssen. Die Faktoren sind in Szenario 2 beschrieben.

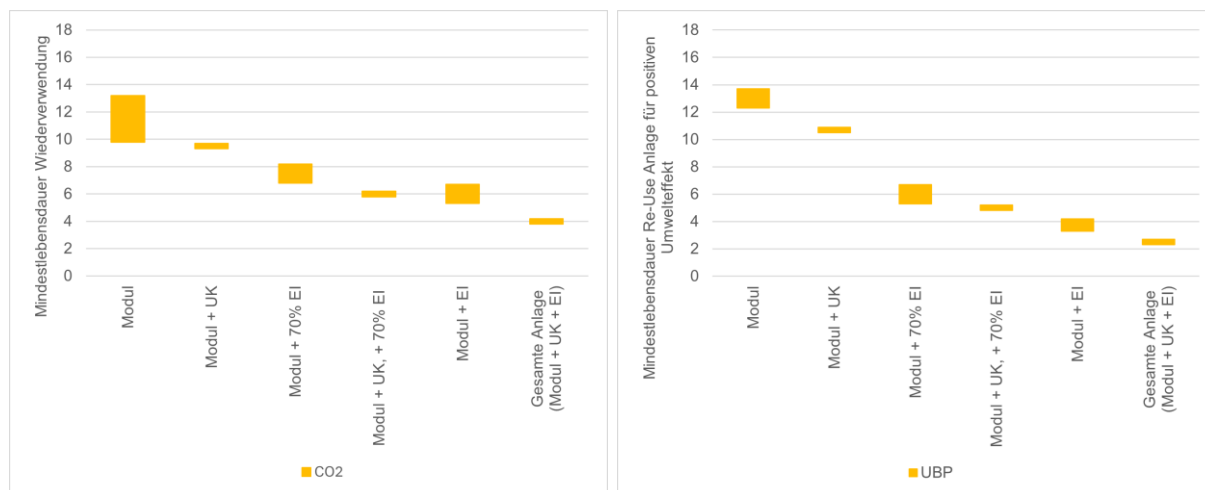


Abbildung 2: Betriebsdauer einer wiederverwendeten PV-Anlage, ab der Wiederverwendung ökologischer als eine Neuanlage ist. Links auf Basis von CO₂-Emissionen, rechts auf Basis von Umweltbelastungspunkte (UBP) berechnet. Modul: Wiederverwendung der PV-Module, UK: Wiederverwendung der Unterkonstruktion, EI: Wiederverwendung der Elektroinstallation inkl. Wechselrichter (WR), 70% EI: Wiederverwendung von 70% der Elektroinstallation inkl. WR. Nicht erwähnte Komponenten werden jeweils als neu erstellt angenommen.

3.4 Wiederverwendung auf Flächen mit einer eingeschränkten Lebensdauer (Szenario 1b)

Ist die Lebensdauer einer PV-Anlage von Anfang an eingeschränkt, kann eine neue PV-Anlage ihren Vorteil einer hohen Lebensdauer nicht ausspielen. Auch die neue PV-Anlage ist an einem solchen Standort mit höheren Emissionen bzw. Umweltbelastungen verbunden, da die ökologischen Kosten der Erstellung der Anlage unabhängig von der Lebensdauer sind. Hiermit lohnt sich die Wiederverwendung früher. Wird eine neue PV-Anlage mit einer geplanten Lebensdauer von nur 15 statt 30 Jahren geplant, so weist diese die rund doppelt so hohen Emissionen pro produzierte kWh auf (gleiche ökologischen Kosten in der Erstellung, halbe Energieproduktion führt zu 96g anstelle von 48g CO₂/kWh). Die in Abbildung 2 für Szenario 1a ausgewiesene nötige Betriebsdauer würde sich in einem solchen Falls also halbieren.

3.5 Wiederverwendung auf Flächen, die keine Neuanlage zulassen (Szenario 2)

Es ist möglich, dass es in Zukunft vermehrt Flächen geben wird, bei der die Installation einer Neuanlage nicht zugelassen, erwünscht oder möglich ist. Dies kann beispielsweise auf folgenden Flächen zutreffen:

- Flächen, auf denen der Bau einer PV-Anlage gesetzlich vorgeschrieben ist und eine Neuanlage finanziell, aber nicht attraktiv ist (schattig, Provisorium etc.).
- Flächen, bei denen die Bauherrschaft einen vorausschauenden Ansatz zur Reduktion von grauen Emissionen verfolgt bzw. eine Wiederverwendung prinzipiell bevorzugt.
- Flächen von Besitzer:innen, die nicht über das nötige Kapital für die Erstellung einer neuen Anlage verfügen.

Szenario 2 hat als einziges Szenario einen zusätzlichen Ausbau an PV-Kapazität zur Folge. Der ökologische Aufwand für die Wiederverwendung einer PV-Anlage muss auch auf solchen Flächen im Verhältnis zum Nutzen durch die zusätzliche Stromproduktion und die verbleibende Betriebsdauer stehen. Deshalb wird er mit den üblichen Emissionswerten für PV-Strom verglichen.

Wird eine PV-Anlage komplett verschoben, so sind nur die Transportaufwände zu berücksichtigen. Diese sind, auch bei einer Wiederverwendung infolge eines Exports nach Afrika oder Osteuropa, nach einer zweiten Lebensdauer von weniger als einem Jahr ausgeglichen (Tabelle 3). Es ist zu bemerken, dass in diesen Betrachtungen die Effekte einer fehlenden Recyclinginfrastruktur nicht berücksichtigt sind.

Tabelle 3: Für einen Ausgleich der Transportemissionen nötige zweite Lebensdauer einer komplett verschobenen Anlage (Verwendung der Referenzwerte im Anhang).

Destination	Transportdistanz	Transport kg CO2/kWp*	Transport kUBP/kWp*	Ausgleich CO2	Ausgleich UBP
Schweiz	150km LKW	3	5	3 Wochen	2 Wochen
Ost-DE, Süd-IT, CZ, SK, HU	1'000km LKW	18	34	4.5 Monate	3 Monate
SP, UA	2'000km LKW	36	68	9 Monate	6 Monate
Ostafrika, GH	9'000km Schiff, 1'000km LKW	24	50	6 Monate	4 Monate

* Inklusive Unterkonstruktion, Elektronik und Wechselrichter. Rund 100kg Material / kWp bei Modulen mit einer Leistung von 250Wp.

Werden für die Erstellung von wiederverwendeten Anlagen neue Komponenten verwendet, so sind auch diese durch eine zusätzliche Betriebsdauer bzw. Stromproduktion auszugleichen. Die Verwendung einer neuen Elektronik und Wechselrichters erhöht die nötige Betriebsdauer um 5.5 (CO2) bzw. 9 Jahre (UBP). Der Einsatz einer neuen Unterkonstruktion, benötigt im Vergleich dazu nur 2 zusätzliche Betriebsjahre.

4. Fazit

Die Wirtschaftlichkeit der Wiederverwendung von PV-Anlagen ist unter den gegebenen Marktumständen, vor allem durch die tiefen Neumodulpreise, nur unter sehr engen Voraussetzungen gegeben (Stand Januar 2025). Von Interesse für eine Wiederverwendung sind Module mit einer sehr kurzen bisherigen Einsatzdauer und entsprechend hoher Effizienz oder die Verschiebung von möglichst kompletten Anlagen. Kalkulationen müssen von Fall zu Fall unter Berücksichtigung der zu erwartenden Erlöse (Strompreis, Eigenverbrauchsanteil) und allfälligen Mehrkosten einer Wiederverwendung (Flächenbedarf,

Planungskosten) berechnet werden. Aus Sicht der Anlagekosten würde sich eine Wiederverwendung insbesondere bei Grossanlagen (300-1'000 kWp) lohnen, bei denen die Module einen grösseren Anteil der Gesamtkosten ausmachen. Gleichzeitig sind es aber in Europa insbesondere Grossanlagen, die oft vor dem technischen Lebensende zurückgebaut werden, da hier durch Re-Powering mit effizienteren Modulen höhere Renditen erzielt werden.¹⁵

Aufgrund der mit dem Testen von gebrauchten PV-Modulen verursachten Kosten ist es sinnvoll, die Anzahl der durchgeführten Tests soweit möglich zu reduzieren und auf Einzelmodultests soweit möglich zu verzichten. So können gebrauchte PV-Module preislich kompetitiv sein, auch gegenüber günstigen Alternativen wie z.B. Lagerrestposten. Die Anzahl Tests kann insbesondere dann reduziert werden, wenn zusätzliche baugleiche PV-Module kostengünstig erworben und eingelagert werden können, um allfällige verfrühte Ausfälle zu kompensieren.

Die Wiederverwendung von PV-Anlagen ist auch aus Sicht der Nachhaltigkeit nicht immer sinnvoll. Die Voraussetzungen für eine ökologische Wiederverwendung sind jedoch weit weniger einschränkend als bei einer ökonomischen Betrachtung. Priorisiert werden sollte die Wiederverwendung von PV-Anlagen, bei denen möglichst alle Komponenten wiederverwendet sind. Wo möglich sollten Standorte bevorzugt werden, bei denen der Betrieb einer neuen PV-Anlage für die gesamte erwartete Lebensdauer nicht priorisiert werden kann, oder Standorte, bei denen neue PV-Anlagen keine Option sind (zusätzlicher Kapazitätsausbau). Aber auch an normalen Standorten mit einer erwarteten Betriebsdauer von 30 Jahren (Szenario 1b) ist der Einsatz einer wiederverwendeten PV-Anlage unter gewissen Bedingungen sinnvoll. Bestenfalls ist eine Einzelfallbeurteilung durchzuführen.

Die Berechnungen von Swiss PV Circle zeigen, dass der Einsatzort einer wiederverwendeten PV-Anlage kaum eine Rolle spielt, und dass der Export trotz der hohen Transportdistanzen ökologisch sinnvoll ist. Es ist jedoch zu beachten, dass ein Export rechtlich nicht immer zulässig ist (siehe Deliverable 5.2). Ebenso kann der Export bedeutende soziale Kosten verursachen, da es für PV-Module und -Elektronik nicht in allen Ländern etablierte Recyclingsysteme gibt, und so das Recycling in prekären Umständen durchgeführt wird.¹⁶ Exporte sollten deshalb nur in Länder vorgenommen werden, in denen funktionierende Rücknahmesysteme für PV-Module und -Elektronik bestehen.

Die Wiederverwendung ist sowohl aus ökologischer sowie ökonomischer Sicht bei möglichst kompletten PV-Anlagen (Wiederverwendung von Modulen, Unterkonstruktion, Wechselrichter und Elektronik) besonders sinnvoll. Während baugleiche PV-Module an verschiedenen Standorten installiert werden können, sind die Unterkonstruktion und Wechselrichter wie Elektronik stark auf das Dach und die Eigenheiten der Anlage (z.B. Standort Sicherungskasten, Ausrichtung Module, Anlagenkapazität) abgestimmt. Der Wiederverwendung dieser Komponenten sind in der Realität deshalb enge Grenzen gesetzt. Um die Wiederverwendung dieser Komponenten zu fördern, sollten Details zu diesen Komponenten detailliert erfasst werden, damit eine Eignung im Einzelfall geprüft werden kann (siehe Deliverable 1.1 und 1.2).

Die Eignung einer Anlage für die Wiederverwendung ist von vielen Faktoren und Informationen abhängig. Das im Rahmen des Projekts Swiss PV Circle erarbeitete Formular «Dokumentationsanforderungen für eine

¹⁵ Ariolli, Oviedo Hernandez, and van der Heide, "Re-Use of PV Modules and Circular Business Models."

¹⁶ Agyeman et al., "Toward a Circular Economy in Ghana's Renewable Energy Sector"; Cimadomo, "Advancing a Circular Economy for Solar Photovoltaics Exported for Reuse - Analysing the Institutional Feasibility of International Extended Producer Responsibility for EU-West Africa Transboundary Movements."

Weitergabe von PV-Anlagen zur Wiederverwendung» soll es erlauben, alle hilfreichen Informationen in einem zentralen Dokument zu sammeln, um diese interessierten Parteien zur Verfügung zu stellen (siehe Deliverable 2.3). In diesem Dokument ist entsprechend auch vorgesehen, Details zur Unterkonstruktion sowie Wechselrichter festzuhalten.

Anhang

Anhang 1: Annahmen für die ökologischen Berechnungen

- Wiederverwendete Komponenten tragen keine restlichen Emissionen aus der ersten Nutzungsphase mit sich (Cut-off Ansatz). Das Recycling der PV-Anlage ist aufgrund der verwendeten Daten bereits in der ersten Nutzungsphase berücksichtigt.
- Der Rückbau einer Anlage ist von einer unabhängig von der Wiederverwendung von Komponenten. Eine Wiederverwendung verlängert also immer die totale Lebensdauer der Komponenten um die Dauer des zweiten Lebens. Ohne Wiederverwendung wären die Komponenten nach der ersten Nutzungsphase in ein Recycling gelangt.
- Für sämtliche CO₂- und UBP-Faktoren wurde die Ökobilanzdaten im Baubereich verwendet.¹⁷
- Für Wechselrichter wurde eine durchschnittliche Lebensdauer von 15 Jahren angenommen, mit entsprechendem anteiligen Ersatz-Wechselrichter bei einer längeren Betriebsdauer.¹⁸ Für sämtliche weitere Komponenten ist die Lebensdauer unbegrenzt, bzw. entspricht der erwarteten Lebensdauer einer neuen Anlage (30 Jahre).
- Als Break-even Emissionswerte wurden 48g CO₂/kWh bzw. 151 UBP/kWh für durchschnittliche Energie aus neuen PV-Anlagen verwendet, solange die neue Anlage ihre ganze Lebensdauer von 30 Jahren erreicht.
- Sämtliche Berechnungen wurden auf Basis einer Mono-Si Aufdach-Anlage mit einer durchschnittlichen Energieproduktion von 1'000 kWh/installierte kWp Leistung pro Jahr durchgeführt.
- Der Effekt von zusätzlichem Bedarf an Elektronik und Unterkonstruktion bei wiederverwendeten Modulen mit tieferem Wirkungsgrad und höherem Flächenbedarf wurde berücksichtigt.

¹⁷ "<https://www.kbob.admin.ch/de/Oekobilanzdaten-Im-Baubereich>."

¹⁸ Tschümperlin et al., "Life Cycle Assessment of Low Power Solar Inverters (2.5 to 20 kW)."

Literatur

- Agyeman, Eric, David A. Quansah, Augustine Ntiamoah, Lena D. Mensah, and Emmanuel W. Ramde. "Toward a Circular Economy in Ghana's Renewable Energy Sector: A Quantitative Assessment of Waste from Solar Photovoltaic Modules in Ghana." *International Journal of Green Energy*, March 3, 2025, 1–20. <https://doi.org/10.1080/15435075.2025.2469136>.
- Ariolli, Daniela, Guillermo Oviedo Hernandez, and Arvid van der Heide. "Re-Use of PV Modules and Circular Business Models." Trust-PV, August 2023. <https://trust-pv.eu/reports/repair-re-use-and-in-source-recycling-of-pv-modules-and-bos-components/>.
- BAFU. "Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit." Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2021.
- Bloch, Lionel, and Yannick Sauter. "Photovoltaikmarkt: Preisbeobachtungsstudie 2023." EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie, June 13, 2024.
- Cimadomo, Simone. "Advancing a Circular Economy for Solar Photovoltaics Exported for Reuse - Analysing the Institutional Feasibility of International Extended Producer Responsibility for EU-West Africa Transboundary Movements." Lund: Master thesis - IIIIEE, Lund University, 2024.
- Frischknecht, R, P Stolz, G Heath, M Raugei, P Sinha, and M de Wild-Scholten. "Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic 2020." International Energy Agency, April 2020. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/07/IEA_Task12_LCA_Guidelines.pdf.
- "<https://Meyrin.Ch/Fr/>," n.d.
- "<https://Pronovo.Ch/de/Services/Tarifrechner/>," n.d.
- "<https://Re-Win.Ch/>," n.d.
- "<https://Ww2.Sig-Ge.Ch/>," n.d.
- "https://Www.Hes-so.Ch/En/Recherche-Innovation/Research-Projects/Detail-Projet-Recherche/Remco-Reemploi-Des-Materiaux-de-Construction-Etat-Des-Lieux-Sur-Les-Defis-Logistiques," n.d.
- "https://Www.Kbob.Admin.Ch/de/Oekobilanzdaten-Im-Baubereich," n.d.
- "https://Www.Ost.Ch/de/Forschung-Und-Dienstleistungen/Technik/Erneuerbare-Energien-Und-Umwelttechnik/Spf-Institut-Fuer-Solartechnik/Testing/Mobiles-Pv-Labor," n.d.
- "<https://Www.Solarenergie-Kueng.Ch/>," n.d.
- Jäggi, Adrian, and Christof Bucher. "Plug & Play-Kennlinienmessgerät Für Photovoltaik-Module," 2025.
- Tschümperlin, Laura, Philippe Stolz, Franziska Wyss, and Rolf Frischknecht. "Life Cycle Assessment of Low Power Solar Inverters (2.5 to 20 kW)." Bundesamt für Energie BFE, October 3, 2016.