



Task 12 PV Nachhaltigkeit

S
T
V
P

FAKTENBLATT

Kreislaufwirtschaft im Bereich Photovoltaik

FEBRUAR 2024

Task 12 Manager:
Garvin Heath, NREL, USA
Etienne Drahi, TotalEnergies, France



Kreislaufwirtschaft

Ein industrielles System, das::



restaurativ ist: Wiederherstellung und Wiederverwendung stehen im Fokus.



regenerativ ist: Der Fokus liegt auf der Nutzung erneuerbarer Energien, der Eliminierung von Abfall und giftigen Chemikalien.

Strategien der Kreislaufwirtschaft

Die Photovoltaik-Industrie (PV) hat noch keinen vollständigen Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft (Circular Economy, CE) erreicht, bewegt sich jedoch in Richtung einer gesteigerten Zirkularität. Bei der Weiterentwicklung verbesserter Technologien sollten alle CE-Strategien sowie deren wirtschaftliche, ökologische und politische Aspekte berücksichtigt werden.

Intelligenterer Produktgebrauch und Herstellung

R0

Vermeiden

Verzicht auf toxische oder kritische Materialien sowie Eliminierung von Abfällen.

R1

Umdenken

Produkte so gestalten und verwalten, dass ihre Nutzung intensiver und nachhaltiger wird.

R2

Reduzieren

Weniger Verbrauch von Primärrohstoffen und Vermeidung von Abfällen.

Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und deren Komponenten

R3

Wiederverwendung

Nutzung durch einen zweiten Kunden für denselben Zweck.

R4

Reparieren

Wiederherstellung defekter, beschädigter oder nicht funktionsfähiger Komponenten.

R5

Generalüberholung

Verbesserung des Betriebszustands, der Qualität oder der Funktionalität eines mehrteiligen Produkts.

R6

Neuherstellung

Wiederverwendung einer oder mehrerer Komponenten mit derselben Funktion.

R7

Umwidmung

Nutzung des Produkts oder seiner Komponenten für einen anderen Zweck.

Rückgewinnung von Materialien und Energie

R8

Recycling

Erhalt von Materialien aus einem Produkt, unter Verlust der ursprünglichen Materialstruktur

R9

Rückgewinnung

Gewinnung von Energie aus Abfallprodukten am Ende ihres Lebenszyklus.

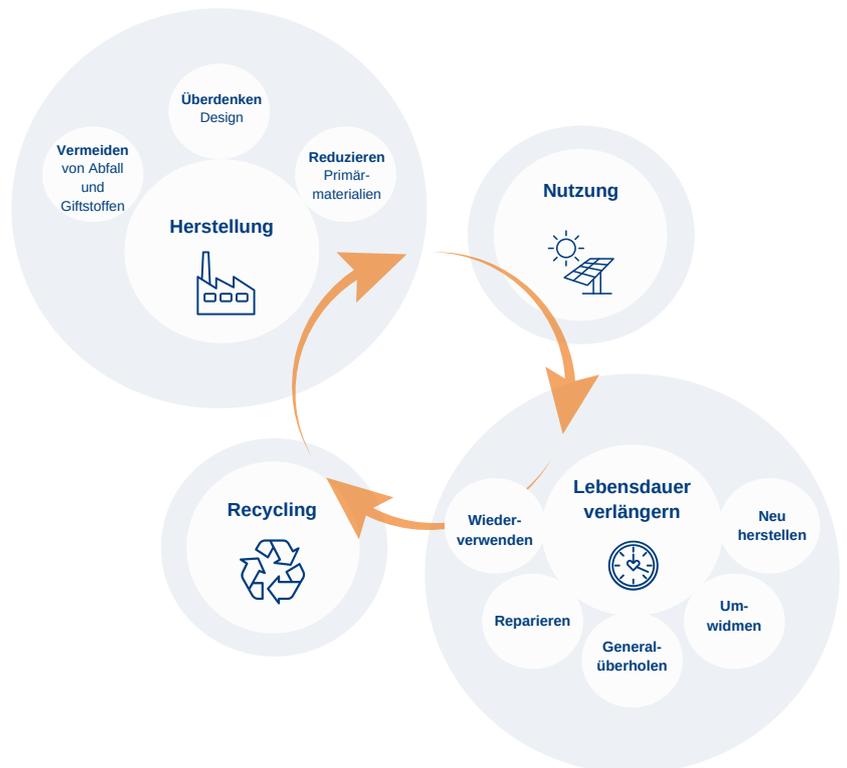


Recycling in der Photovoltaik

Photovoltaiksysteme (PV) haben eine lange Lebensdauer. Strategien zur Entwicklung langlebiger Systeme vermeiden Abfall von Anfang an. Lösungen zur Verlängerung der Lebensdauer bestehender Module sind umweltfreundlicher als sofortiges Recycling. Viele Module können wiederverwendet werden, selbst wenn Reparaturen oder eine Generalüberholung nötig sind. Ist dies nicht möglich, bleibt das Recycling eine sinnvolle Alternative.

Recycling von PV-Modulen

- Recyclinganlagen arbeiten in mehreren Ländern bereits im kommerziellen Maßstab.
- Diese Unternehmen sind seit Jahren tätig, und die Kosten für das Recycling von PV-Modulen sinken stetig.
- 80 bis über 95 % der Materialien eines PV-Moduls können zurückgewonnen werden, wobei Forschung die Effizienz weiter steigert..



Motivation für eine Kreislaufwirtschaft

Die Motivation für eine Kreislaufwirtschaft liegt in der Erkenntnis, dass viele Ressourcen begrenzt sind und das lineare Wirtschaftssystem erhebliche Umweltauswirkungen hat.



Environment

Eine Kreislaufwirtschaft reduziert die negativen Umweltauswirkungen, die durch Ressourcengewinnung, Produktionsprozesse und Abfallentsorgung entstehen. Durch die Schließung von Kreisläufen und die möglichst lange Nutzung von Produkten und Materialien hilft sie, natürliche Ökosysteme und die Biodiversität zu schützen.



Finite resources

Mit dem Wachstum der Weltbevölkerung und zunehmenden Konsummustern wächst das Bewusstsein für die Endlichkeit vieler Ressourcen. Eine Kreislaufwirtschaft setzt hier an, indem sie die effiziente Nutzung und Wiederverwendung von Ressourcen fördert, um deren Erschöpfung zu minimieren. Gleichzeitig trägt sie dazu bei, die Materialversorgung zu sichern und lokale Quellen für Rohstoffe zu schaffen.



Economy

Praktiken der Kreislaufwirtschaft bieten sowohl wirtschaftliche als auch gesellschaftliche Vorteile, indem sie neue Geschäftsmöglichkeiten schaffen, Innovationen fördern und das Wachstum lokaler Arbeitsmärkte unterstützen.

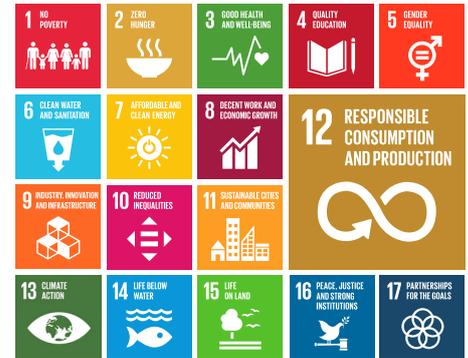


1 Umweltvorteile im Vergleich zur Deponierung

Die Kreislaufwirtschaft in der Photovoltaik ist eine Strategie zur Unterstützung der Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen, insbesondere Ziel 12:

Verantwortungsvoller Konsum und Produktion

- Sicherung von Materialressourcen;
- Abfallmanagement verbessern;
- Ressourceneffizienz steigern;
- Materialwert erhalten;
- Materialverbrauch reduzieren;
- Treibhausgas-, Luftschadstoff- und Wasseremissionen senken;
- Umweltgerechtigkeit fördern



2 Sicherung neuer Materialien

Die Nachfrage nach Massenmaterialien wie Glas, Aluminium und Silizium für zukünftige PV-Systeme wird voraussichtlich keine Marktstörungen oder Versorgungsknappheiten verursachen. Jedoch:

Kristalline Silizium-Module (c-Si):

Eine Studie ergab, dass die Silbernachfrage bis 2050 unter einem globalen Dekarbonisierungsszenario fast 40 % der weltweiten Produktion ausmachen könnte.¹

Cadmium-Tellurid-Dünnschichtmodule (CdTe):

Eine Studie zeigte, dass die globale PV-Nachfrage nach Tellur bis 2030 und darüber hinaus das Angebot von 2018 erreichen oder sogar übersteigen könnte.²

Recovered Materials from Recycling:

- Glas
- Silizium
- Massenmetalle (Aluminium, Stahl, Kupfer)
- Spezialmetalle (Zinn, Blei, Silber, Kupfer)
- Polymere
- Verpackungsmaterialien (Holz, Karton)

➔ **Eine Kreislaufwirtschaft stärkt die langfristige Sicherheit, Zuverlässigkeit und Widerstandsfähigkeit industrieller Lieferketten.**

3 Gesellschaftliche Vorteile

Die Kreislaufwirtschaft bietet gesellschaftliche Vorteile, indem sie die Materialversorgung sichert, neue Arbeitsplätze in der grünen Wirtschaft schafft, Innovationen fördert und das wirtschaftliche Wachstum unterstützt.

¹ U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. 2021. "Solar Futures Study".

² S. Carrara, P. Alves Dias, B. Plazzotta, C. Pavel. 2020. "Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system". EUR 30095 EN, Publication Office of the European Union.



Herausforderungen für die Kreislaufwirtschaft

1. Kosten

Derzeit sind die Kosten für das Recycling höher als die für die Entsorgung auf Deponien. Da viele PV-Systeme ihr Lebensende noch nicht erreicht haben, sind die Volumina gering, und es bedarf weiterer Erfahrung und Innovationen, um die Kosten zu senken.



2. Mögliche kontraintuitive Umweltauswirkungen

Einige Strategien der Kreislaufwirtschaft könnten paradoxerweise größere Umweltauswirkungen haben als die Deponierung. Zielgerichtete Forschung ist notwendig, um solche Zielkonflikte zu identifizieren und optimal zu lösen.

3. Herausforderungen im Recyclingprozess

PV-Module sind so konzipiert, dass sie extremen Umweltbedingungen bis zu drei Jahrzehnte standhalten können, was ihre Robustheit und Langlebigkeit deutlich macht. Diese Beständigkeit stellt jedoch eine große Herausforderung für den Recyclingprozess dar. Traditionelle Recyclingmethoden stoßen häufig an ihre Grenzen, wenn es darum geht, PV-Module effizient und wirtschaftlich zu delaminieren. Dies erfordert die Entwicklung neuer technologischer Ansätze. Sowohl in der Industrie als auch in der akademischen Forschung wird intensiv daran gearbeitet, diese Herausforderung zu bewältigen.



Status der Kreislaufwirtschaft in der Photovoltaik

Regulations in selected IEA-PVPS member countries

-  **EU:** spezifische Vorschriften für das Lebensende (End-of-Life, EoL) von PV-Modulen
-  **Südkorea:** 2023 wurde die erweiterte Herstellerverantwortung eingeführt
-  **Australien:** PV-Module sollen unter das „Product Stewardship Act 2011“ fallen, und es laufen Diskussionen auf staatlicher Ebene.
-  **USA:** spezifische Vorschriften für das Lebensende von PV-Modulen in einigen Staaten
-  **Japan:** keine spezifischen Vorschriften für PV-Abfälle existieren, aber zahlreiche Recyclingaktivitäten und Forschungsprojekte zur Verwaltung von PV-Modulen am Ende ihres Lebenszyklus. Kommerzielle Recyclingtechnologien sind verfügbar.
-  **China:** Vorschriften und Richtlinien zum Recycling und zur Verwaltung von PV-Modulen befinden sich noch in der Entwicklung. Die ECOPV-Initiative, die 2020 gestartet wurde, hat das Ziel, eine „grüne Lieferkette“ für PV-Module zu etablieren.



IEA-PVPS Task 12: Beiträge zur Kreislaufwirtschaft in der Photovoltaik

Ziele

- **Quantifizierung des ökologischen Profils von PV-Strom:** Verbesserung der Nachhaltigkeit entlang der Lieferkette und Vergleich mit anderen Energietechnologien;
- **Förderung der Kreislaufwirtschaft in der PV-Technologie:** Entwicklung, Einführung und Analyse neuer Ansätze sowie Beobachtung gesetzlicher Entwicklungen und Unterstützung technischer Standards;
- **Analyse synergetischer Auswirkungen:** Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen PV-Systemen und ihrer Umwelt;
- **Berücksichtigung sozialer und sozioökonomischer Aspekte:** Identifikation und Bearbeitung von Herausforderungen, die für das Marktwachstum wichtig sind;
- **Ergebnisse verbreiten:** Kommunikation der Analysen an technische Experten, politische Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit.

Sub-Tasks



- 1 Kreislaufwirtschaft (Circular Economy, CE)
- 2 Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA)
- 3 Ökosystemintegrierte Photovoltaik (Ecosystem Integrated PV, EcoPV)
- 4 Umfassendere Nachhaltigkeitsaspekte (Broader Sustainability Aspects)



Bibliographie

- R. Frischknecht, K. Komoto, T. Doi. 2023. "Life Cycle Assessment of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Delamination With Hot Knife Technology." IEA PVPS Task 12 Report T12-25:2023. ISBN 978-3-907281-41-3.
- K. Komoto, M. Held, C. Agrafeil, C. Alonso-Garcia, A. Danelli, J.-S. Lee, L. Fang, J. Bilbao, R. Deng, G. Heath, et al. 2022. "Status of PV Module Recycling in Selected IEA PVS Task 12 Countries." IEA PVPS Task 12 Report T12-24:2022. ISBN 978-3-907281-32-1.
- R. Frischknecht, L. Krebs. 2022. "Resource Use Footprints of Residential PV Systems". IEA PVPS Task 12, IEA PVPS Task 12 Report T12-22:2022. ISBN 978-3-907281-25-3.
- G. Heath, D. Ravikumar, B. Hansen, E. Kupets. 2022. "A critical review of the circular economy for lithium-ion batteries and photovoltaic modules - status, challenges, and opportunities". Journal of the Air & Waste Management Association. Volume 72 (6).
- N. Rajagopalan, A. Smeets, K. Peeters, S. De Regel, T. Rommens, K. Wang, P. Stolz, R. Frischknecht, G. Heath, D. Ravikumar. 2021. "Preliminary Environmental and Financial Viability Analysis of Circular Economy Scenarios for Satisfying PV System Service Lifetime." IEA PVPS Task 12 Report T12-21:2021. ISBN 978-3-907281- 23-9.
- J. Bilbao, G. Heath, A. Norgren, M. Lunardi, A. Carpenter, R. Corkish. 2021. "PV Module Design for Recycling." IEA PVPS Task 12, Report T12-23:2021. ISBN 978-3-907281-27.
- L. Krebs, R. Frischknecht, P. Stolz, P. Sinha. 2020. "Environmental Life Cycle Assessment of Residential PV and Battery Storage Systems." IEA PVPS Task 12 Report T12-17:2020. ISBN 978-3-906042-97-8.
- G. Heath, T. Silverman, M. Kempe, M. Deceglie, T. Remo, T. Barnes. 2020. "Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy". Nature Energy 5, 502-510 (2020).
- K. Komoto, J.-S. Lee. 2018. "End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies". IEA PVPS Task 12 Report T12-10:2018. ISBN 978-3-906042-61-9.