

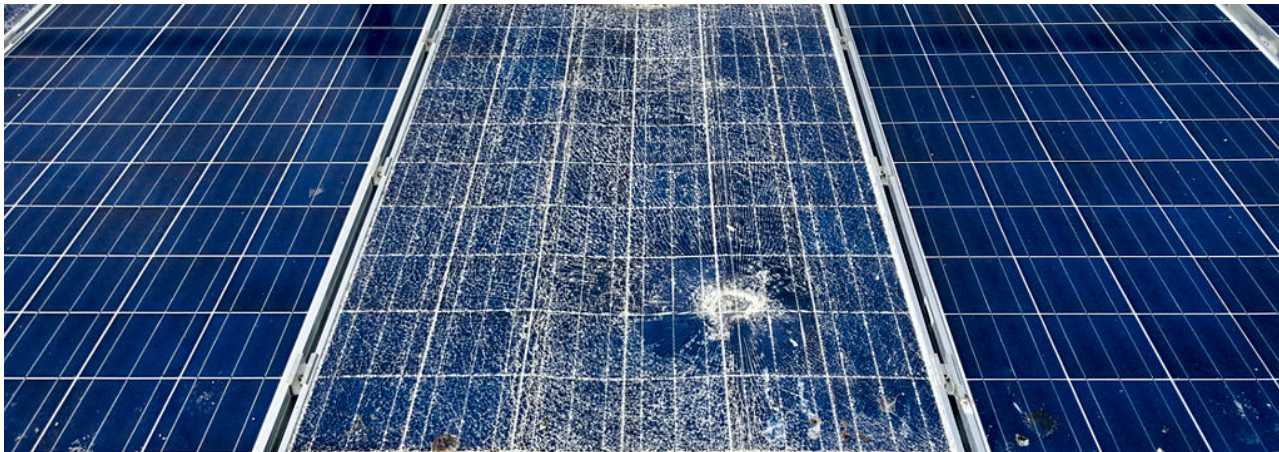
Recycling und Wiederverwendung von Photovoltaik-Modulen - Aktueller Stand und Herausforderungen

Mag. Alfred Ledersteger



Inhalte

- Photovoltaik-Altmodule heute
- PV-Modul-Arten und deren Recycling
- Wiederverwendung von PV-Modulen
- Recycling-gerechtes Design von PV-Modulen
- Schlussfolgerungen



(Quelle: Marina Lohrbach / stock.adobe.com)

Photovoltaik-Altmodule heute

- „**Green Deal**“ - große Anstrengungen in der EU , den **Aufbau und Einsatz von Photovoltaik-Anlagen voranzutreiben**
- Photovoltaik liefert **nachhaltige Energie mit enormem Ausbaupotential**
- Photovoltaik ist **integraler Bestandteil der anstehenden Energiewende**, die die schlimmsten Folgen des menschengemachten Klimawandels und der Abhängigkeit von menschenverachtenden Regimen abfedern soll.

Photovoltaik-Altmodule heute

- durchschnittliche Lebenszeit 20 - 25 Jahre
- stark steigende Mengen an ausgedienten Modulen in den nächsten Jahren
- bisher noch keine ausreichend nachhaltigen Verwertungslösungen
- Bis 2050 alleine in Österreich 64.000 t ausgeschiedene PV-Module pro Jahr prognostiziert
(Bundesministerium für Klimaschutz, 2022)

Photovoltaik-Altmodule heute

- Heute Mengen ausgeschiedener PV-Module noch sehr gering
- Großteil nicht getrennt erfasst, landet in diffusen Stoffströmen wie Elektronikschrott
- für qualitativ hochwertiges Recycling nicht verfügbar

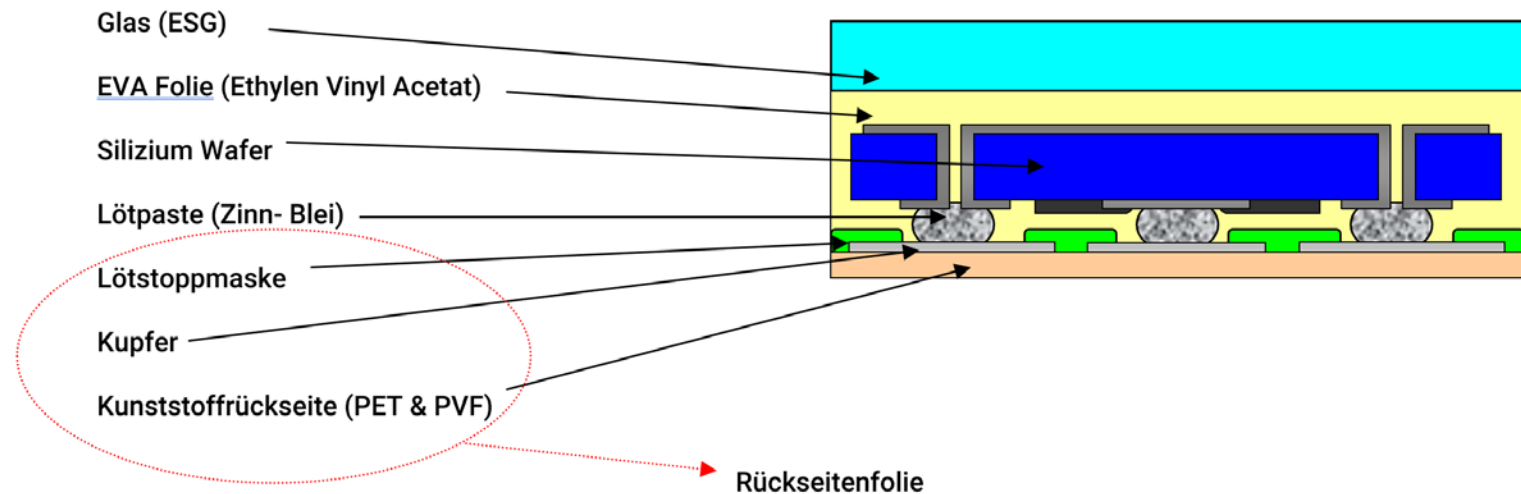


PV-Modul-Arten und deren Recycling

- Arten von PV-Modulen (1):
 - Kristalline Silizium-Module (c-Si)
 - monokristallin/ polykristallin
 - lichtaktive Komponente **hochreines Silizium**, außerdem **Silber** v. a. in den Leitungsbahnen („Ribbons“)
 - **In alten c-Si-Modulen bis zu 20 g Silber** enthalten
 - Neuere Module weisen einen deutlich geringeren Silbergehalt auf (4 bis 6 g Ag/t Altmodule), Tendenz sinkend (Sander, 2007)

PV-Modul-Arten und deren Recycling

- Schichtaufbau eines c-Si-Moduls (Beispiel):



Gewicht der Komponenten pro m²

Glas:	10 kg/m ²
EVA Folie:	0,32 kg/m ²
Wafer:	0,43 kg/m ²
Lötpaste:	0,007kg/m ²
Rückseitenfolie:	0,7 kg/m ²

PV-Modul-Arten und deren Recycling

- Arten von PV-Modulen (2):
 - verschiedene Arten von **Dünnschichtmodulen** (Marktanteil bis 2012 noch bei 10%, heute kaum mehr verbaut)
 - lichtaktive Komponenten:
amorphes Silizium(a-Si), Cadmiumtellurid,
Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
 - **Einige dieser Rohstoffe sind giftig und/oder selten**
 - aufgrund der geringen Gehalte **nicht wirtschaftlich rückgewinnbar**
 - Dünnschichtmodule auf Silizium-Basis von anderen Dünnschichtmodulen **optisch schwer unterscheidbar**

PV-Modul-Arten und deren Recycling

- Recycling von kristallinen Siliziummodulen (1):



- 2 bis 4 % Gehalt an hochreinem Silizium
- Prognosemenge 2050 Österreich 1300 bis 2600 t Silizium-Wafer-Schrott
- Ältere c-Si-Module - dickere Si-Wafer (ca. 400 μm)
- Neue Wafer 190 μm
- Rückgewinnung intakter Wafer daher kaum möglich
- Wafer-Bruchfraktion als Ausgangsmaterial für Produktion neuer Wafer

PV-Modul-Arten und deren Recycling

- **Recycling von kristallinen Siliziummodulen (2):**
 - Ökobilanzierung zeigt: Silizium-Rückgewinnung vor allem aus ökologischer Sicht sehr wichtig
 - **Produktion von 1 kg hochreinem Silizium verbraucht ca. 80 kWh und setzt etwa 50 kg CO₂ frei**
 - **Für jedes MW produzierter PV-Module betragen die durch das Silizium verursachten CO₂-Emissionen 200 t**
 - **GWP eines PV-Moduls um über 20% vermindert, wenn das enthaltene Silizium rückgewonnen wird (Sander, 2007)**
 - **Aus heutiger Sicht Rückgewinnung von Silizium aus PV-Modulen ökonomisch nicht interessant**

PV-Modul-Arten und deren Recycling

- **Recycling von kristallinen Siliziummodulen (3):**
 - Erst wenn zu erwartende **Recycling-Richtlinien** für PV-Module seitens der EU vorgegeben bzw. entsprechende **Lenkungssteuern zur Kostenwahrheit** eingeführt werden, kann die Rückgewinnung von hochreinem Silizium vorangetrieben werden.
 - In Pilotanlage zum Recycling von PV-Modulen in Deutschland nachgewiesen, dass Rückgewinnung von intakten und zerbrochenen Si-Wafern möglich ist
 - niedriger Durchsatz bei diesem Verfahren, relativ hohe Kosten - Einstellung. (Kummer, 2020)

PV-Modul-Arten und deren Recycling

- Recycling von kristallinen Siliziummodulen (4):



- Sogenanntes PV-Recycling beschränkt sich heute auf **Rückgewinnung der Glasfraktion und des Aluminium-Rahmens**
- quantitative Recyclingquoten eingehalten
- **kein „echtes“ Recycling** weil gerade die in der Herstellung klimaschädlichste Komponente, das **hochreine Silizium** nicht rückgewonnen wird

PV-Modul-Arten und deren Recycling

- **Recycling von kristallinen Siliziummodulen (5):**
 - Beispiel für rein **mechanisches Verfahren**:
Reiling Unternehmensgruppe verwertet an verschiedenen Standorten in Deutschland PV-Module
 - Manuelle Demontage des Aluminiumrahmens,
Grobzerkleinerung mittels Einwellenshredder,
Abtrennung des Folienlaminats vom Glas (Hammermühle),
Handklaubung von Verunreinigungen,
Metallabtrennung mittels Magnet- u. Wirbelstromabscheidung,
Absaugung der vom Glas getrennten Kunststoffe,
optische Sortierverfahren zur Ausscheidung von Verunreinigungen.

PV-Modul-Arten und deren Recycling

- **Recycling von kristallinen Siliziummodulen (6):**
 - **Glasfraktion geht in die Schaumglasproduktion** (Verunreinigungen des Glases erlauben keinen höherwertigen Einsatz in der Hohl- und Flachglasproduktion)
 - **Recyclingquote von 80% erreicht**
 - **wertvolle Rohstoffe gehen aber verloren**
 - **Si-Wafer-Schrott landet in diesem Fall in einer zu entsorgenden Restfraktion bzw. als Verunreinigung in der Glasfraktion**

PV-Modul-Arten und deren Recycling

- **Recycling von kristallinen Siliziummodulen (7):**



Projekte, die ein **tiefergehendes Recycling** zum Ziel haben:

Beispiel Pilotanlage Lux Chemtech GmbH
Tangermünde (ehem. Loser-Chemie)

- man. Vorsortierung in versch. Typen,
Selektive Vorzerkleinerung –
Halbleiterschichten freigelegt,
- **Trennung Glas – Kunststoff chemisch, Glas sehr rein rückgewonnen – Flachglasproduktion,**
Mittels AlCl_3 -Lösung aluminiumhaltige Schichten gelöst,
Silber - Silbernitratlösung, **Si als sehr reiner Wafer-Schrott - neue Wafer**

PV-Modul-Arten und deren Recycling

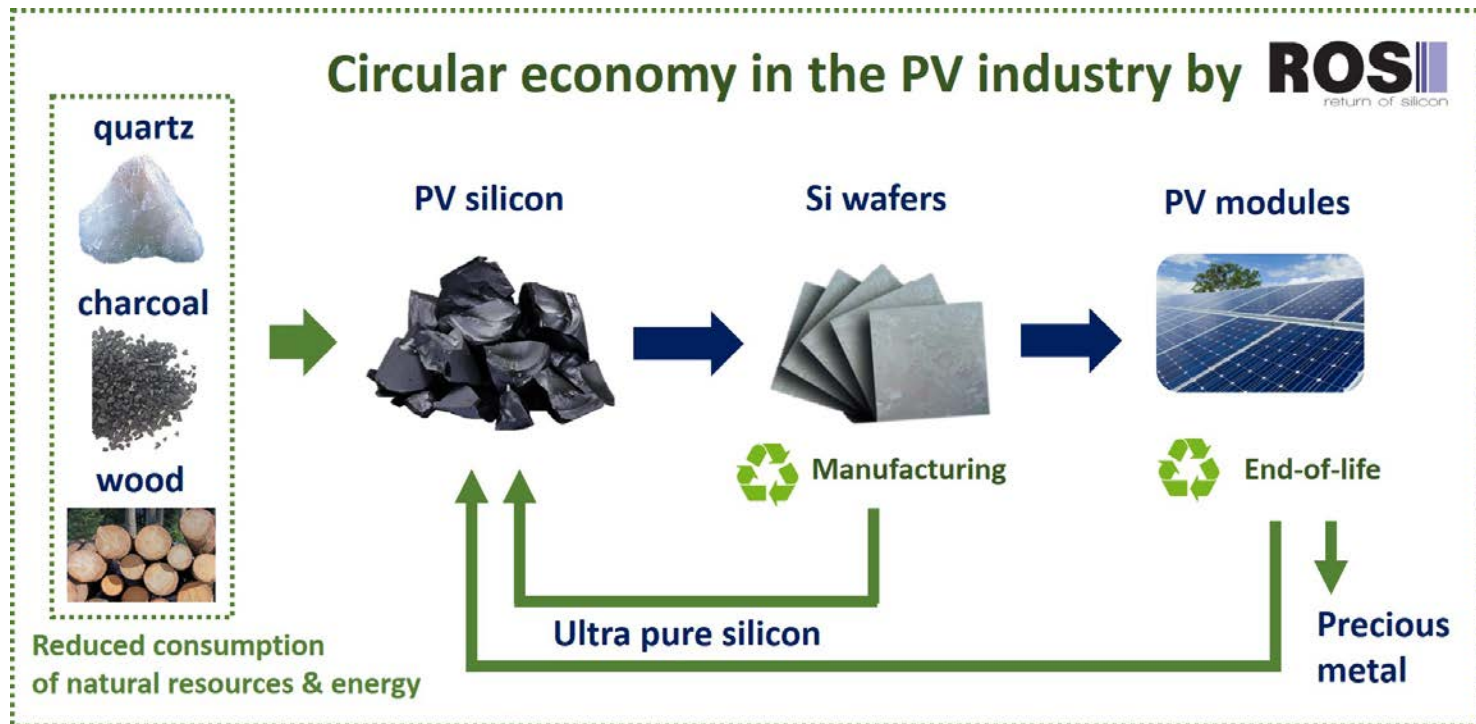
- **Recycling von kristallinen Siliziummodulen (8):**
 - **ReProSolar** - von der EU mit 4,8 Mio. € über EIT RawMaterials gefördertes Projekt
 - **Bis 2023** sollen **5.000 Tonnen stillgelegter PV-Module** jährlich in einer **Demonstrationsanlage** verarbeitet werden
 - Projekt läuft vorerst bis **Jänner 2025**.
 - **Rückgewinnung in PV-Modulen** enthaltener **wertvoller Metalle** und des **hochreinen Siliziums** im Vordergrund

PV-Modul-Arten und deren Recycling

- **Recycling von kristallinen Siliziummodulen (9):**
 - mehrere Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette des Recyclings von PV-Modulen
 - ROSI - Expertise Reinigung von Silizium und Silber
 - FLAXRES - Delaminierungs-Prozess
 - Evonik - neue Verfahren zur Silizium-Produktion
 - Grenoble INP - für die Qualität der recycelten Materialien zuständig
 - TECNALIA – Messung ökologischer Gesamtnutzen mittels LCA
 - Projekt wird von Veolia Deutschland koordiniert
(European project ReProSolar led by Veolia Germany will test full photovoltaic recycling on an industrial scale, 2021)

PV-Modul-Arten und deren Recycling

- Recycling von kristallinen Siliziummodulen (10):



PV-Modul-Arten und deren Recycling

- Recycling von Dünnschichtmodulen (1):



- First Solar Manufacturing GmbH Frankfurt/ Oder betreibt **einzig**e Anlage im Regelbetrieb für das **Recycling von Cadmiumtellurid (CdTe)-Modulen in Deutschland**
- Delamination durch 2-stufige Zerkleinerung (Brechen / Hammermühle auf 5mm)

PV-Modul-Arten und deren Recycling

- **Recycling von Dünnschichtmodulen (2):**
 - Trennung von Glas und Kunststoff - Halbleitermaterial freigelegt
 - Halbleiterschicht mit H_2SO_4 u. H_2O_2 in Edelstahltrommel gelöst
 - Schraubenentwässerer trennt Feststoff und Säure
 - Glas und Folie durch Siebung getrennt u. gewaschen
 - Cd und Te aus der Lösung gefällt, in Raffinerie aus dem Filterkuchen zurückgewonnen
 - Angaben zur Recyclingrate von Cd und Te liegen nicht vor
 - First Solar nimmt über ein **freiwilliges Sammelsystem** nur **Eigenmodule** zurück
 - Dünnschichtmodule anderer Hersteller werden nicht übernommen.

Wiederverwendung von PV-Modulen

- „Refurbishing“ gebrauchter PV-Module
(z. B. Rinovasol GmbH Den Haag)
 - Lt. Firmenbetreiber **93% der ausgeschiedenen Module aufbereitet und wieder verwendet**
 - Meist nur Rückseitenfolien brüchig, wodurch Feuchtigkeit in Modul eindringt
 - Durch einfache Kontrolle auf Funktionsfähigkeit bzw. **Erneuerung der Rückseitenabdeckung** mit Spezialpolymer können PV-Module in **zweiten Lebenszyklus** geschickt werden
 - „Alte“ Module haben oft **geringeren Wirkungsgrad** als neu hergestellte
 - dennoch für zahlreiche Anwendungen und Einsatz in wirtschaftlich benachteiligten Ländern oft beste Wahl

Wiederverwendung von PV-Modulen

- „Refurbishing“ gebrauchter PV-Module
(z. B. Rinovasol GmbH Den Haag)



Recyclinggerechtes Design von PV-Modulen

- auf vollständige Wiederverwendbarkeit bzw. stoffliche Verwertbarkeit optimierte PV-Module – z. B. sogenannte „NICE“-Module
 - Unterschied zu laminierten Standardmodulen: **Hauptkomponenten** der NICE (New Industrial Cell Encapsulation)-Module **nicht in Verbundform**, keine Verlötlungen oder Laminierungen
 - Module einfach in ursprüngliche Komponenten zerlegbar
 - **Gläser, Kupferverbindungen, Si-Zellen als vollständige Teile** und frei von Anhaftungen für Wiederverwendung oder High-quality Recycling gewonnen (Einhaus, 2018)

Schlussfolgerungen

- Um grünen Solarstrom, eine der wichtigsten Säulen des Green Deal, nicht **durch unzureichende Recyclingverfahren** für ausgediente PV-Module **indirekt mit CO₂-Emissionen zu belasten**, bedarf es besserer und **tiefergehender Verwertungsverfahren**, die vor allem das hochreine Silizium einem echten Recycling zuführen
- Bereich der Vorbereitung zur **Wiederverwendung ausgedienter PV-Module** sollte ausgebaut werden
- **Neue Module** sollten für **optimale Recyclingfähigkeit** gestaltet werden