

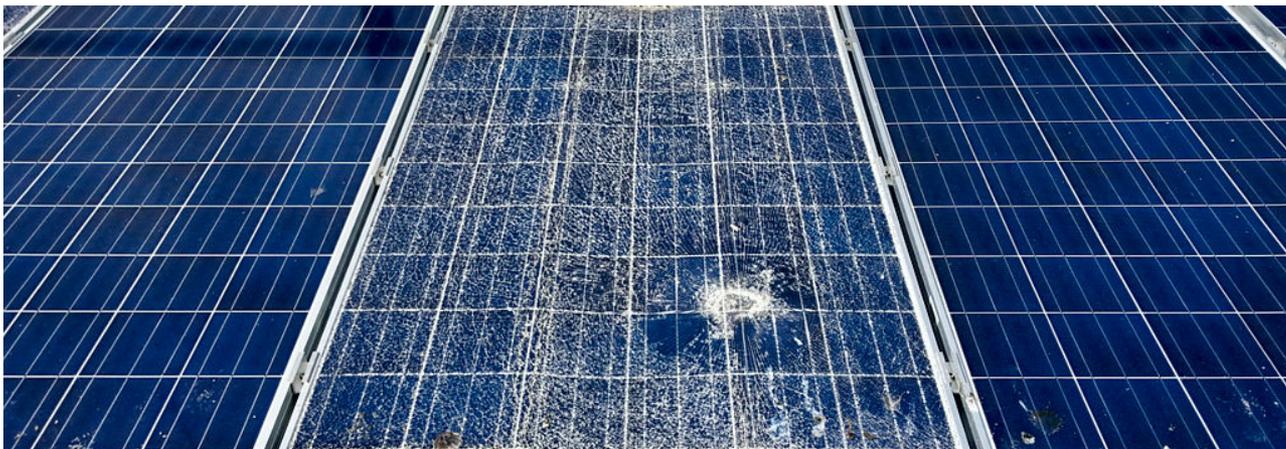
# Recycling und Wiederverwendung von Photovoltaik-Modulen - Aktueller Stand und Herausforderungen

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

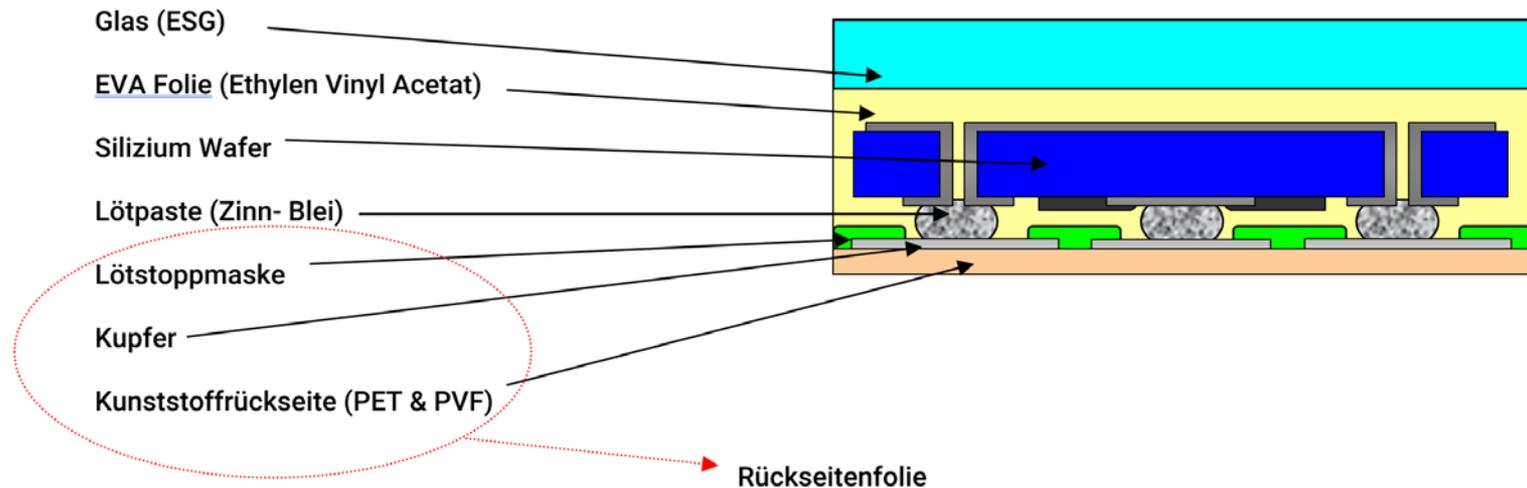


## PV-Modul-Arten und deren Recycling

- 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 m<sup>2</sup>

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

## 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  $\mu\text{m}$ )
- Neue Wafer 190  $\mu\text{m}$
- 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 CO<sub>2</sub> frei
  - Für jedes MW produzierter PV-Module betragen die durch das Silizium verursachten CO<sub>2</sub>-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  $\text{AlCl}_3$ -Lösung aluminiumhaltige Schichten gelöst,  
Silber - Silbernitratlösung, **Si als sehr reiner Wafer-Schrott - neue Wafer**

## PV-Modul-Arten und deren Recycling

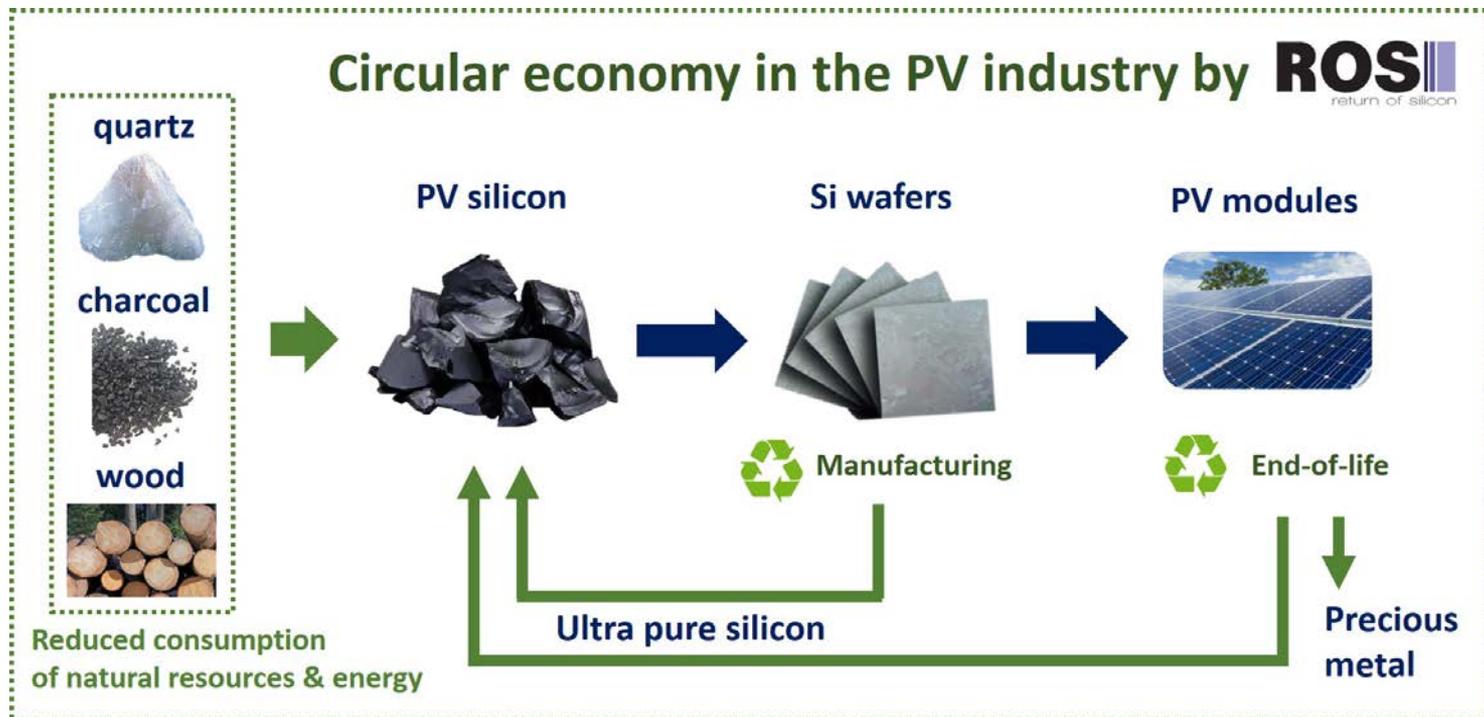
- **Recycling von kristallinen Siliziummodulen (8):**
  - **ReProSolar** - von der EU mit 4,8 Mio. € über EIT RawMaterials gefördertes Projekt
  - **Bis 2023** sollen 5.000 Tonnen stillgelegter PV-Module jährlich in einer **Demonstrationsanlage** verarbeitet werden
  - Projekt läuft vorerst bis **Jänner 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  $\text{H}_2\text{SO}_4$  u.  $\text{H}_2\text{O}_2$  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 CO<sub>2</sub>-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