

# Ausgediente Solarmodule als Rohstoffquelle

---

**Dr. Andreas Obst**  
Fraunhofer Center für Silizium Photovoltaik

**München, 15.05.2024**

# Fraunhofer CSP in Halle (Saale)

Wer wir sind

- **gegründet 2007** als gemeinsame Einrichtung des Fraunhofer IMWS und des **Fraunhofer ISE**
- **Standorte Halle (Saale)** und **Schkopau**
- angewandte Forschung in der **Qualitätssicherung** und **-analyse entlang der** gesamten **Wertschöpfungskette**
  - # **Recycling, Wafering und Kristallisation**
  - # Solarzellen- und Moduldiagnostik sowie Metrologie,
  - # Material-, Komponenten- u. Systemzuverlässigkeit,
  - # Modultechnologie und Energiesystemsimulation
  - # Wasserstoffanalytik und -diagnostik
- rund **100 Mitarbeitende**

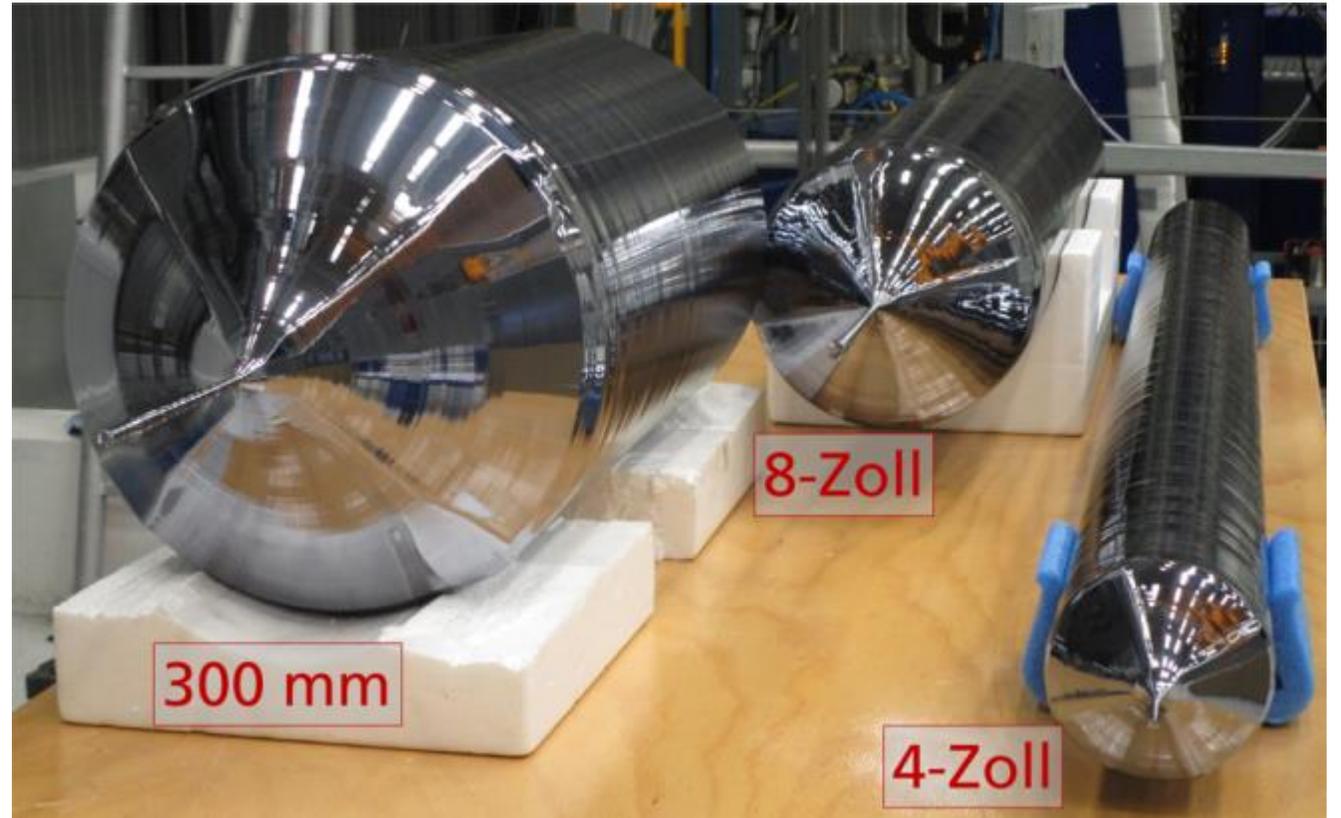


# Schwerpunkte

## Czochralski-Kristallisation



- EKZ2700
  - 60 kg, Dia up to 9"
- 2x EKZ3500
  - 180 kg, Dia up to 300mm



# Schwerpunkte

## Kristallbearbeitung

---

### Bandsäge



### Schleifgerät



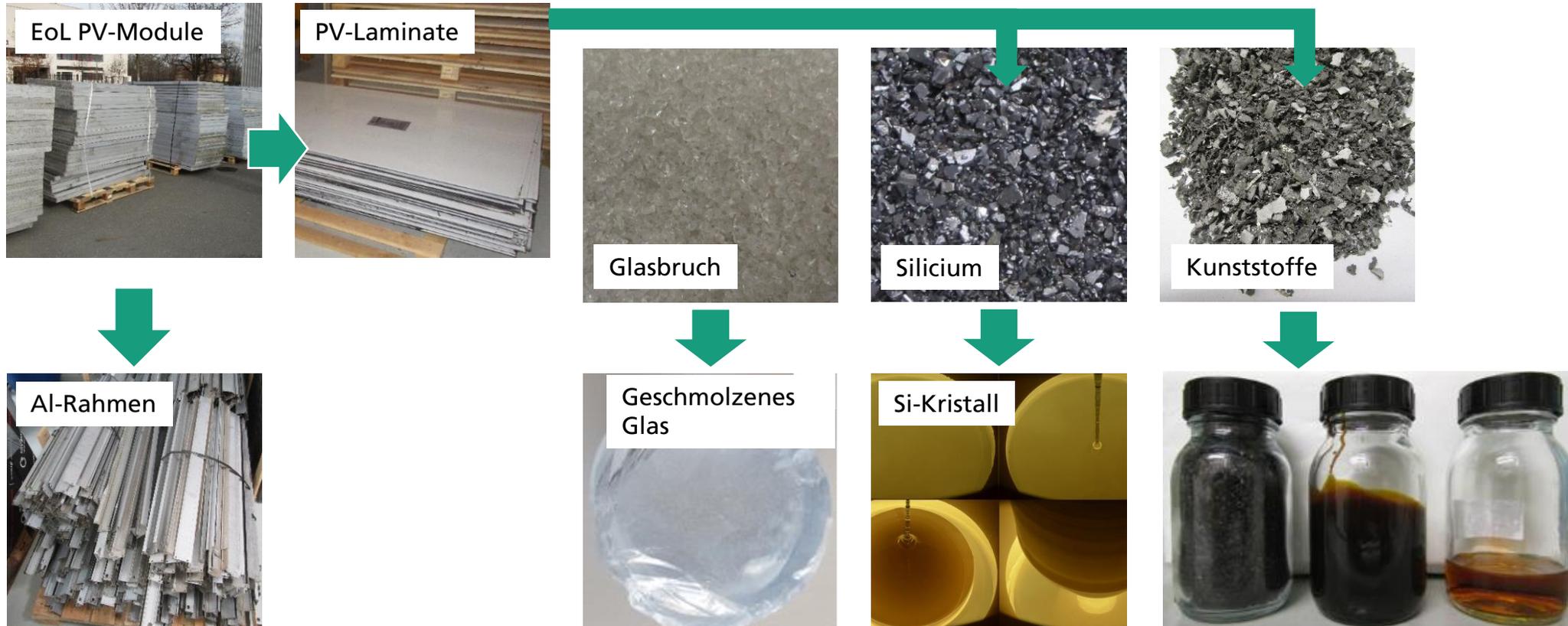
### Vieldrahtsäge

Slurry oder Diamanddraht Prozess möglich



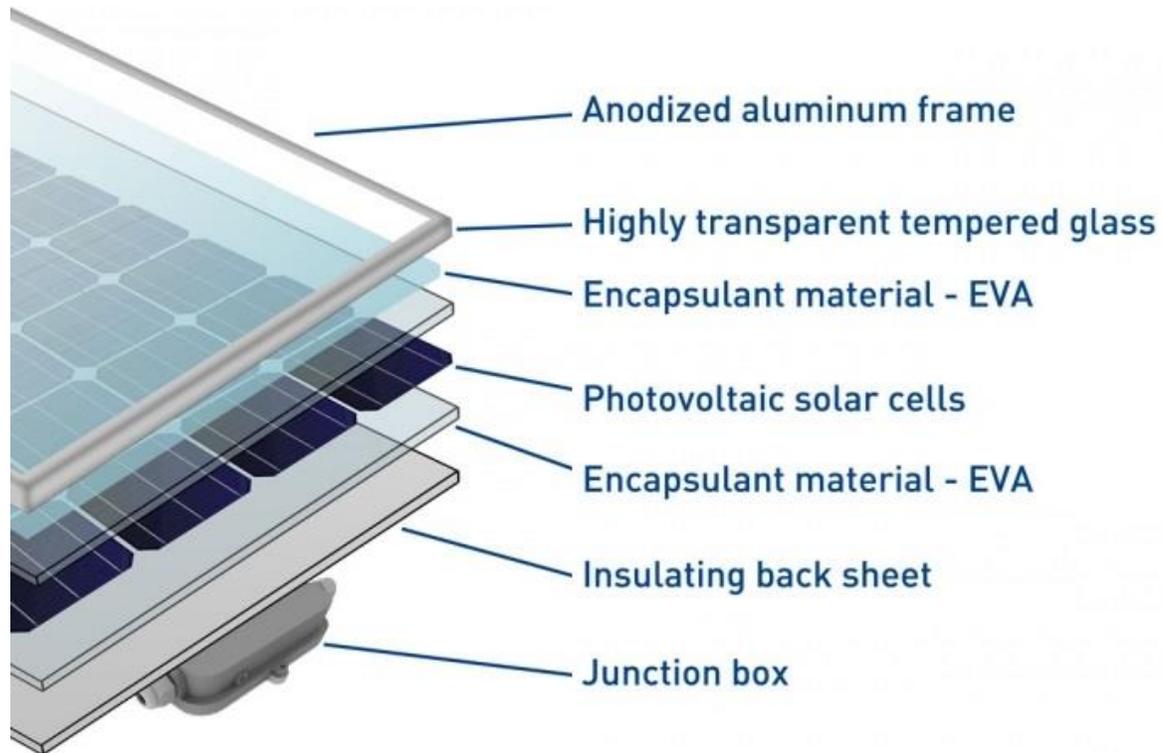
# Schwerpunkte

## PV-Recycling



# Recycling von Solarmodulen

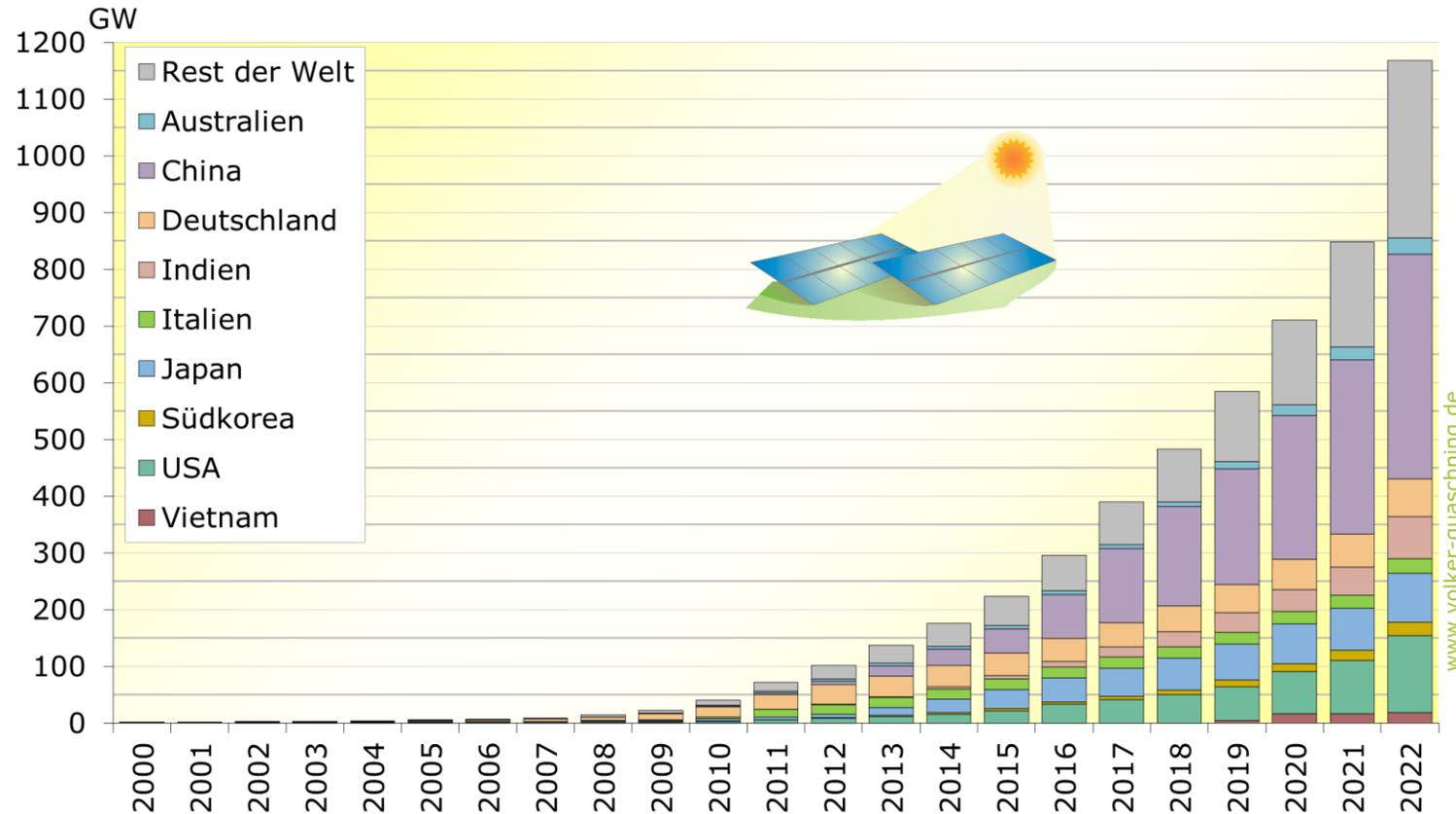
## Modulaufbau



- Marktanteil Solarmodule mit Solarzellen aus kristallinem Silicium >95 %
  - ~ 60 Solarzellen pro Modul
  - Solarzellen sind in EVA eingekapselt
  - EVA wird während der Laminierung quervernetzt
  - Backsheet: fluorhaltig, zäh, chemisch inert
- **Komplexes Verbundmaterial stellt große Herausforderungen an den Aufbereitungsprozess**

# Installierte PV Leistung

## Historische Entwicklung



Land	2022 [GWp]
China	395,9
USA	135,6
Japan	86,0
Deutschland	66,4
Indien	74,4
Australien	29,3
Spanien	25,4
Italien	25,1
Brasilien	24,9
Südkorea	24,3
Vietnam	18,4
Niederlande	17,6
Frankreich	17,6
Großbritannien	14,4
Welt	1168

# Installierte PV Leistung

## Verbaute Materialmengen (Abschätzung)

	Inst. Kapazität	Module [t]	Glas [t]	Aluminium [t]	Kunststoffe [t]	Silicium [t]	Kupfer [t]	Silber [t]	Silber [Mio. oz]
Deutschland	≈60 GWp	≈4.800.000	≈3.400.000	≈624.000	≈480.000	≈144.000	≈24.000	≈ <b>1.700</b>	≈ <b>55</b>
China	≈400 GWp	≈32.000.000	≈22.000.000	≈4.200.000	≈3.200.000	≈1.000.000	≈160.000	≈ <b>11.200</b>	≈ <b>360</b>
<b>Welt</b>	≈1.000 GWp	≈80.000.000	≈56.000.000	≈10.000.000	≈8.000.000	≈2.400.000	≈400.000	≈ <b>28.000</b>	≈ <b>900</b>

Annahmen:

- Mittlere Modulleistung: 250 Wp
- Mittleres Modulgewicht 20 kg → 1 GWp ≈ 4.000.000 Module ≈ 80.000 t Modulschrott
- Mittlere Gehalte: Si: 3 %; Kunststoffe: 10 %; Al: 13 %; Glas: 70 %; Cu: 0,5 %; Ag: 0,035 %

# Recycling von Solarmodulen

## Silberbedarf der PV-Industrie

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024F
Jahresproduktion* [Mio. oz]	1.047,0	1.046,5	1.011,8	1.000,5	1.000,3	957,4	1.004,3	1.015,4	1.010,7	1.003,8
Verbrauch PV* [Mio. oz]	59,6	81,6	99,3	87,0	74,9	82,8	88,9	118,1	193,5	232,0
<b>Verbrauch PV [%]</b>	<b>5,7</b>	<b>7,8</b>	<b>9,8</b>	<b>8,7</b>	<b>7,5</b>	<b>8,6</b>	<b>8,9</b>	<b>11,6</b>	<b>19,1</b>	<b>23,1</b>
Silberpreis* [\$ / oz]	15,68	17,14	17,05	15,71	16,21	20,55	25,14	21,73	23,35	-

- Anteil des Silberverbrauchs der PV-Industrie bezogen auf die Jahresproduktionsmenge des Silbers von 2015 bis 2023 verdreifacht, weitere Steigerung wird erwartet!
- Silberrecycling notwendig zur Stabilisierung des Rohstoffpreises!

\* [World Silver Survey 2024](https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2024/04/World-Silver-Survey-2024.pdf) (https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2024/04/World-Silver-Survey-2024.pdf)

# Recycling von Solarmodulen

Abschätzung Wertstoffpotential (Deutschland)

	Menge [t]	Anteil [%]	Wert [€/t]	Gesamtwert [Mio. €]	Anteil [%]
Glas	3.400.000	70	50	170	6,0
Aluminium	624.000	13	1.700	1.060	37,7
Kunststoffe	480.000	10	-	-	-
Silicium	144.000	3	2.000	288	10,2
Kupfer	24.000	0,5	4.500	108	3,8
Silber	1.700	0,0035	700.000	1.190	42,3

- Wertstoffe je Modul ~11,70 €
- Aktuell werden nur Glas, Aluminium und Kupfer in industriellem Maßstab zurückgewonnen
- Silicium und Silber gehen verloren
- Kunststoffe werden thermisch verwertet (Kosten!)

# Recycling von Solarmodulen

## Entwicklung des Zubaus von Solarmodulen in Deutschland

	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2011	2012	2013	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Zubau [GWp]	0,003	0,006	0,06	0,12	0,67	0,84	1,95	<b>7,4</b>	7,9	8,2	<b>2,6</b>	1,5	1,8	3,0	3,8	4,8	5,7	7,2
Anzahl Module [Mio]*	0,015	0,03	0,3	0,6	3,0	3,6	8,2	<b>30,7</b>	31,9	31,5	<b>9,8</b>	5,1	-	-	-	-	-	-
Leistung je Modul [W]**	199	205	212	28	224	231	237	<b>242</b>	248	259	<b>269</b>	297	307	316	326	375	403	407
Menge Module [1000 t]*	0,3	1	6	11	60	73	165	<b>615</b>	638	629	<b>196</b>	103	-	-	-	-	-	-
Menge Module [1000 t]***	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	107	156	211	272	320	442	703

\*Eigene Abschätzung, basierend auf der mittleren Leistung je Modul und einem mittlerem Modulgewicht von 20 kg

\*\* Werte extrapoliert nach: ITRPV-Roadmap

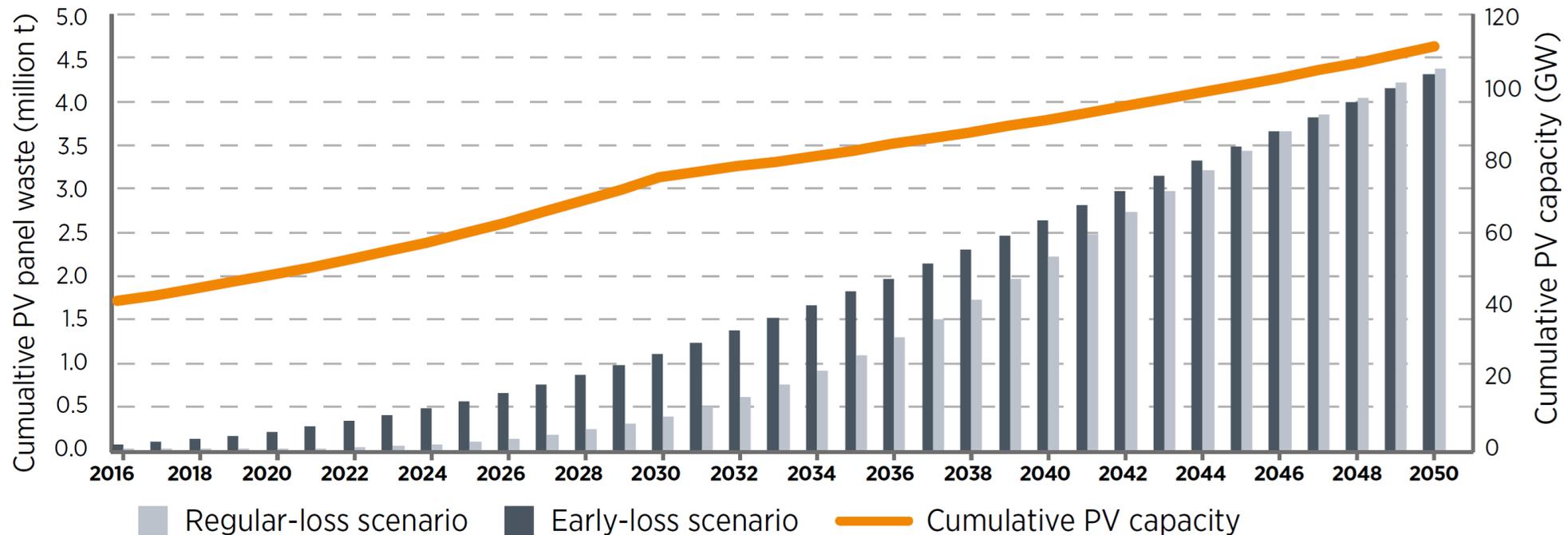
\*\*\*Menge der in Verkehr gebrachten PV-Module gemäß Stiftung EAR (<https://www.stiftung-ear.de/de/service/statistische-daten/inputmengen>)

# Recycling von Solarmodulen

## Entwicklung der Abfallmengen in Deutschland

■ Irena-Studie (2016)

**Figure 13** End-of-life PV panel waste volumes for Germany to 2050



IRENA and IEA-PVPS (2016), "End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels"

# Recycling von Solarmodulen

## Entwicklung der Abfallmengen in Deutschland

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2030	2031	2032	2033	2035	2040	2041	2042
Erwartete Menge [1000 t]*	0,3	1	1	1	6	11	11	10	60	84	615	638	629	196	104	320	442	703
Erfasste Abfallmenge** [1000 t]	2	3,6	7,9	13,4	15,4	16,0	16,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Davon gewerblich** [1000 t]	-	2,6	5,6	10,8	11	5,1	12,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Gesammelte Menge 2016 bis 2020: 42.300 t

Erwartete Menge nach installierter Anzahl an PV-Modulen: 9.300 t

Irena-Studie (2016): 2016-2020 → 20.000 t nach regular loss bzw. 200.000 t early loss

→ Teilweiser Ausfall von Modulen vor Erreichung der geplanten Lebensdauer; Entsorgung von Produktionsabfällen

\*Eigene Abschätzung, basierend auf der 20 Jahre vorher in Verkehr gebrachten Menge an PV-Modulen

\*\*Menge der zur Entsorgung angefallenen PV-Module (<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/liste-erstbehandlung.html#1126904>)

# Recycling von Solarmodulen

## Mechanische Delamination

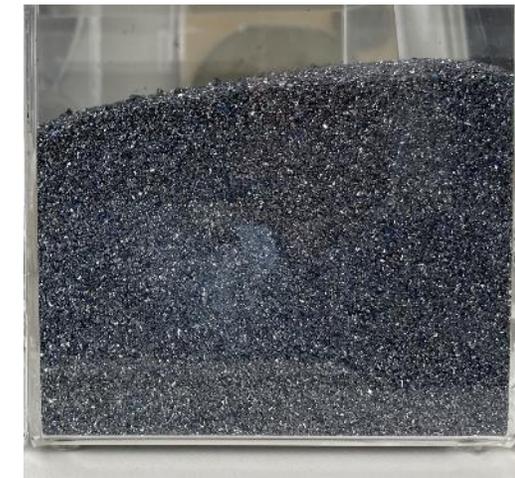
- Aufbrechen des Materialverbundes



# Recycling von Solarmodulen

## Mechanische Aufreinigung

- Trennung nach Leitfähigkeit und Dichte



# Recycling von Solarmodulen

## Nasschemisches Ätzen

### RFA

Probe	Si [%]	Cu [%]	Sn [%]	Ag [%]	Pb [%]	Bi [%]	Ca [%]	Al [%]
Zellbruch	84,5	2,0	0,4	1,1	0,09	0,03	1,3	9,8
Zellbruch nach Entmetallisierung	96.9	0.02	0.15	0.08	u.NWG	u.NWG	0.8	0.7

### GDMS

Sample	B [ppm]	Na [ppm]	Al [ppm]	P [ppm]	Ca [ppm]	Fe [ppm]	Cu [ppm]	Ag [ppm]	Sn [ppm]	Pb [ppm]
Zellbruch nach Entmetallisierung	2,2	2023	319	9,1	1070	11,8	5,0	158	228	3,2
Zellbruch nach Abätzen des Emitters	0,19	0,08	1,58	0,16	2,13	3,87	0,98	22,99	6,13	0,08



# Recycling von Solarmodulen

## Zurückgewonnene Materialien



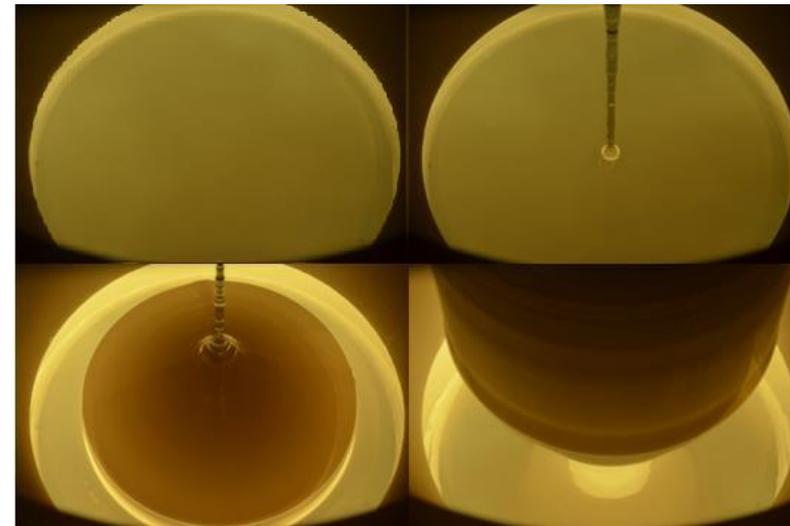
# Recycling von Solarmodulen

## Kristallisation mit Recyclingsilicium



G2 brick, quasi-mono, 60 kg

- Herstellung von quasimono VGF-Blöcken
- Kristallisation eines Cz-Monokristalls aus 100 % Recyclingsilicium



Czochralski-mono  
Ingot aus 100%  
Recyclingsilicium

# Recycling von Solarmodulen

Zellfertigung am ISE und Modulbau am CSP



PERC-Zellen mit 100%  
Recyclingsilicium:  
max. Zellwirkungsgrad  
19.7%

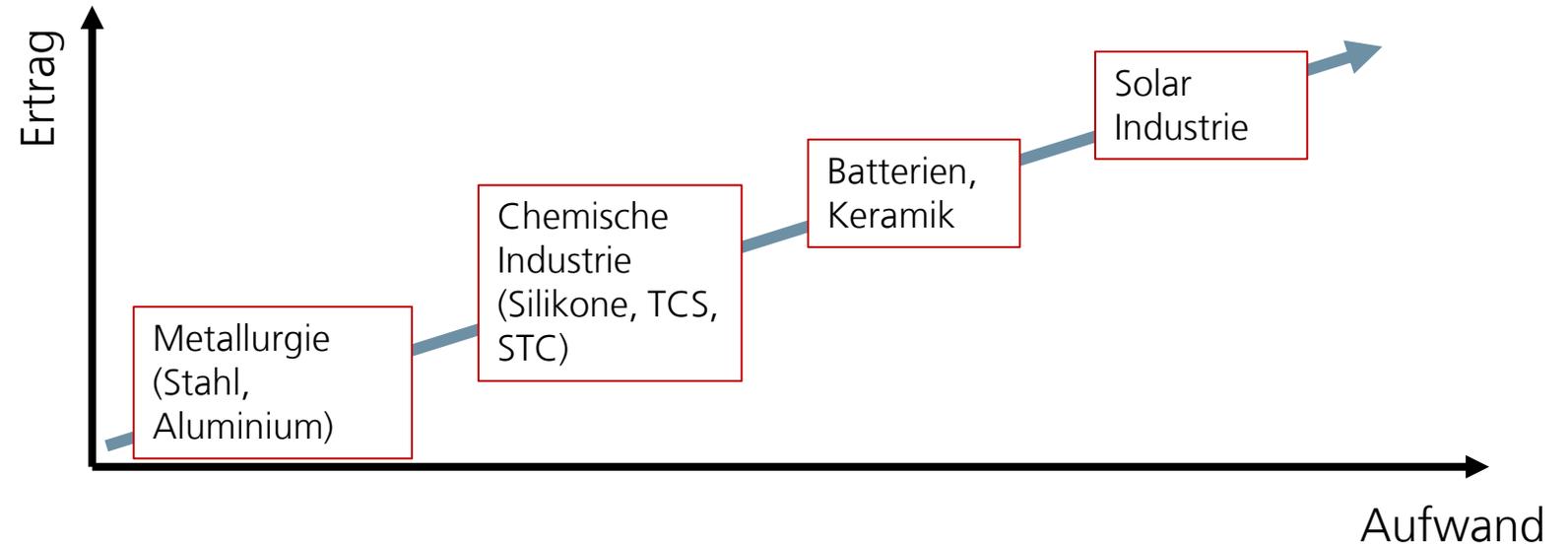
Demonstrator mit PERC-  
Zellen aus  
Recyclingsilicium im  
Solartestfeld des  
Fraunhofer CSP in Halle



# Recycling von Solarmodulen

## Verwertungsmöglichkeiten des Siliciums aus Solarmodulen

- Technologiewechsel in der PV-Industrie von p-Typ auf n-Typ
- Gemischt dotierte Abfälle → nasschemisches Entfernen des Emitters nicht mehr sinnvoll (Dotierungsart eher Zufall)
- Alternative Verwertungskonzepte nötig



↓

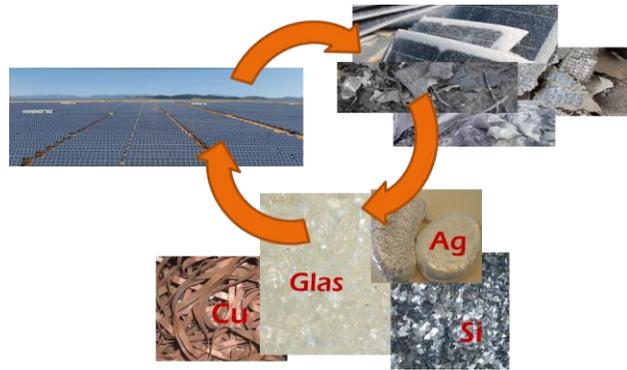
Silicium hat ein weites Einsatzgebiet. Vom metallurgischen Silicium zum hochreinen Solar-Silicium – die Entscheidung muss nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten getroffen werden. **Aber alles ist besser, als es zu verschwenden.**

# Fazit

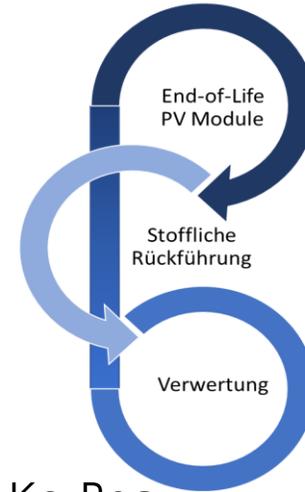
---

- Aktuell werden beim Recycling von Solarmodulen nur Glas und Aluminium in industriellem Maßstab zurückgewonnen, die Zellen selbst, also Silicium und Silber, gehen verloren
- Am Fraunhofer CSP wurden Prozesse für die Rückgewinnung aller anorganischer Materialien entwickelt – die industrielle Umsetzung ist aktuell noch offen
- Wir haben Kristalle, Wafer und PERC Zellen aus 100 % recyceltem Silicium von End-of-Life-Modulen mit einer Effizienz von 19,7 % hergestellt
- Für sekundäres Silicium gibt es ein breites Anwendungsspektrum – in jedem Fall wird durch die Rückgewinnung von Silicium eine erhebliche Menge an Treibhausgasen vermieden
- Die Rückgewinnung von Silber wird für die Sicherstellung der Silberversorgung zu akzeptablen Preisen an Relevanz gewinnen

# Danksagung



EoL-Cycle  
(0324096B)



Ko-Rec  
(03EE1089A)



ReModul  
(0324302)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



HORIZON-CL5-2022-D3-03-09

– GA 101122277

[www.apolloproject.eu](http://www.apolloproject.eu)



Funded by  
the European Union

# Kontakt

---

**Dr. Andreas Obst**

**Recycling**

**+49 345 5589 5613**

**[Andreas.obst@csp.fraunhofer.de](mailto:Andreas.obst@csp.fraunhofer.de)**

**[www.csp.fraunhofer.de](http://www.csp.fraunhofer.de)**