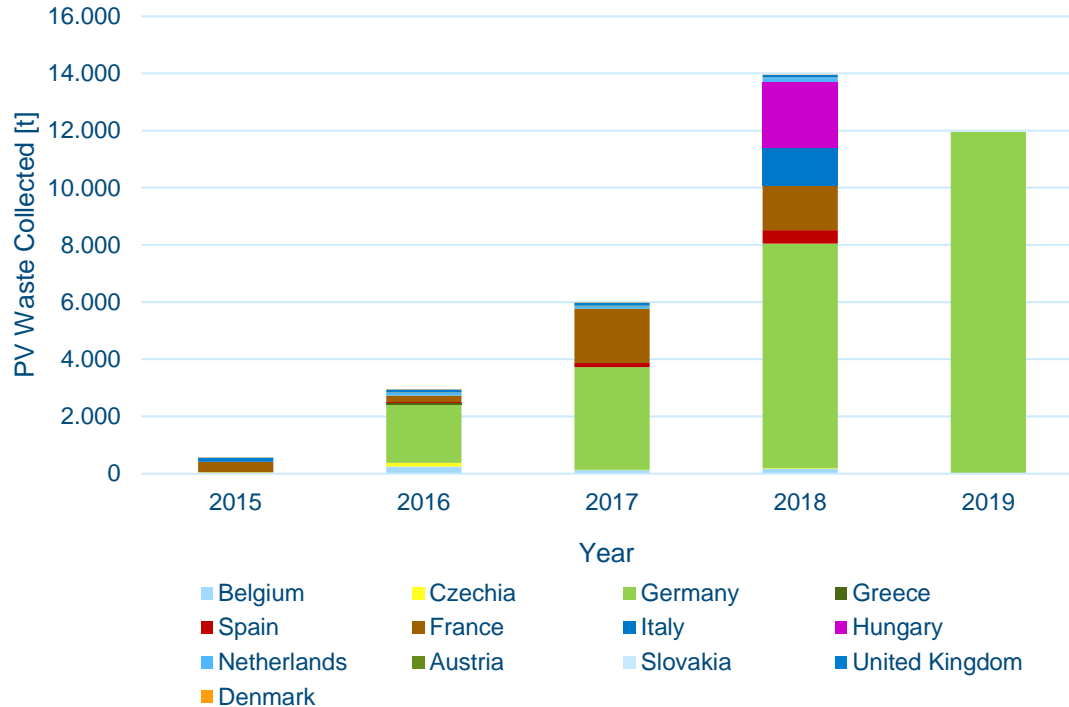


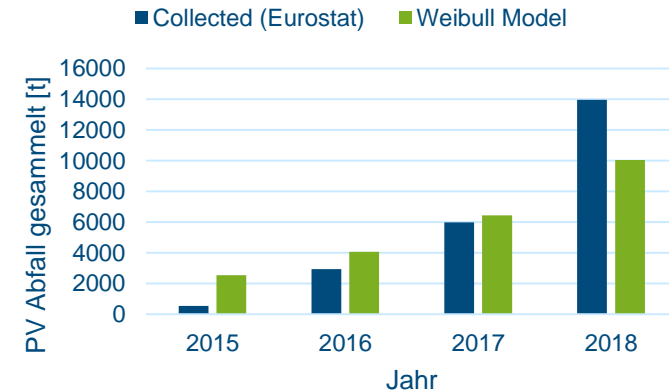
Technisches Recycling von PV-Modulen – Erfahrungen und neue Entwicklungen

Karsten Wambach

Eurostat PV Sammlungsergebnisse



Vergleich Eurostat Statistik mit Modellprognose Europa



Schweizer PV-Installationen und Abfallprognose

(nach IRENA, Swissolar & Wambach-Consulting)



Reuse, 2nd-Hand Module

- Schätzung: keine Registrierung der Re-use Module,
- Weltmarkt, jährlich ~1.000 MWp, davon ~500 MWp aus Europa
- Ca. 15 Unternehmen weltweit, 5 in EU (D), Rest in Asien (China)
- Seltene Module können als Ersatz hohe Preise erzielen, Main Stream etwa 50% Neupreis

Erträge:

Seltene c-Si Module

bis 5 €/W_p

Mainstream

0.125 €/W_p

Junger Mainstream

0.25 €/W_p

Viele Module gehen nach Afrika, Asien usw.  Risiko der Art der Abfallbehandlung

Reparatur & Wiederverwendung

- **Keine Marktdaten verfügbar**
- Reparatur bei PV Herstellern, Sammelsystemen und an PV Anlagen
- Häufig Export nach Afrika, Asien, Ost Europa
 - Reuse (und Export) erfolgt über Herstellerrücknahme und einige Sammler (USA)
 - Reparatur kann beinhalten: Kabel, Dose, Dioden, Rahmen, Rückfolie & einzelne Zellen
 - Entscheidung kostenbasiert
- **(noch) keine Reparatur-Standards:**
 - Tests
 - Garantien
 - Qualität
 - Dokumentation, Kennzeichnung

Markttrend PV & Abfall

- Kosten dominiert
 - Günstige (asiatische) Module dominieren PV Großanlagen
 - Ökonomische Nutzungszeit für PV Module bei 10 - 15 Jahren
 - Einführung neuer Technologien und Formate
 - Smartere Systeme
- Zunahme von gesetzl. Vorschriften und Standards
 - Recycling kostenoptimiert im Rahmen der gesetzl. Anforderungen
 - Regional unterschiedliche Behandlungspraktiken und Anforderungen
 - Export von Gebrauchst-Modulen

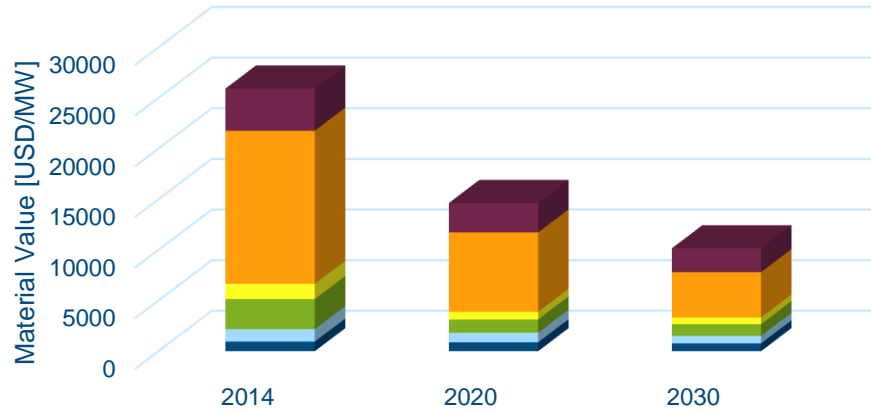
Gesetzliche Regelungen in Europa (EU)

Verpflichtung zur Abfall-Sammlung und -behandlung

- **Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive**
- Restriction of Hazardous Substances directive (**ROHS**) – PV ausgenommen
- Waste Framework Directive (**WFD**)
- Commission Decision 2000/532/EC establishing the List of Wastes (**LoW**)
- Classification, Labelling and Packaging (**CLP**) Regulation
- Persistent Organic Pollutant (**POP**) Regulation
- Eco-design Directive
- **SCIP database** since 2021

European Chemicals Agency (ECHA): “Companies supplying articles containing **Substances of Very High Concern (SVHCs)** on the Candidate List in a **concentration above 0.1% weight by weight (w/w)** on the EU market have to submit information on these articles to ECHA, as from 5 January 2021”

Materialien in Modulen



- Al (frame)
- Cu (busbars and cross connectors)
- Ag (cells)
- Si (cells)
- glass
- Cu (cables)

1																	18									
H 1.01																	He 4.00									
3	2															10										
Li 6.94	Be 9.01															Ne 20.18										
11	12											13	14	15	16	17	18									
Na 22.99	Mg 24.31											Al 26.98	Si 28.09	P 30.97	S 32.07	Cl 35.45	Ar 39.95									
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36									
K 39.10	Ca 40.08	Sc 44.96	Ti 47.87	V 50.94	Cr 51.99	Mn 54.94	Fe 55.85	Co 58.93	Ni 58.69	Cu 63.55	Zn 65.38	Ga 69.72	Ge 72.63	As 74.92	Se 78.97	Br 79.90	Kr 83.80									
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54									
Rb 85.47	Sr 87.62	Y 88.91	Zr 91.22	Nb 92.91	Mo 95.95	Tc 98.91	Ru 101.07	Rh 102.91	Pd 106.42	Ag 107.87	Cd 112.41	In 114.82	Sn 118.71	Sb 121.76	Te 127.6	I 126.90	Xe 131.29									
55	56	57-71		72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86								
Cs 132.91	Ba 137.33			Hf 178.49	Ta 180.95	W 183.84	Re 186.21	Os 190.23	Ir 192.22	Pt 195.09	Au 196.97	Hg 200.59	Tl 204.38	Pb 207.2	Bi 208.98	Po [209]	At [210]	Rn [222]								
87	88	89-103										104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr 223.02	Ra 226.03											Rf [261]	Db [262]	Sg [266]	Bh [264]	Hs [269]	Mt [278]	Ds [281]	Rg [280]	Cn [285]	Nh [286]	Fl [289]	Mc [289]	Lv [293]	Ts [294]	Og [294]
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71												
La 138.91	Ce 140.12	Pr 140.91	Nd 144.24	Pm 144.91	Sm 150.36	Eu 151.96	Gd 157.25	Tb 158.93	Dy 162.50	Ho 164.93	Er 167.26	Tm 168.93	Yb 173.06	Lu 174.97												
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103												
Ac 227.03	Th 232.04	Pa 231.04	U 238.03	Np 237.05	Pu 244.06	Am 243.06	Cm 247.07	Bk 247.07	Cf 251.08	Es [254]	Fm 257.10	Md 258.1	No 259.10	Lr [262]												

- Viele neue Materialien
- Weiterhin abnehmende Materialwerte
- Geringer ökonomischer Anreiz für hochwertiges Recycling
- Recyclingprozesse mit Annahmegebühren erforderlich

State of the Art Recycling

Großtechnische Behandlung in existierenden Recyclinganlagen

Vorteil: Investment gering

Kapazitäten für Trennung PV, Metall und Glas:

3.000- 5.000 t (exklusiv für PV), (z.B. Veolia, Rosi Solar)

bis zu 100,000 t Kapazität (laminiertes Glas), (z.B. Reiling)

Recycling Prozesse (Beispiele)

- **Mechanische Separation**
BVT: Recycling-Linie für laminiertes Glass
- Thermische Behandlung
- Selektives Ätzen
- Hot knife schneiden
- Flash light annealing (Blitzlampe, Laser)
- Lösemittelextraktion, überkrit. CO₂
- Wasserstrahlseparation
- Electrodynamische Desintegration (Selfrag AG)

Häufig verwendet

Herausforderungen:

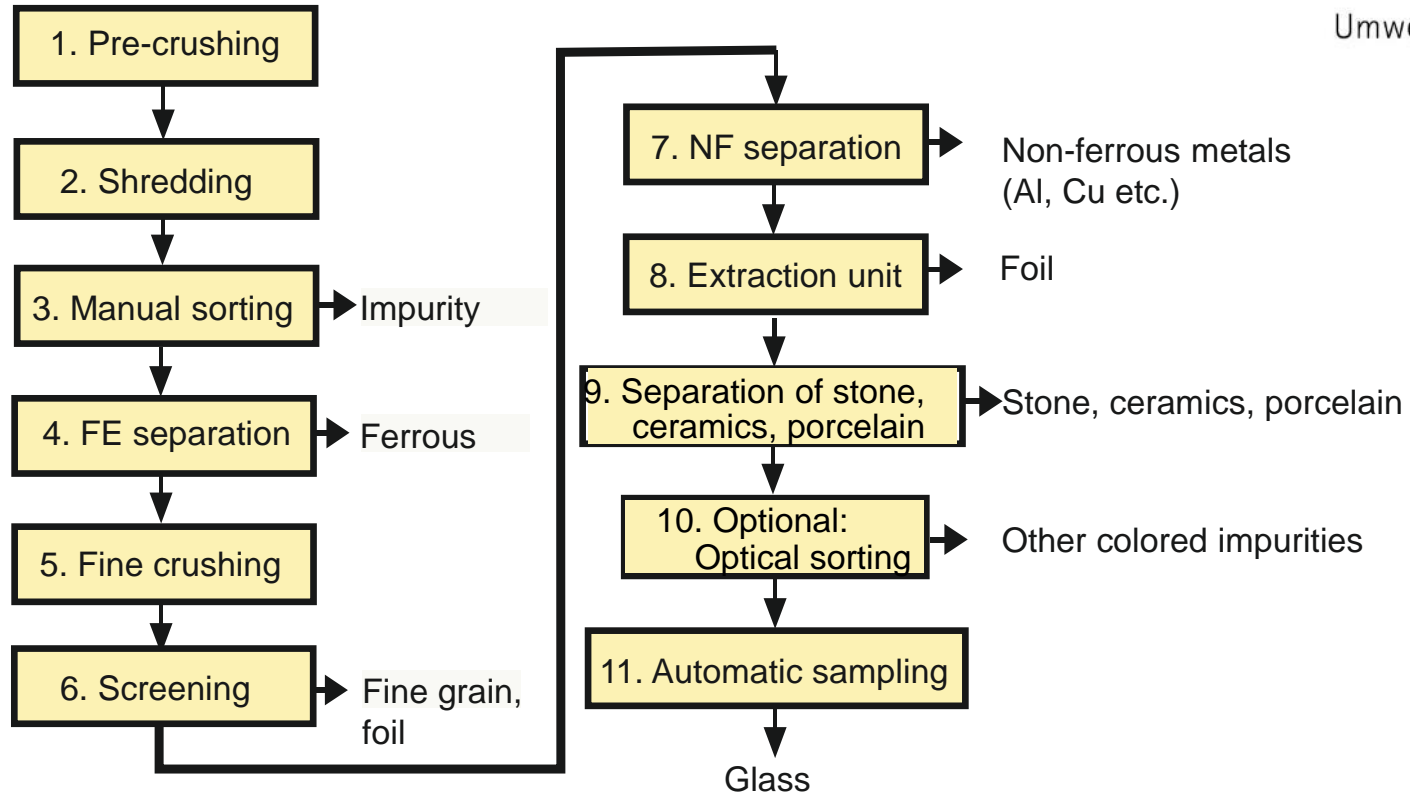
- Gleichzeitige Behandlung historischer und neuester Module verschiedenster Technologien
- Gemischter Input, schwierige Sortierung



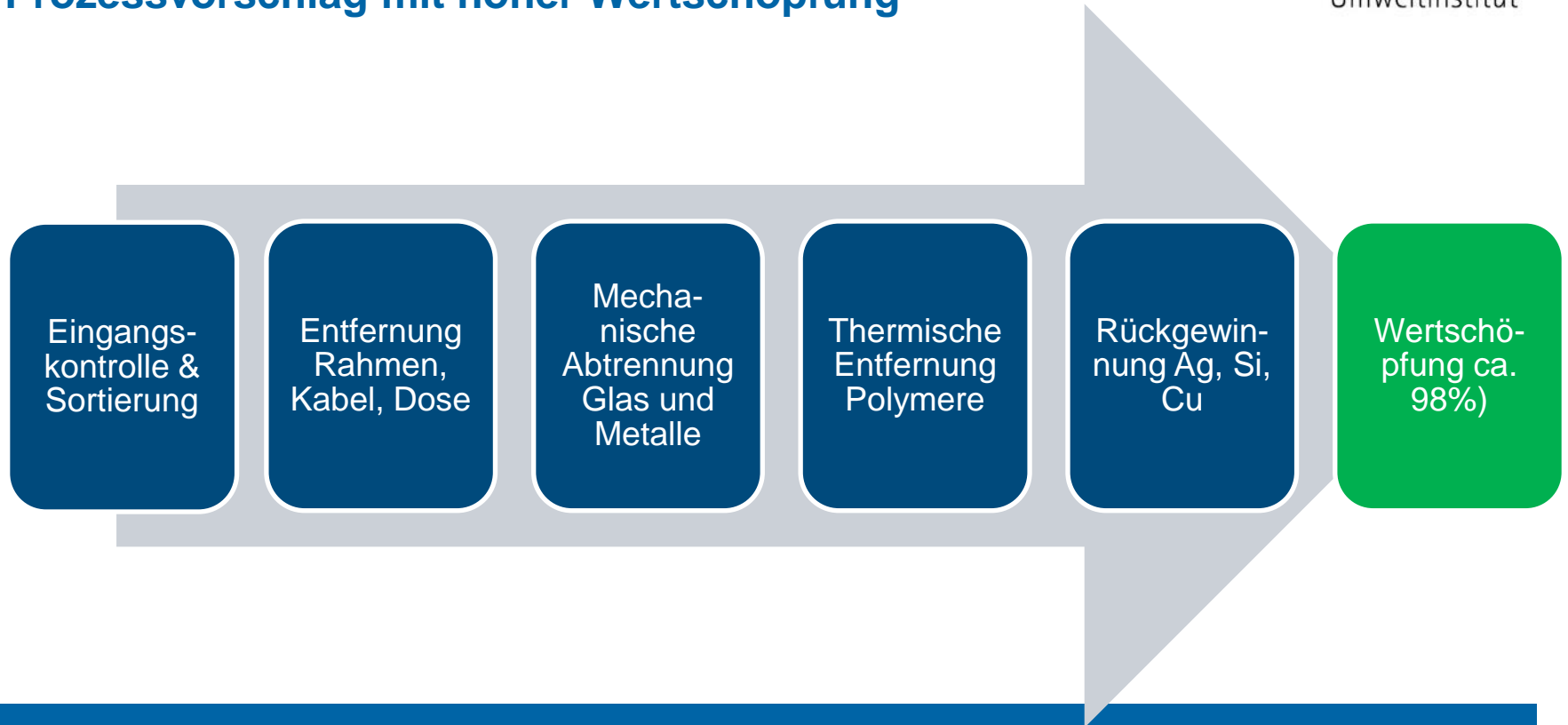
Robuste Recyclingtechnologien

Kostenoptimierung durch großtechnisches Recycling

Beispiel: Recycling auf Linie für laminiertes Glass



Prozessvorschlag mit hoher Wertschöpfung

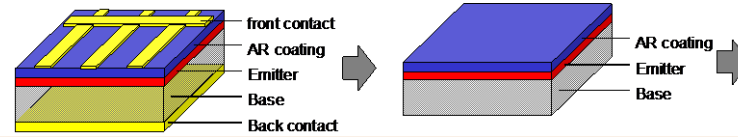


Pyrolyse Ergebnisse & Si Rückgewinnung

Separation nach therm. Behandlung



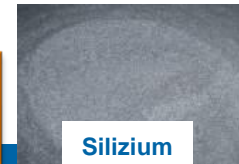
Credits: SolarWorld



Selektives Ätzen der Schichten



Perovskit-Module
noch in Entwicklung



Zusammenfassung

- **Hoher Sekundärwert** in Modulen gespeichert, aber abnehmend
- **Mechanische Recyclingprozesse dominieren, kostenoptimiert,** teilweise hohe Materialverluste, z.B. Si und Ag)
- **Neue, verbesserte Verfahren erfordern ausreichenden und stabilen Inputstrom und Investitions-Entscheidungen**
- **Globale Harmonisierung und Standardisierung erforderlich:**
 - Material, Produkteigenschaften, Dokumentation, Verpackung, Sammlung und Behandlung

Danke!

- bifa Umweltinstitut GmbH
Am Mittleren Moos 46
86167 Augsburg

- Tel. +49 821 7000-198
Fax. +49 821 7000-100
kwambach@bifa.de
www.bifa.de

Fotos: Wambach Consulting