



© Ansgar van Treeck

# Recycling der Energiewende

Chancen, Herausforderungen und  
Gute-Praxis-Beispiele des  
Recyclingmarkts für Technologien  
der Energiewende

**Dr.-Ing. Ulrike Lange**

VDI TZ / Zentrum Ressourceneffizienz

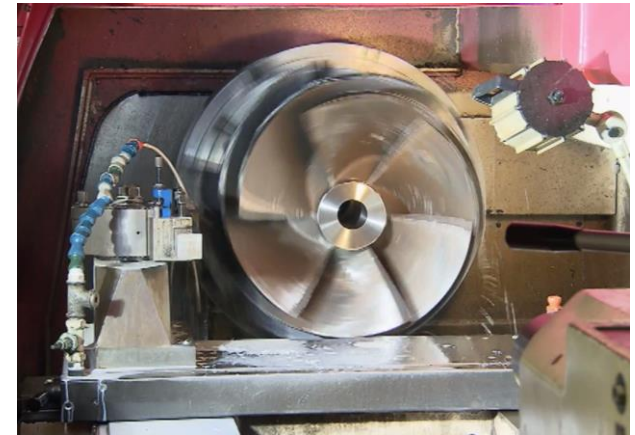
**5. Nationales Ressourcenforum Austria**

Salzburg, 02.05.2023



## VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE)

- Fokus auf Ressourceneffizienz in der **betrieblichen Praxis** durch Anbindung an den VDI
- Kompetenzzentrum für **bedarfsgerechte Aufbereitung** von **technischem RE-Wissen** für **KMU**
- Setzung von Standards durch Entwicklung von **VDI-Richtlinien** zur Ressourceneffizienz in Zusammenarbeit mit dem VDI e. V.



[Fotos: VDI ZRE Web Videomagazin]

## VDI ZRE – Produkte und Schwerpunkte

### RESSOURCEN-CHECKS

Ergebnis 3 von 6

Steigern Sie kontinuierlich die Materialeffizienz der Vorbehandlungsprozesse in Ihrem Unternehmen?

Ihre Antwort: Wir haben Potenziale erkannt und versuchen den Einsatz von Reinigungsmitteln und Prozesschemikalien zu reduzieren.

Checkliste

Beispiele

Ergebnis 4 von 6

Haben Sie bereits Prozessoptimierungen zur Steigerung der Materialeffizienz vorgenommen?

Ihre Antwort: Ja, wir arbeiten kontinuierlich an Materialeinsparungen durch Optimierung unserer Prozesse.

### SYSTEMATISIERUNG MIT PROZESSKETTEN



### KOSTENRECHNER

Dazu steht ein ZIP-Download zur Verfügung. Alternativ kann der Kostenrechner auch auf CD bestellt werden.

Aufbau des Rechners

Das Tool besteht aus drei Modulen, die je nach Bedarf einzeln oder aufeinander aufbauend angewandt werden können.

Kostenstrukturechner



Dieses Modul erlaubt dem Nutzer, die Kostenstruktur in seinem Betrieb darzustellen. Dem Anwender soll dabei aufgezeigt werden, welche Bereiche in seinem Betrieb die Kostentreiber sind und welchen Anteil Material- und Energiekosten im Unternehmen haben. Zusätzlich kann die betriebliche Kostenstruktur mit den jeweiligen Branchendurchschnitten (Statistisches Bundesamt) verglichen werden. **Kostenstrukturechner**

### STUDIEN & KURZANALYSEN

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 18

Ressourceneffizienz durch Remanufacturing - Industrielle Aufarbeitung von Altteilen



### INNOVATIONSRADAR

Innovationsradar

Neue Technologien und Prozesse

Intensive Forschung und preiswertige Lösungen sind die Schlüssel für ein ressourceneffizientes Handeln. Der Innovationsradar enthält Informationen zu neuesten Technologieentwicklungen und optimierten Prozessen, die das Potenzial haben, den Material- und Energieverbrauch zu senken.

Filtern nach: Alle Technologiebereiche, Alle Lebenszyklusphasen

Rückgewinnung von abgelagerten Feinsanden mittels neuer, innovativer Verfahren

Neuheit im Bereich: Wasserreinigung

Mit Nutzen des Umweltinnovations-Programms wird die Dörtenquarz GmbH & Co. KG eine Fernstud-Rückgewinnungsteilung in Verbindung mit innovativen Sandaufbereitungstechniken...

### FILME

Zentrum Ressourceneffizienz

RESSOURCENEFFIZIENZ

Themen: Umweltprobleme, Über die, Energie

Effizientere Energieerzeugung – Abwärtstrends in Kraftwerksanlagen

Wasserrückgewinnung in der Industrie

Aktuelle Themen:

- Abwasser
- Kunststoffaufarbeitung
- Reisessen
- Wasserspeicher

### QUALIFIZIERUNG & VERANSTALTUNGEN

Zentrum Ressourceneffizienz

Qualifizierung Ressourceneffizienz 2014

Die zunehmende Verknappung natürlicher Ressourcen und die steigenden Anforderungen an einen ressourceneffizienten Umgang mit Ressourcen sind zentrale Herausforderungen für Unternehmen und die Politik.

Das Projekt zielt darauf ab, die Ressourceneffizienz von Unternehmen zu verbessern und die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Dies wird durch die Entwicklung von Schulungsmodulen und die Durchführung von Workshops erreicht.

Das Projekt hat mehr als 3.000 angehende Beratungen in der Branche und anderen Interessierten durchgeführt. Die Teilnehmer sind in 100 Teams unterteilt, die in 100 Teams unterteilt sind.

Das Projekt hat mehr als 3.000 angehende Beratungen in der Branche und anderen Interessierten durchgeführt. Die Teilnehmer sind in 100 Teams unterteilt, die in 100 Teams unterteilt sind.

### VDI-HANDBUCH RESSOURCENEFFIZIENZ

Methodische Grundlagen der Bewertung von Ressourceneffizienz

RE in KMU

Produktionsintegrierter Umweltschutz

Richtlinien-Screening im Rahmen der turnusmäßigen Überprüfung

bestehend

In Bearbeitung

In Planung

Marz 2011 Konstantierung

in Kooperation mit dem VDI e.V.

# Innovative Recyclingtechnologien

## STUDIEN & KURZANALYSEN

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 18

Ressourceneffizienz durch Remanufacturing -  
Industrielle Aufarbeitung von Altteilen



# Innovative Recyclingtechnologien



## STUDIEN & KURZANALYSEN

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 18

Ressourceneffizienz durch Remanufacturing -  
Industrielle Aufarbeitung von Altteilen



Juni,  
Lissabon,  
40 °C...



## Kurzanalyse Innovative Recyclingtechnologien

### Ziel der Kurzanalyse:

Erfassung von aktuellen Innovationen und künftigen Technologieentwicklungen im Recycling folgender Fraktionen:

- Kunststoffe
- Batterien und Akkumulatoren
- Solarmodule
- Elektro- und Elektronikaltgeräte





## Kurzanalyse Innovative Recyclingtechnologien

### Inhalt der Kurzanalyse:

Einleitend werden je Fraktion

- gesetzlichen Herausforderungen,
- marktwirtschaftlichen Herausforderungen
- Herausforderungen in der Praxis dargestellt.

Aufbauend darauf werden je Fraktion

- Aktuelle Innovationen und Technologieentwicklungen vorgestellt.





# Kurzanalyse Innovative Recyclingtechnologien

## Inhalt der Kurzanalyse:

Fachgespräch dient der Zementierung der Ergebnisse der Kurzanalyse

- Fachgespräch 24. Februar 2022:  
„**Innovative Recyclingtechnologien von Industriebatterien**“
- **16 Teilnehmern** aus Forschung, Industrie, Politik und fachlichen Netzwerken.
- Die Teilnehmer des Fachgesprächs diskutierten über Herausforderungen bezüglich der **notwendigen Hochskalierung der Recyclingkapazitäten** vorrangig von Lithium-Ionen-Batterien







# Entwicklungen im PV-Modul Recycling



## Aktuelle Recyclingsituation

### In Verkehr gebrachte Mengen

Jahr	In Verkehr gebrachte Menge an PV-Modulen
2019	272.422 Tonnen
2018	211.142 Tonnen
2017	155.539 Tonnen

- Im Jahr 2020 waren knapp zwei Millionen Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von 54 Gigawatt verbaut. Das entspricht einer Stromerzeugung von ca. 51,4 Terawattstunden.
- Bis zum Jahr 2040 wird geschätzt, dass sich die verbaute Leistung mehr als verdreifachen wird.

Vgl. EU-Recycling Magazin (2022a). Und Vgl. Wirth, H. (2022), S. 6.

## Aktuelle Recyclingsituation

### Gesammelte und verwertete Mengen

Jahr	Menge gesamt	davon gewerbl. Altgeräte	VzWV*	Stoffl. Verwert.	Energ. Verwert.	Beseiti- gung
2020	15.400 t	11.000 t	k. A.	11.900 t	1.100 t	k. A.
2019	13.400 t	10.800 t	k. A.	11.500 t	1.200 t	k. A.
2018	7.900 t	5.600 t	900 t	6.000 t	800 t	200 t
2017	3.600 t	2.600 t	300 t	3.100 t	200 t	k. A.
2016	2.000 t	k. A.	400 t	1.300 t	200 t	100 t

\*Vorbereitung zur Wiederverwendung; k. A.: keine Angabe

- Die mehrheitlichen PV-Abfälle, die 2018 in die Entsorgung gelangten, wiesen dabei Schäden auf, die entweder bei der Produktion, beim Transport, bei der Installation, bei nichtfachgerechter Demontage oder durch Wettereinfluss (wie z. B. Hagel) entstanden sind oder die – basierend auf Garantie- und Gewährleistungsfällen –ausgesondert wurden.

Vgl. Hofmann, A. (2018), S. 68.

Quellen: UBA und Statistisches Bundesamt:

© VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH



# Aktuelle Recyclingsituation

## Prognostizierte Rücklaufmengen

Jahr	Prognostizierte Mengen
2025	14.000 - 22.000 Tonnen
2030	152.000 - 223.000 Tonnen
2035	1,8 - 2,9 Millionen Tonnen
2050	4,9 - 9,6 Millionen Tonnen

- Das adäquate **Recycling von PV-Modulen** trägt wesentlich zur **Reduktion von Treibhausgasemissionen**: Das Recycling von einer Tonne PV-Modulen auf Siliziumbasis rund 800 bis 1.200 kg CO<sub>2äq</sub>.
- Die Gutschriften werden hierbei hauptsächlich durch das Recycling der Glas- sowie der Aluminiumfraktion erreicht.

Vgl. Fraunhofer IBP (2012), S. 2.



# Aktuelle Recyclingsituation

## Recycling der Glasfraktion

- Das **hochwertige Glas der PV-Module** wird nach der Verwertung für die Herstellung von Isolier-/Akustikdämmung, Glaswolle oder Schaumglas verwendet  
→ **Downcycling**.
- Ein Einsatz in der Flach- und Behälterglasindustrie ist technisch jedoch grundsätzlich möglich!
- Eine wirtschaftliche Umsetzung aufgrund der aktuell geringen Mengen zur Verwertung **noch** nicht realisierbar

Vgl. Wolf, J.; Brüning, R.; Nellesen, L. und Schiemann, J. (2017), S. 166ff, vgl. Kummer, S. et al. (2020), S. 129 und 133ff



# Aktuelle Recyclingsituation

## Recycling der Aluminiumfraktion

- Der Aluminiumrahmen der PV-Module wird standardmäßig entweder vor der Zerkleinerung demontiert oder nach dem Schredder-Prozess zurückgewonnen. Die Weitergabe in ein hochwertiges werkstoffliches **Aluminiumrecycling** ist etabliert und generiert die **höchsten Erlöse** aus dem PV-Recycling.

Vgl. Kummer, S. et al. (2020), S. 129 und 133ff



# Aktuelle Recyclingsituation

## Recycling kritischer Rohstoffe

- Weitere Bestandteile von PV-Modulen sind **kritische Rohstoffe** wie Silizium, Indium, Gallium und Silber. Eine **Rückgewinnung** dieser Stoffe findet aktuell nicht statt. Es wurden bereits technische Verfahren zur Rückgewinnung entwickelt, die sich jedoch aufgrund der geringen Mengen an PV-Modulen zur Verwertung als **(noch) nicht wirtschaftlich** gestalten.

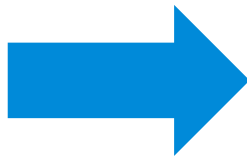
Vgl. Kummer, S. et al. (2020), S. 129 und 133ff



## Stand der Recyclingtechnologien

- Es existiert eine **hohe Vielfalt an Behandlungstechnologien**
- Die Verfahren reichen von der Auflösung in organischen Lösungsmitteln, der Ultraschall-Bestrahlung über die Pyrolyse durch Förderband-Öfen und Wirbelschicht-Reaktoren bis hin zur nassen und trocken-mechanischen Behandlung oder zum chemischen Ätzen.

Vgl. EU-Recycling Magazin (2022a).



Vortrag von Herrn Wolfram **Palitzsch**,  
LuxChemtech GmbH





# Entwicklungen im Batterierecycling





## Aktuelle Recyclingsituation

	Sammel- Menge*	Recycling- effizienz	Sammel- menge*	Recycling- effizienz	Sammel- menge*	Recycling- effizienz
	2020		2019		2018	
Blei-Säure- Batterien	150.943 t <sup>1</sup>	81,6 % (65 %)**	205.254 t	81,9 % (65 %)	200.410 t	80,6 % (65 %)
Nickel- Cadmium- Batterien	1.048 t	79,5 % (75 %)	1.353 t	77,6 % (75 %)	1.221 t	79,1 % (75 %)
Sonstige Batterien	29.620 t	76,2 % (50 %)	22.315 t	75,5 % (50 %)	17.424 t	83,8 % (50 %)
Gesamt	181.611 t		228.922 t		219.055 t	

\*gesammelte Menge, die einem Recycling zugeführt wurde, \*\* In Klammern: regulatorisch geforderte Mindestrecyclingeffizienz

→ Insbesondere für Lithium-Ionen-Batterien sind **neue Recyclingkapazitäten** zu schaffen. Prognosen schätzen, dass sich das **Marktvolumen von Lithium-Ionen-Batterien in Europa im Mittel bis 2030 verzehnfachen wird**

Quellen: UBA und ZVEI:

© VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH



## Situation des Batterierecyclings

- Die Wertschöpfungskette für Industriebatterien ist geprägt durch ein **dynamisches Wachstum**
- Die regulatorischen Randbedingungen **reagieren angemessen früh** auf den Markt.
- Die **genaue Auslegung** von insbesondere den Recyclingquoten ist **diversen Unsicherheiten** unterworfen, die jedoch über eine geplante Revision adressiert werden sollen.



## Situation des Batterierecyclings

- Dynamische Entwicklung von innovativen Technologien, **intensive F&E.**
- Recyclinggerechtes Design notwendig
- **Demontage- bzw. Recyclingprozesse möglichst flexibel gestalten**, um adäquat auf die Variantenvielfalt der Industriebatterien reagieren zu können.



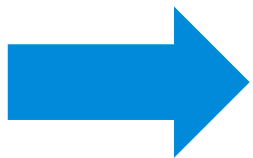
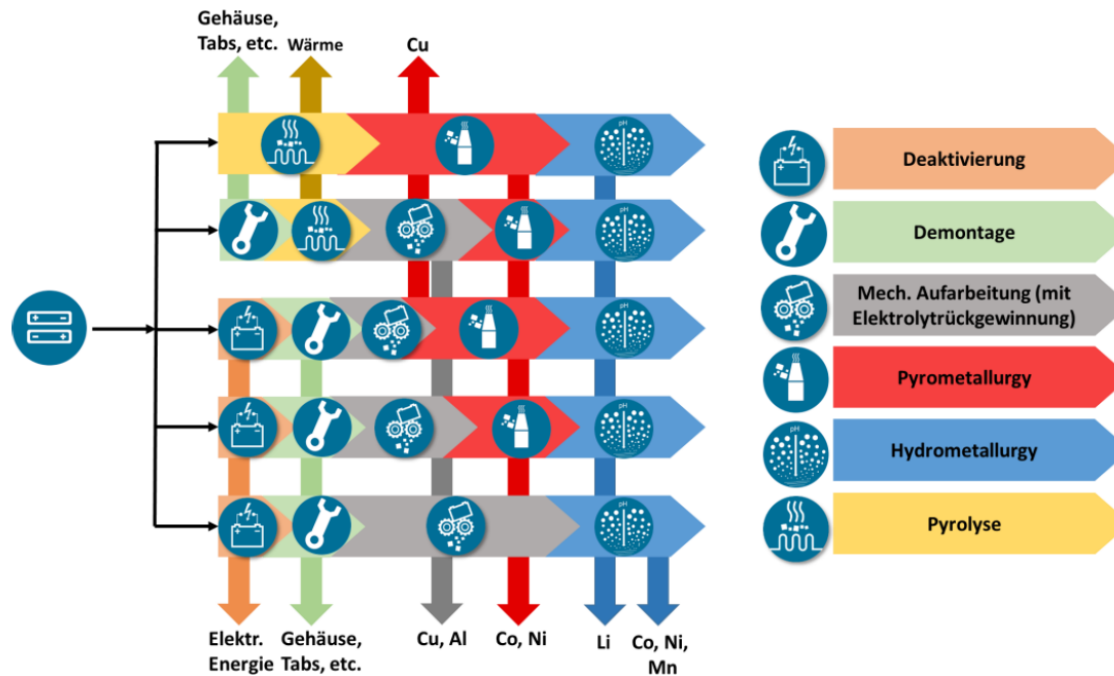
## Ergebnisse des Fachgesprächs

### Neue Batterierichtlinie erwartet im Sommer 2023:

→ Einhaltung der **ab 2030 regulatorisch geforderten Recyclingquoten** unklar:

- **maximaler Rezyklateinsatz von 5 Prozent stammend aus Altbatterien erwartbar,**
- Produktionsnahe Recyclingprozesse (Ausschüsse von bis zu 50 % bei Anfahren der Prozesse) zählen **nicht zu den End-of-Life Batterien**
- Die **Lebensdauer** von Industriebatterien liegt bei durchschnittlich 15 Jahren, durch Second-Life-Anwendung verlängerbar
- **Illegale Verbringung von E-Autos** - Anreize schaffen, Industriebatterien und die darin enthaltenen Ressourcen im europäischen Markt zu halten

# Stand der Technik – Batterierecycling



Vortrag von Frau Dr. mont. Astrid Arnberger,  
Saubermacher DienstleistungsAG



# Entwicklungen im Recycling von Windenergieanlagen





## Aktuelle Recyclingsituation

---

”

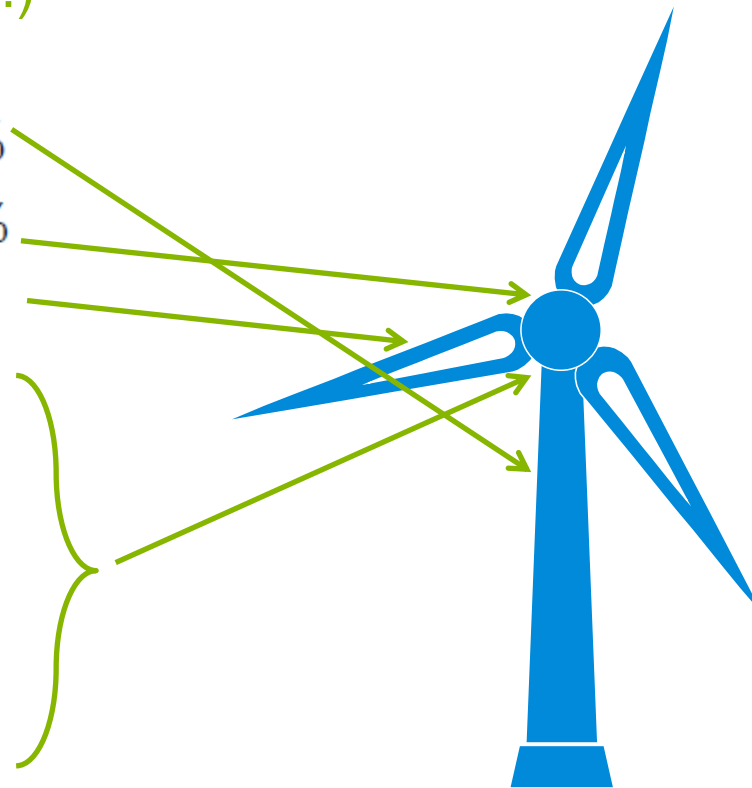
Zum Jahresende 2022 umfasste der bundesweite Bestand 28.440 Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von fast 58 Gigawatt. Etwa 6.000 dieser Anlagen sind inzwischen älter als 20 Jahre, und knapp 7.000 haben das Alter von 15 Jahren bereits überschritten. (Fachagentur Windenergie an Land)



# Aufbau von Windenergieanlagen

## Anteil am Gesamtgewicht (!)

Beton	60-65%
Stahl	30-35%
Verbundmaterialien	2-3%
E-Komponenten	<1%
Kupfer	<1%
Aluminium	<1%
PVC	<1%
Betriebsflüssigkeiten	<1%



Bundesverband WindEnergie e.V.: [Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen](#)

© VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH



# Rückbau von Windenergieanlagen

## GFK-basierte Rotorblätter

Unternehmen

[Neocomp GmbH](#)

[Eurecum GmbH](#)



# Rückbau von Windenergieanlagen

## CFK-basierte Rotorblätter

Unternehmen

Ehemals CFK Valley und Carbo-NXT, jetzt  
Mitsubishi Chemical Advanced Materials



## Weitere Recyclinglösungen

CETEC (Circular Economy for Thermosets Epoxy Composites, Dänemark)

Zweistufiger Prozess in Entwicklung:

- 1) Trennung des Duroplast-Epoxydharz-Verbundstoff in Fasern und Harz.
- 2) Über neues Chemcycling-Verfahren soll das Harz in – Primärstoffen vergleichbare – Basiskomponenten aufgespalten werden.

Dieses Material kann zur Herstellung neuer Turbinenblätter eingesetzt werden.

<https://energiforskning.dk/projekter/cetec-circular-economy-thermoset-epoxy-composites>



## Weitere Recyclinglösungen

---

Unternehmen

[Siemens Gamesa Renewable Energy: RecycableBlade](#)

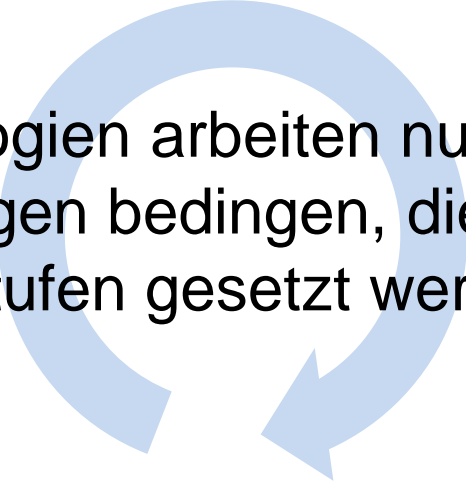


Recyclinggerechtes Produktdesign:  
Durch neuen, wieder lösbaren Harz  
können Rotorblätter demontiert werden.



## Den gesamten Kreislauf beachten

Recyclingtechnologien arbeiten nur so effizient, wie es die Voraussetzungen bedingen, die in den vorgelagerten Wertschöpfungsstufen gesetzt werden





## Bei Fragen und Anmerkungen

VDI TZ / Zentrum Ressourceneffizienz  
Bülowstraße 78  
10783 Berlin

Dr.-Ing. Ulrike Lange  
Tel.: +49 30 27 59 506-32  
lange\_u@vdi.de

[www.vdi-zre.de](http://www.vdi-zre.de)

[www.ressource-deutschland.de](http://www.ressource-deutschland.de)