

# Ressourcen und Rohstoffe im Kontext des Klimawandels

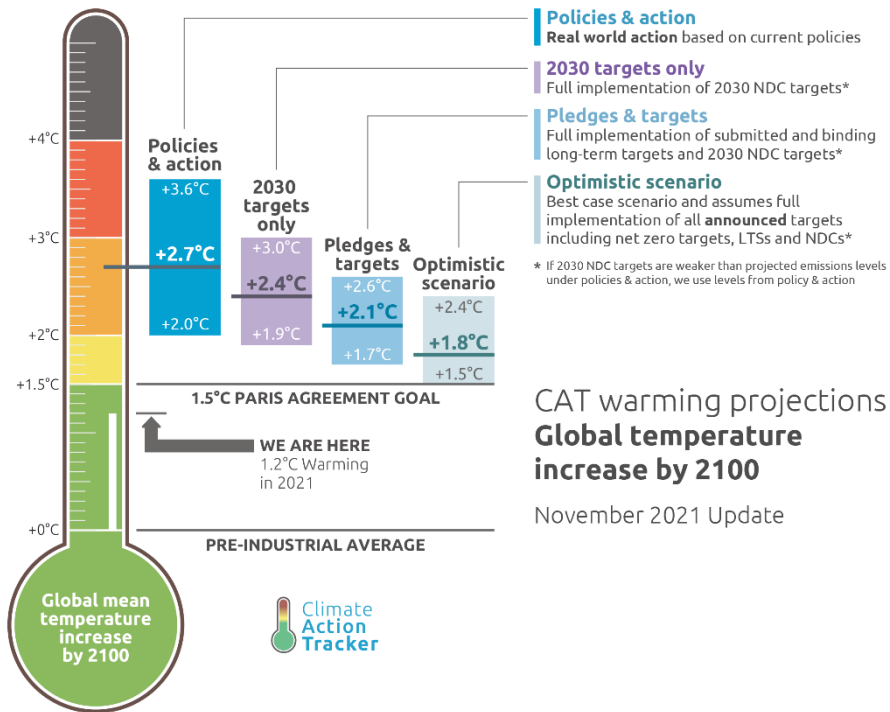
Anke Weidenkaff

Fraunhofer Research Institution for Materials Recycling and Resource Strategies IWKS,  
FG Materials and Resources, Department of Materials and Earth Sciences, TU Darmstadt,  
WBGU German Advisory Council on Global Change

A world  
without  
waste



# Climate Neutrality



CAT warming projections  
**Global temperature increase by 2100**  
 November 2021 Update

- WBGU: Make mandatory long-term strategies a major topic at **COP 26**
- **Immediate defossilisation** of the mobility and energy sector (IPCC AR6)
- Use of **renewable energy sources** for the **electrification** of the mobility sector
- **Green technology transition** requires green materials



**WBGU**  
 German Advisory Council on Global Change

Policy Paper

**Beyond Climate Neutrality**

**12**

# Die Energiewende ist eine Material- und Ressourcenwende

Faire & grüne  
Innovationen

Fortschrittliche  
globale  
Gesellschaft  
auf gesunder  
Erde

Kreislauf-  
fähige  
Materialien

Filmausschnitt "Welcome to Sodom"

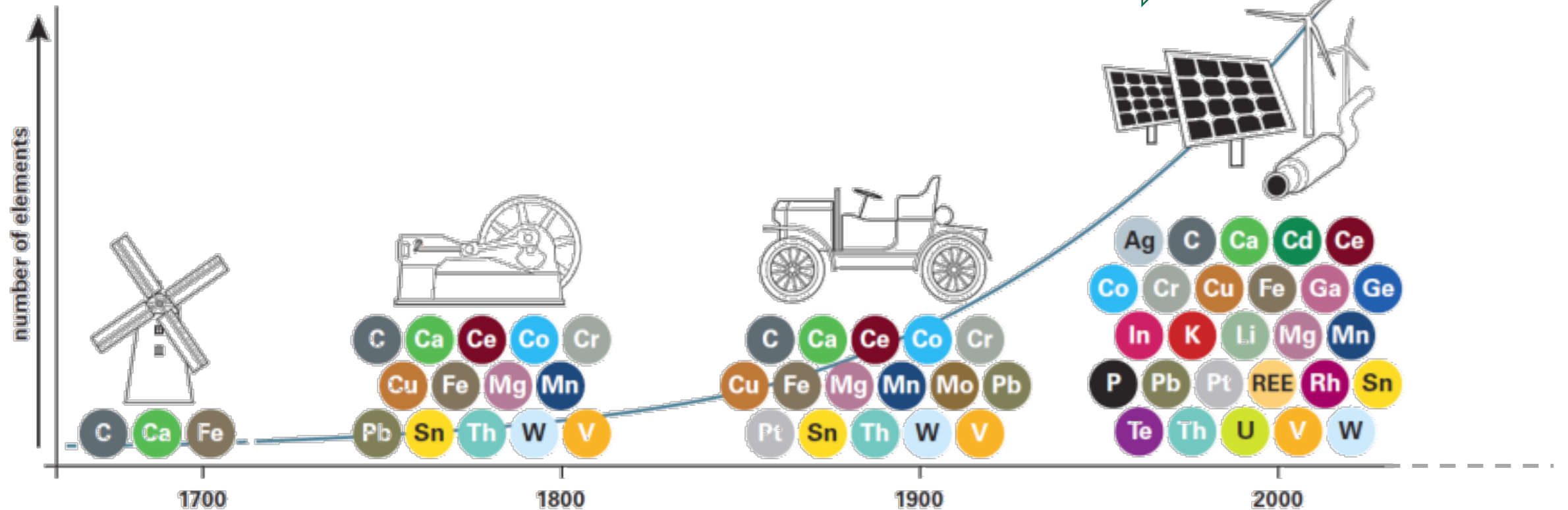
ORF 2



# Innovationen folgen Materialverfügbarkeiten: Bsp. technische Metalle

Steinzeit, Bronzezeit, Eisenzeitalter, Siliziumzeitalter, ...?

Energiewende/  
?



# Materialien zur Defossilisierung am Bsp. Alzenau



Stadt Alzenau (Bayern):

Einwohner: 20.000

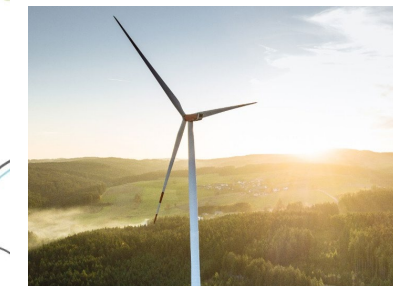
Zeitpunkt: 2050

CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 80%

Primärenergiebedarf: 250 GWh

Materialbedarf an

Li, Co, Nd, Al, Cu: 18 kt



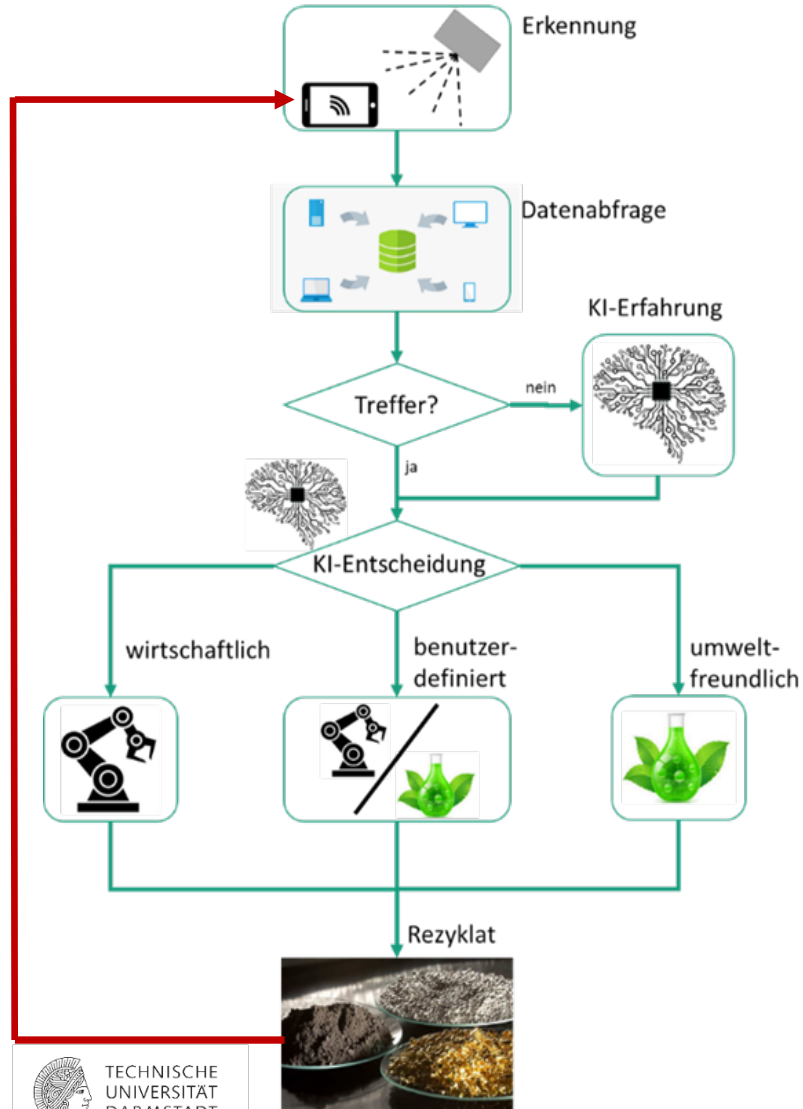
# Materialien für die Energiewende am Bsp. technischer Metalle



- Geringe Konzentration an Seltenerdoxiden in den Erzen
- Beim Abbau Freisetzung von radioaktive Elemente Thorium und Uran
- Einträge in Grundwasser und Staubemission
- Energieintensive Aufbereitung



# Von der linearen zur Kreislaufwirtschaft



**Abfallwirtschaft und Produktionswirtschaft sind zu linear**

—

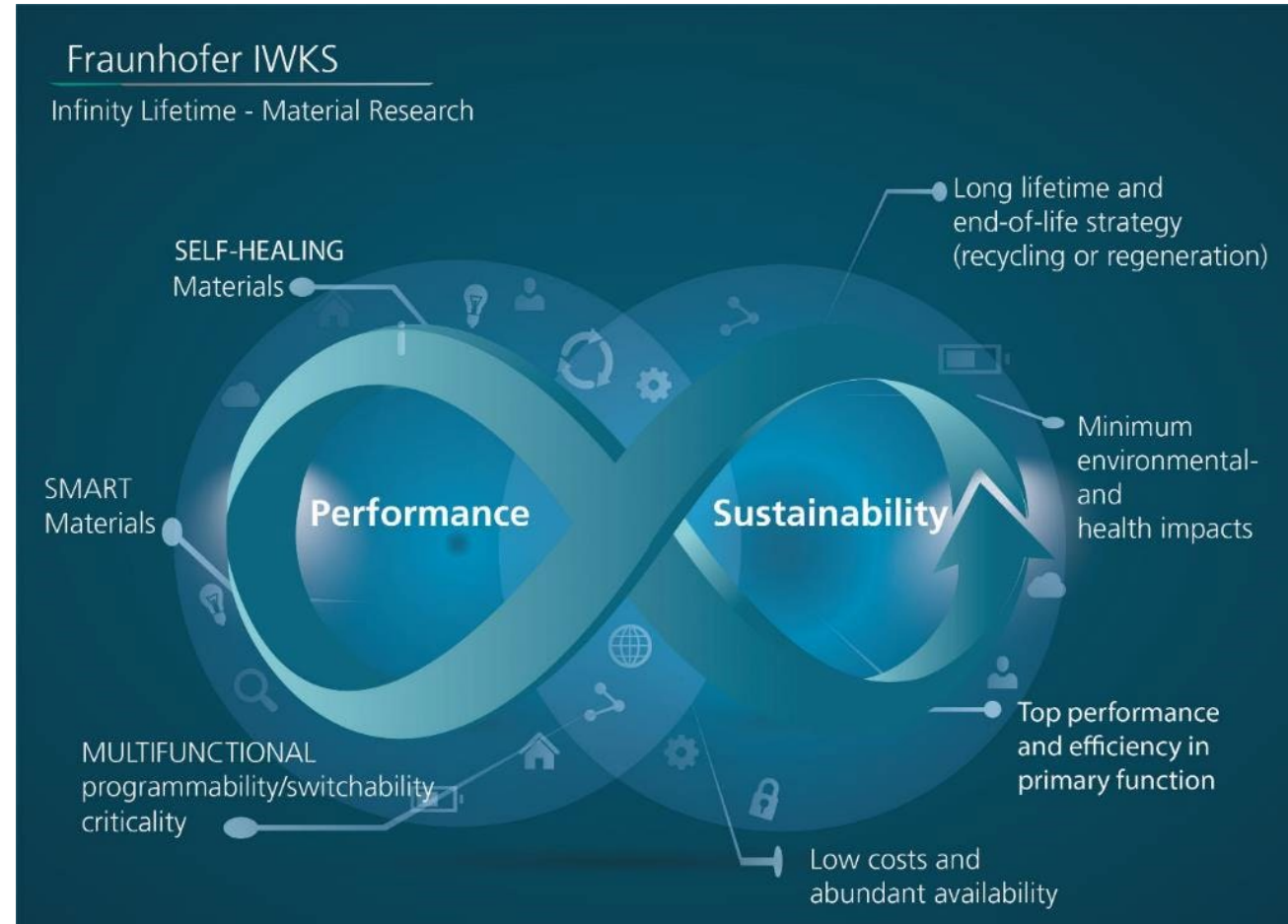
Eine Verbindung bringt die Herstellung von Materialien aus Abfällen

# Nachhaltige Materialien für die Kreislaufwirtschaft

Grüne Innovationen basieren auf **zirkulären** Materialien (Materialien, die aus Rezyklaten hergestellt werden) für ein nachhaltiges, faires und abfallfreies zirkuläres Wirtschaften.

IWKS Forschung für

- die energieeffiziente Rückgewinnung von Materialien (**Rezyklate**) und Qualifikation als nachhaltige Präkursoren für die **grüne Produktion**.
- die **Substitution** kritischer Rohstoffe durch nachhaltigere Alternativen,
- Die intelligente **Regeneration** zukunftsweisender Materialien im Hinblick auf die Langlebigkeit von Produkten.
- die Quantifizierung/Metrik als **Gütekennzahl** bzw. **Messgröße der Nachhaltigkeit**





# Schwerpunkte des Fraunhofer IWKS

Alzenau, Bayern – Hanau, Hessen



## Bioökonomie

Aus biogenen Rohstoffen nachhaltige sowie leistungsstarke Produkte und Prozesse entwickeln. Wasserrecycling.



## Digitalisierung der Ressourcen

Stoffstrommanagement zur Steigerung der Ressourceneffizienz, intelligente Trenn- und Sortiertechnologien, Ökobilanzierungen.



## Energiematerialien

Recyclingprozesse und Konzepte für Zirkuläre Batterien, Brennstoffzellen, und PV-Module



## Magnetwerkstoffe

Synthese und Recycling von Hochleistungspermanentmagneten im Technikumsmaßstab. Wasserstoff.

# Ganzheitliche Evaluation – Kriterien für Substitutionsmaterialien



## Ecology

- Environmental impacts
- Minimal waste
- Compliance, regulations
- Health & safety



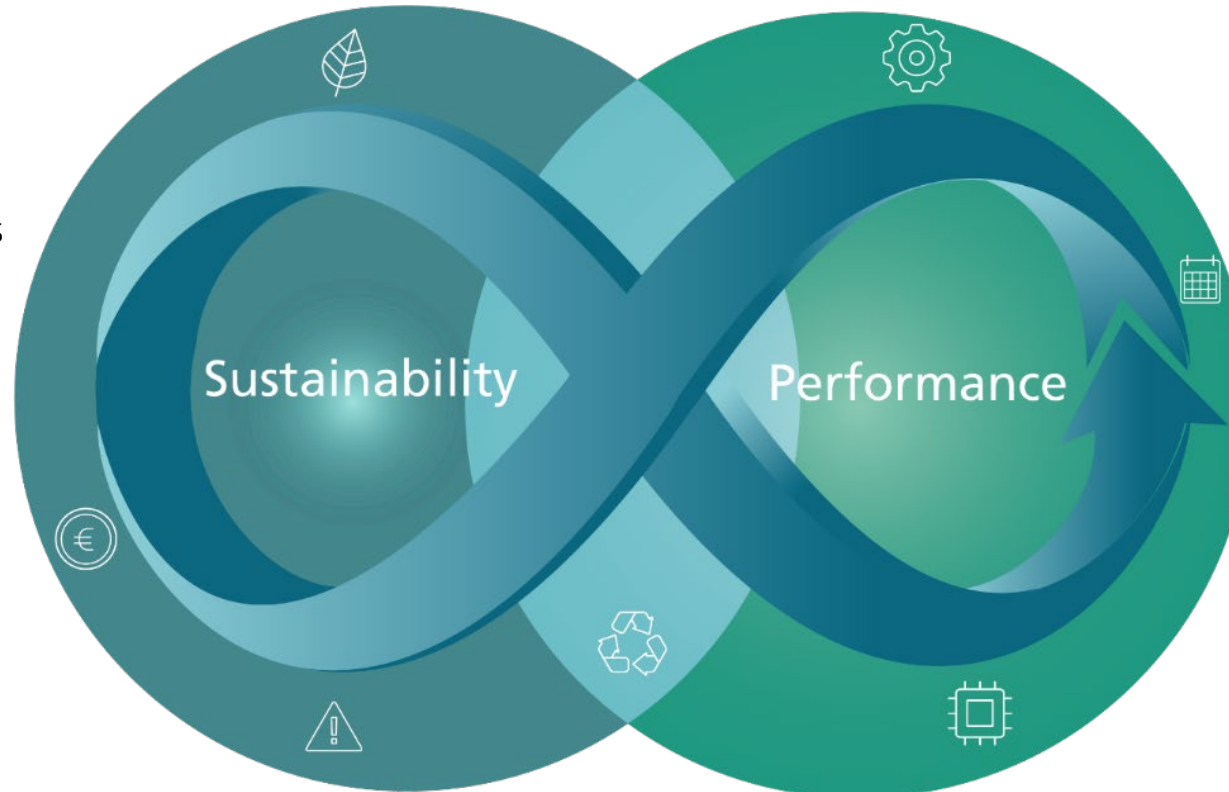
## Economics

- Reliability
- Scaleability
- CAPEX, OPEX
- Planning certainty



## Criticality

- Supply and geopolitical risk
- Competing applications
- Technical dependency



## Efficiency

- High current density
- Electronic structure
- Surface states and bonds
- Conductivity



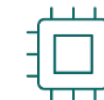
## Durability

- Suitable operation conditions
- Low overpotential
- Structural stability



## Multifunctionality

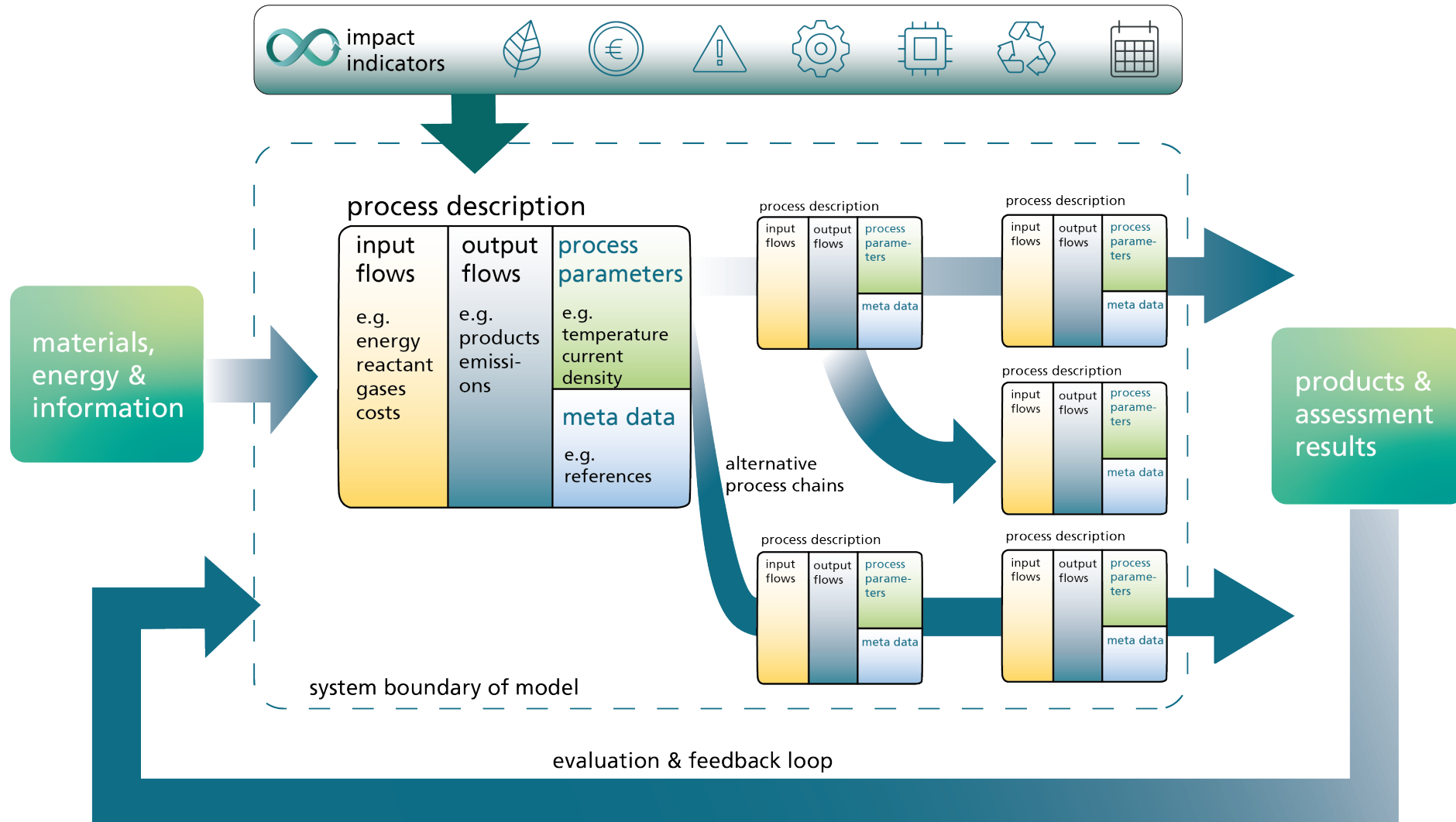
- Recyclability
- Dynamic regeneration
- Design-for-disassembly



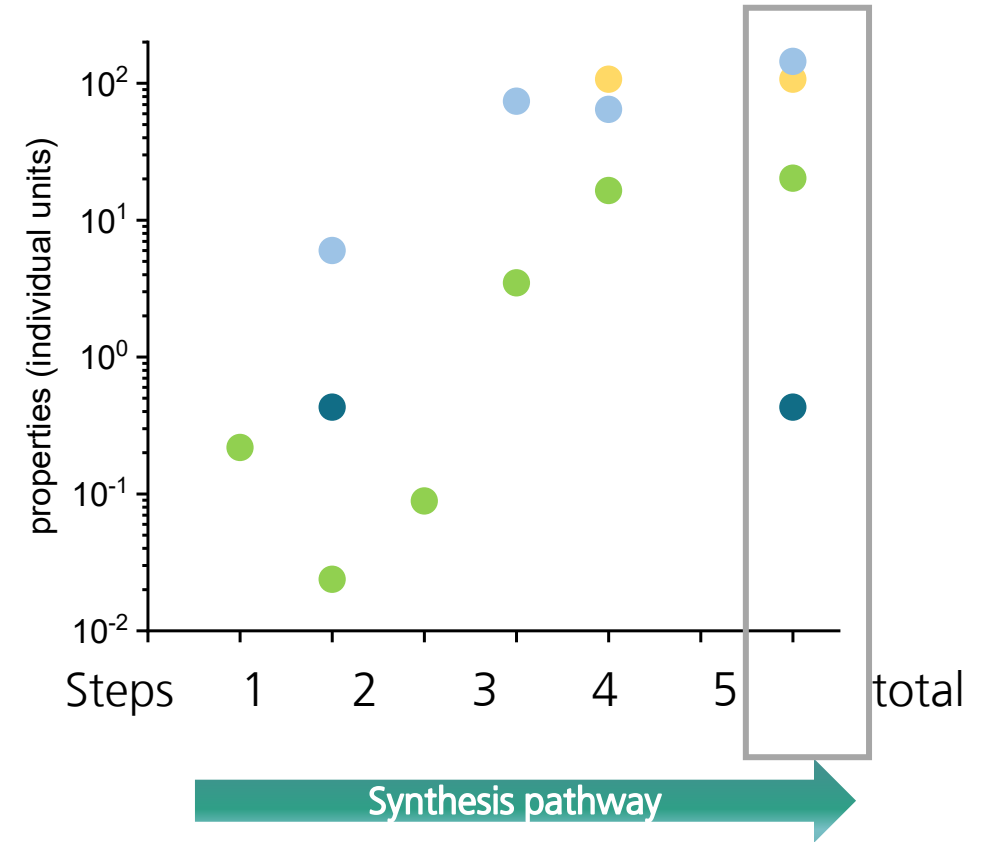
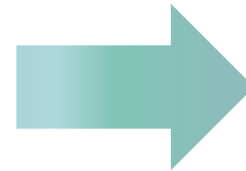
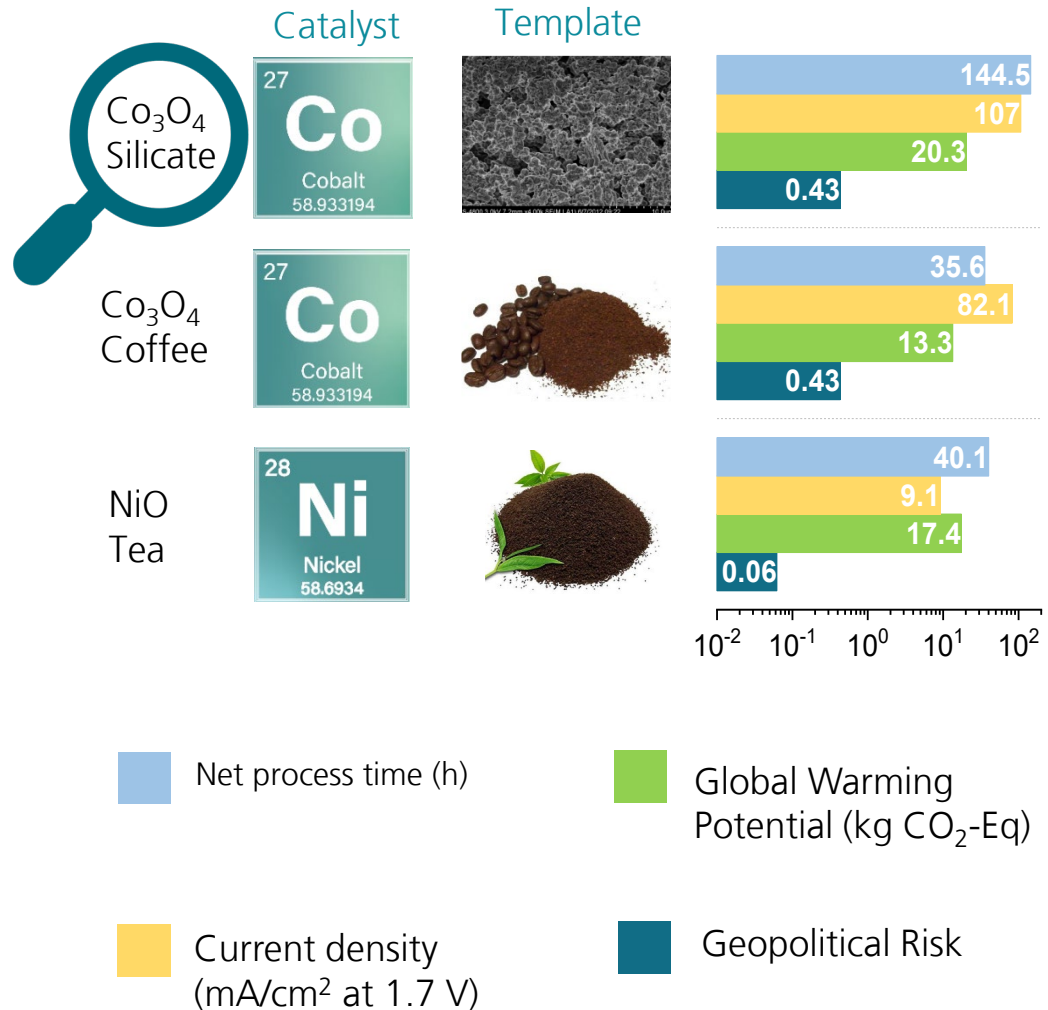
## Programmability

- External stimuli
- Switchability
- Operation strategies

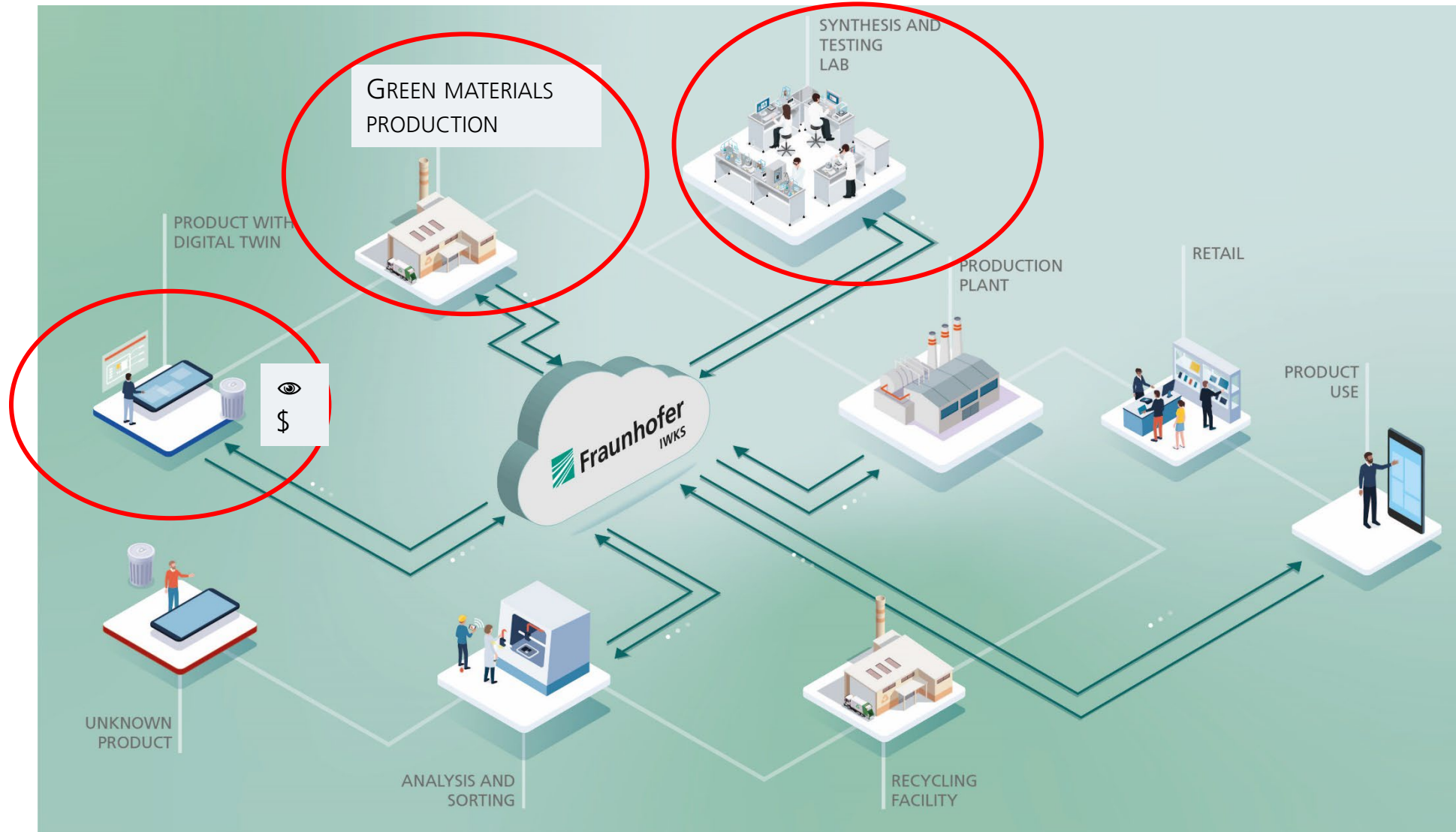
# Materialauswahl auf Basis von Lebenszyklusanalysen und -Modelle



# Holistic evaluation by digital modelling

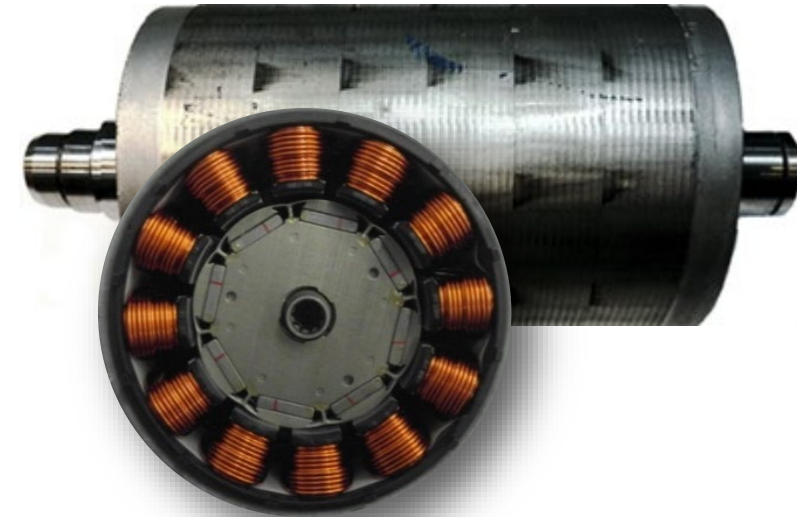


# DIGITALISIERUNG DER RESSOURCEN



# Recycling von Permanentmagneten: Herausforderung der Produktdiversität

Permanenterregter Elektromotor

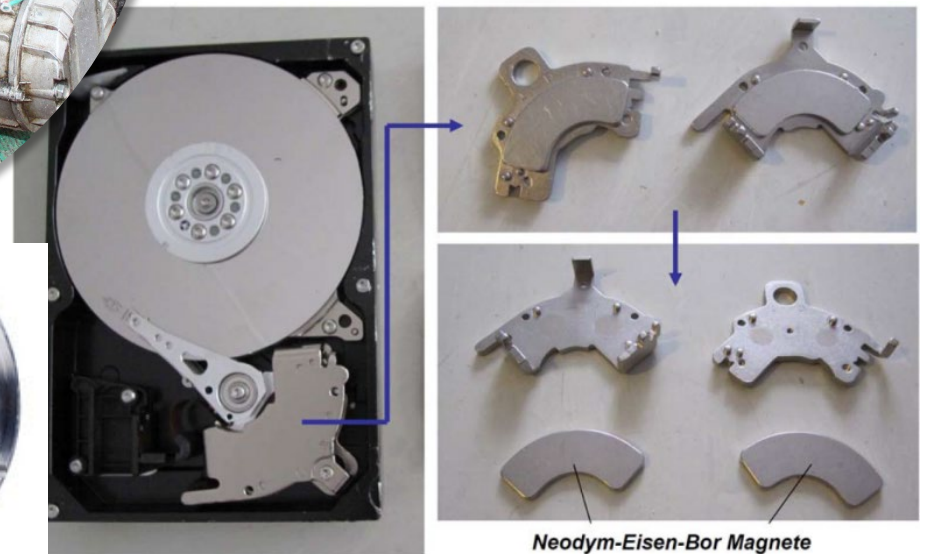


Festplattenmagnet (Buchert et al. 2012)

- < 1% Nd wird recycelt
- Seltene Erden gehen in der Schlacke verloren



Permanenterregter Synchronmotor (Wittenstein AG)

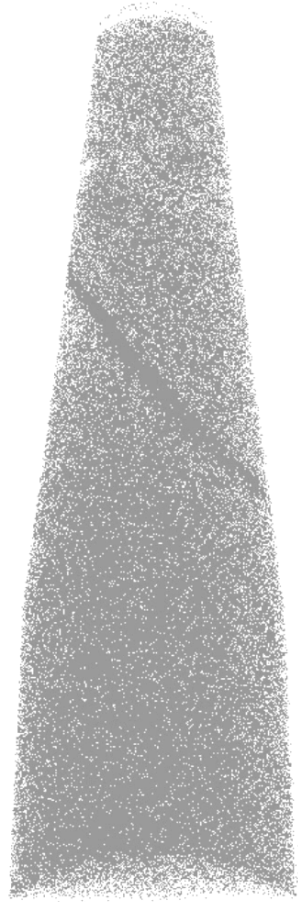


Neodym-Eisen-Bor Magnete

# What is making a permanent magnet?

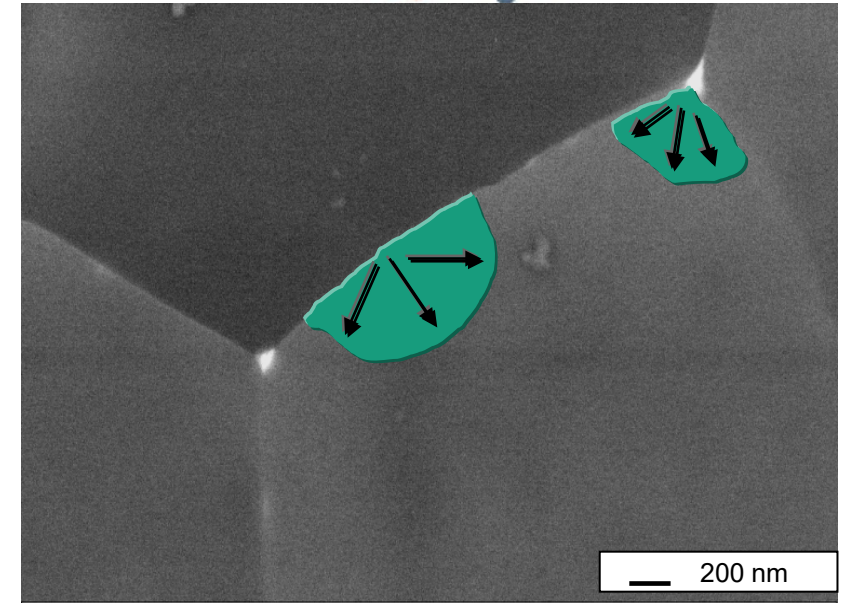
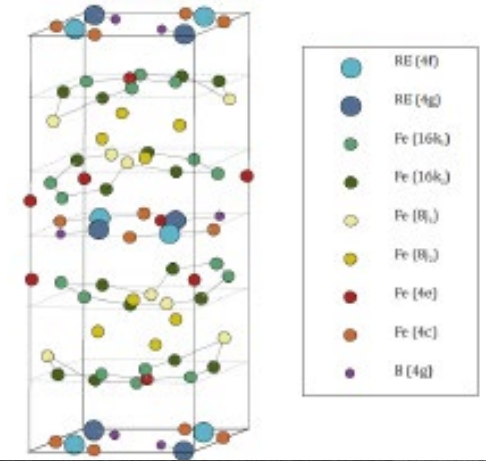
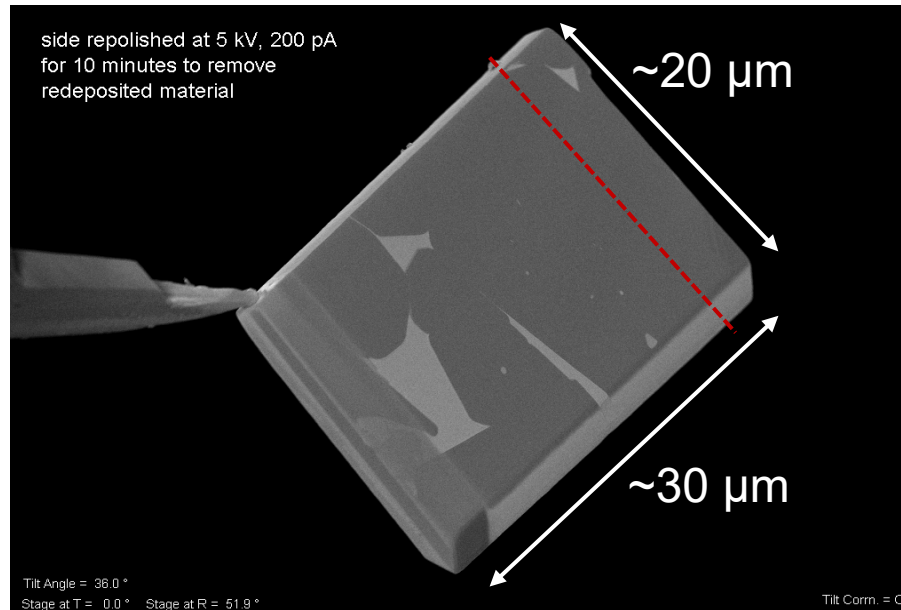
50 nm

Nd



3D APT

## Microstructure of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$



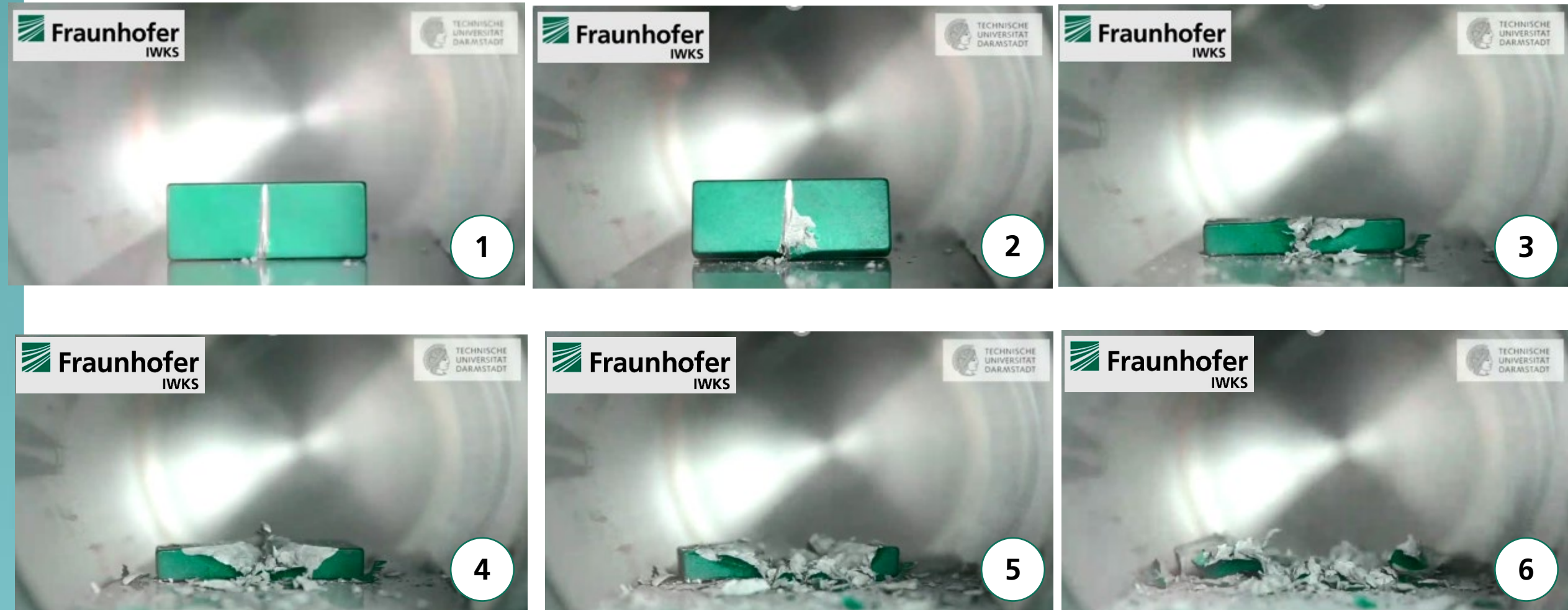
# Pilotlinie zur Herstellung und Recycling von Permanentmagneten

Charge: 10 kg – 50 kg





# Rare earth magnet recycling in hydrogen atmosphere



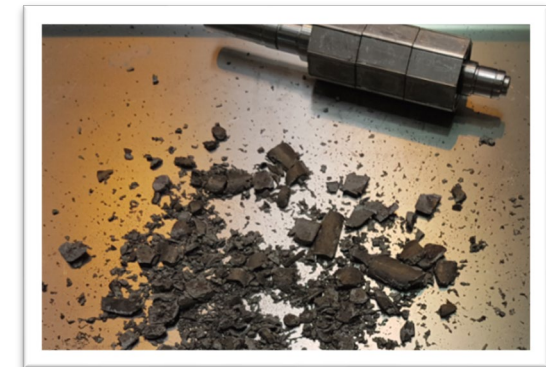
# Rare earth magnet recycling in hydrogen atmosphere

Scrap magnets

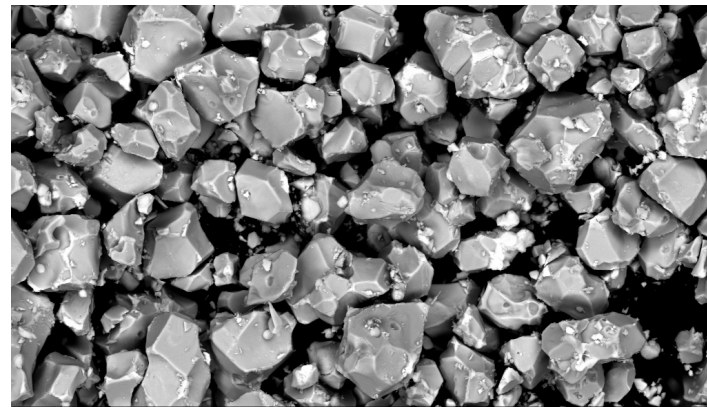
- magnetized
- coated
- glued in



H<sub>2</sub>-Decrepitation



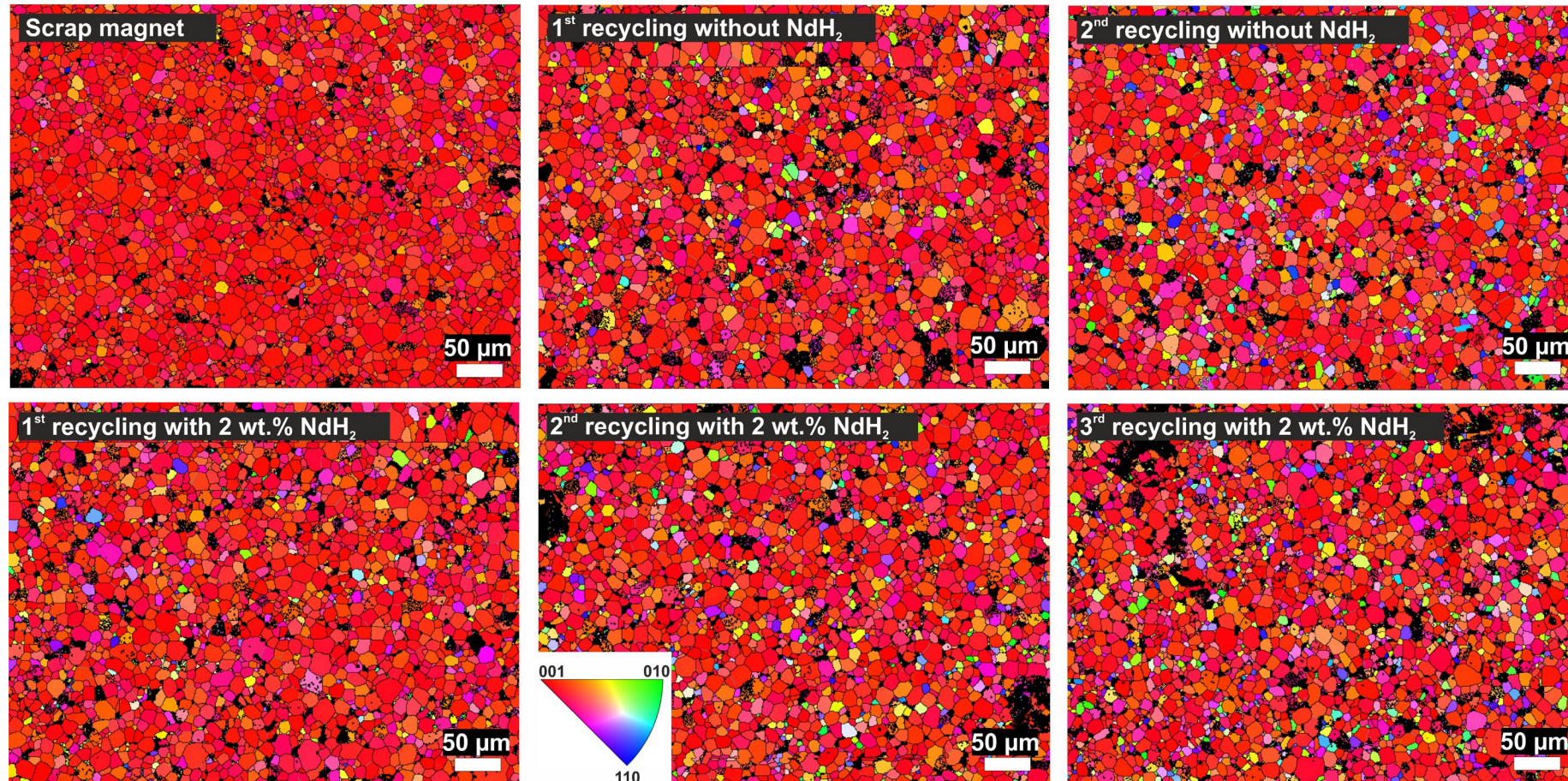
New sintered magnet



Pressing and Sintering

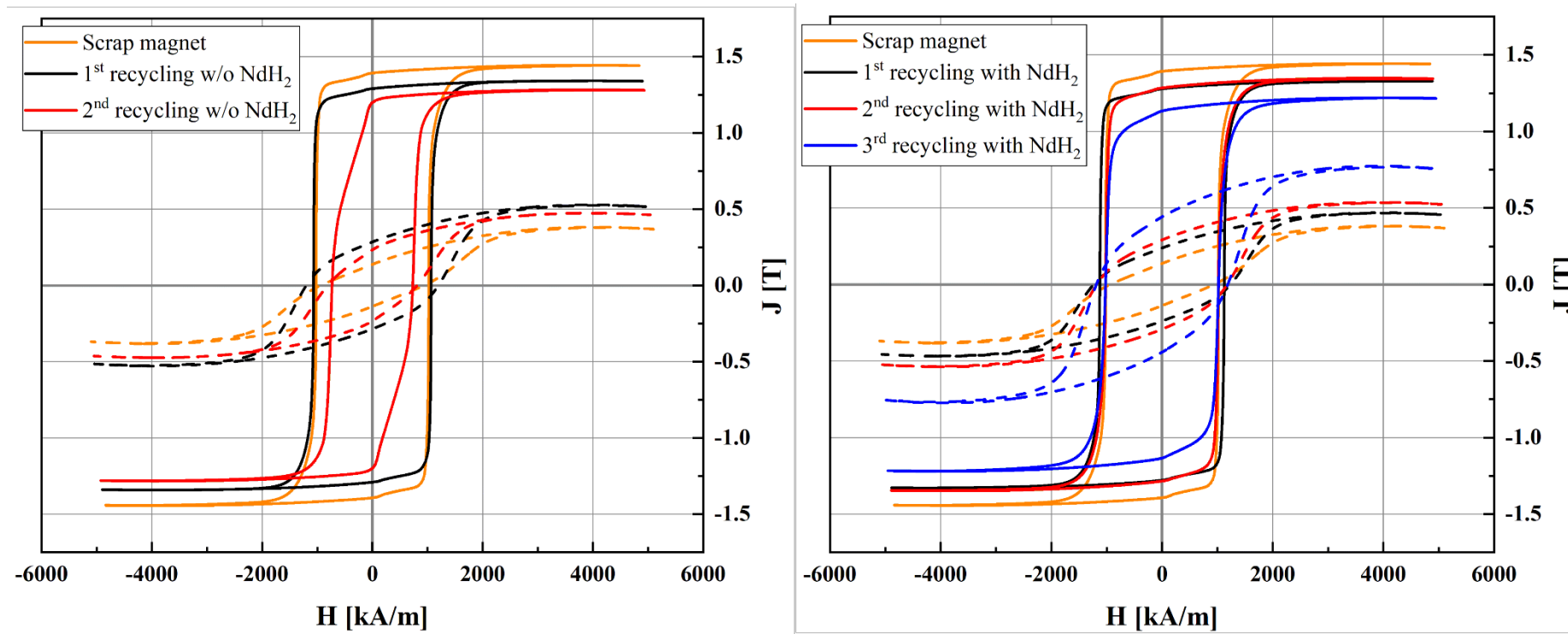
# Degree of alignment by EBSD

- Sample z inverse pole figure maps: color coded according to its orientation with respect to the sample z axis, i.e. alignment direction
- Decreasing amount of red colored grains  $\rightarrow$  less orientation or alignment

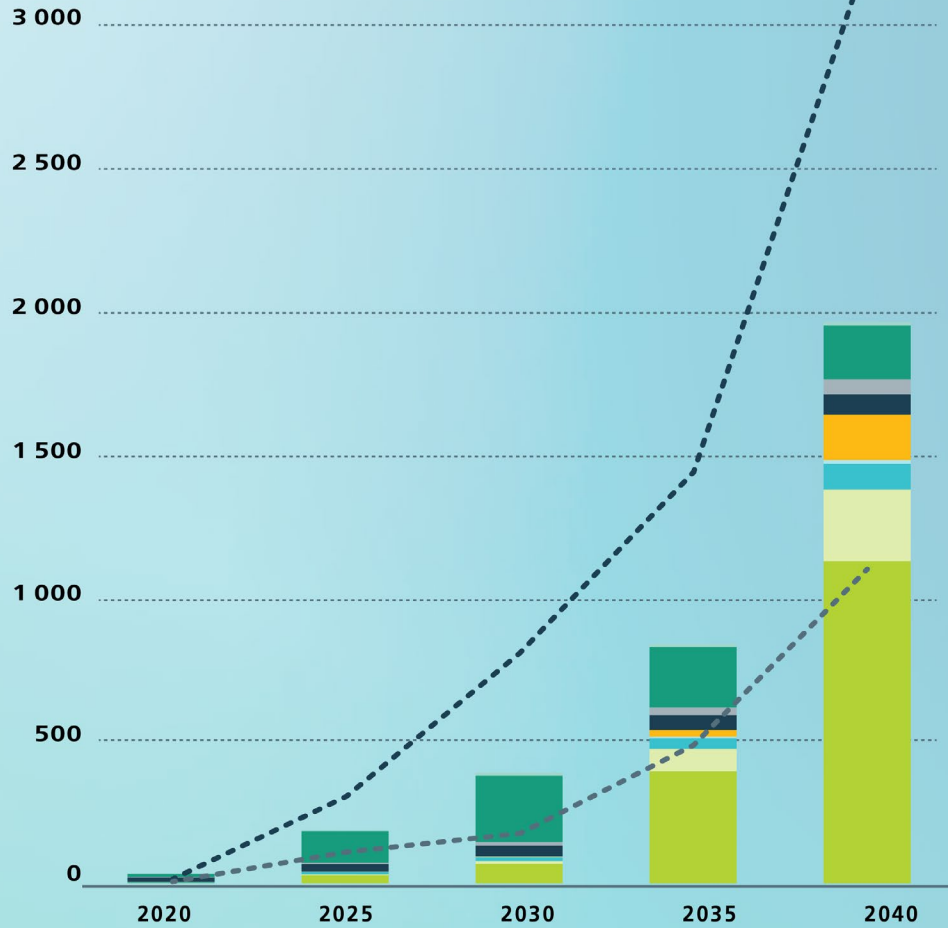


# Degree of alignment by hysteresis measurements

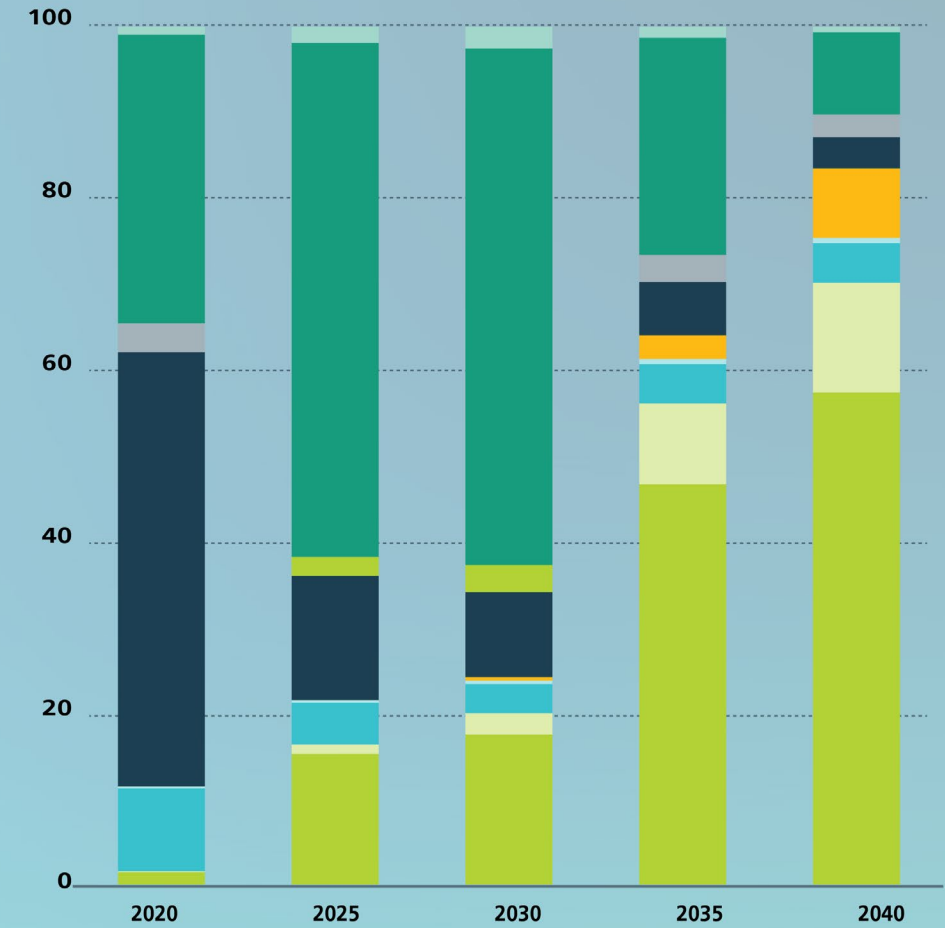
Remanence and saturation magnetization in magnetization direction decreases with recycling cycle while both values increase in the perpendicular hard axis



## EU Rücklaufmengen von LIB in Kilotonnen

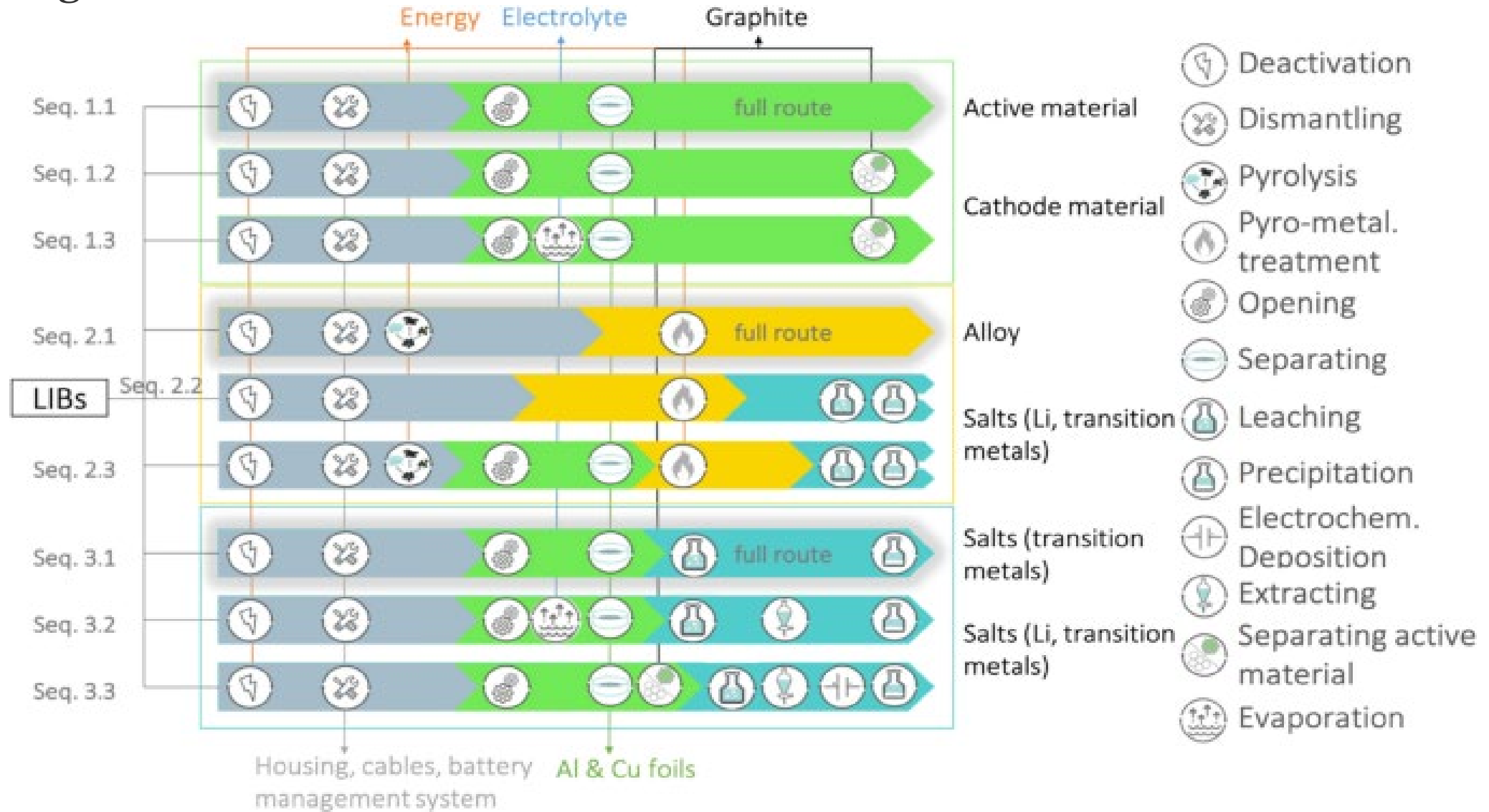


## Herkunft der EU Rücklaufmengen von LIB in Prozent

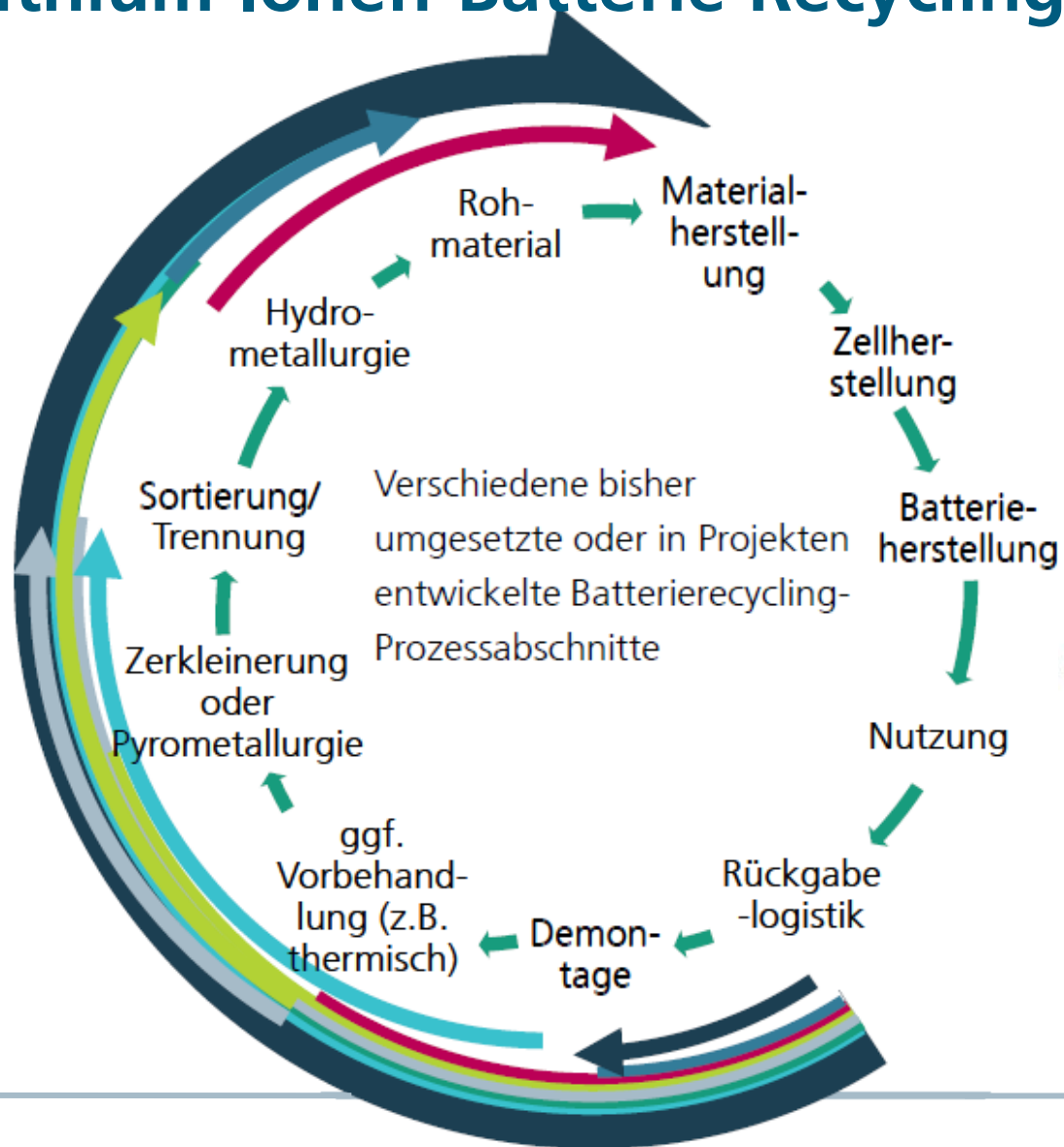


--- Minimum    --- Maximum  
 ■ PxEV Cell    ■ PxEV Pack    ■ CxEV Cell    ■ CxEV Pack    ■ ESS Cell  
 ■ ESS Pack    ■ 3C Cell    ■ Other Cell    ■ Cell Prod.    ■ Pack Prod.

# Recycling routes of lithium-ion batteries

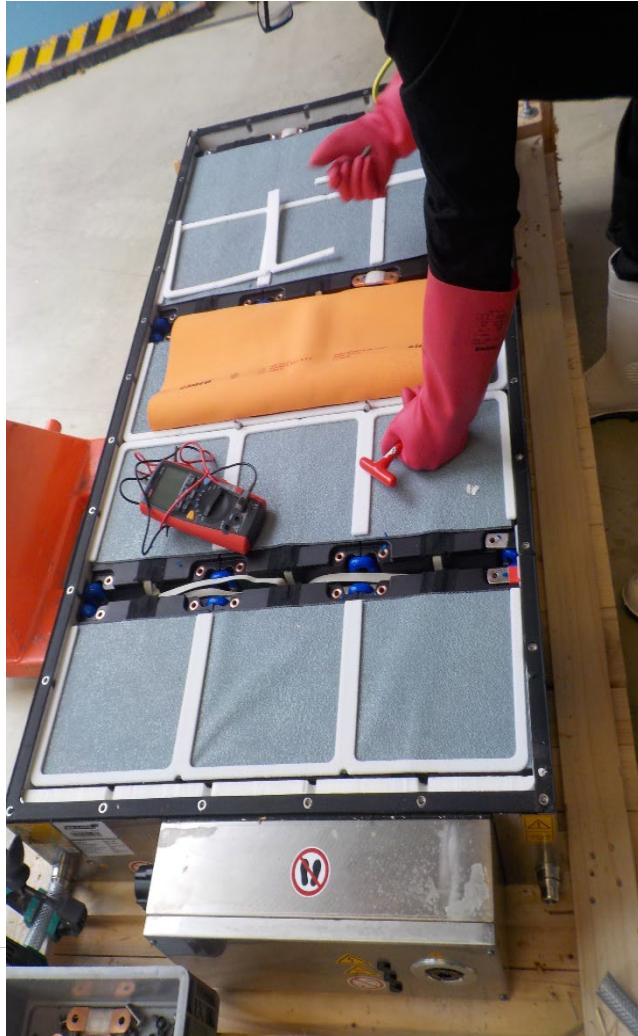


# Lithium-Ionen-Batterie Recycling



# Disassembly

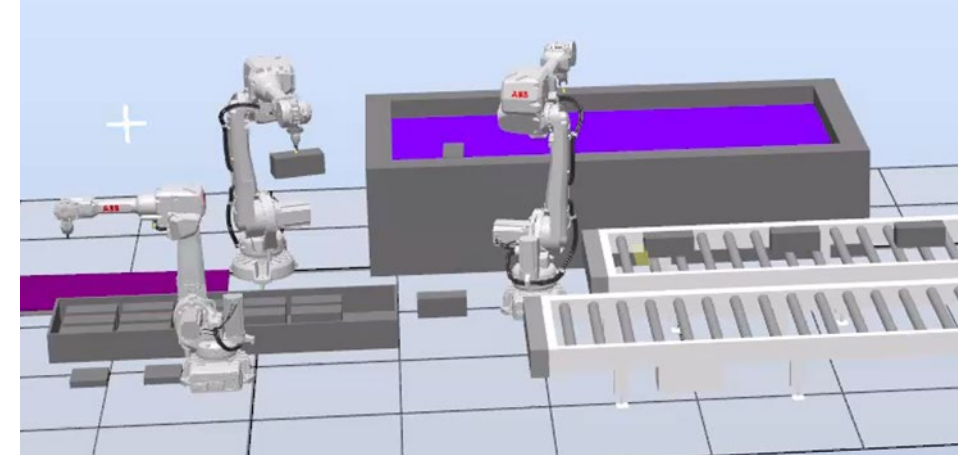
manual



Robust automatised



smart automatised



Established recycling companies currently dismantle only manually

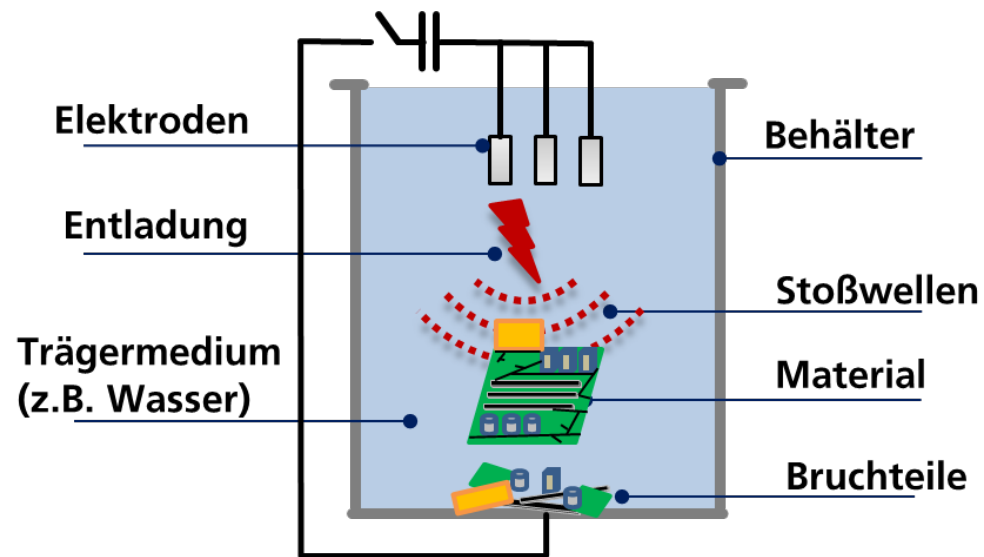


# Elektrohydraulische Zerkleinerung (EHZ)

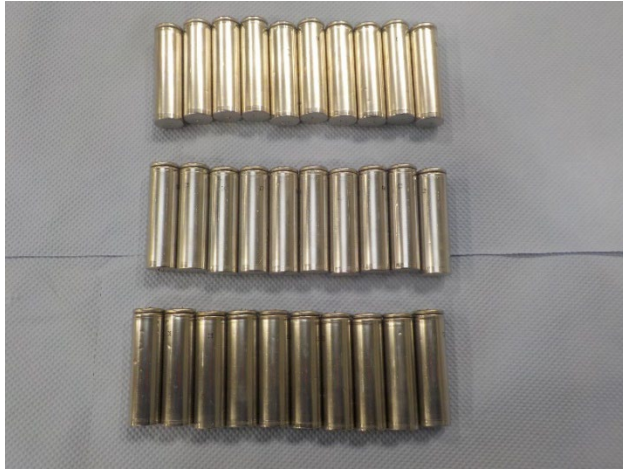
## Intelligente Zerkleinerung

### Funktionsprinzip

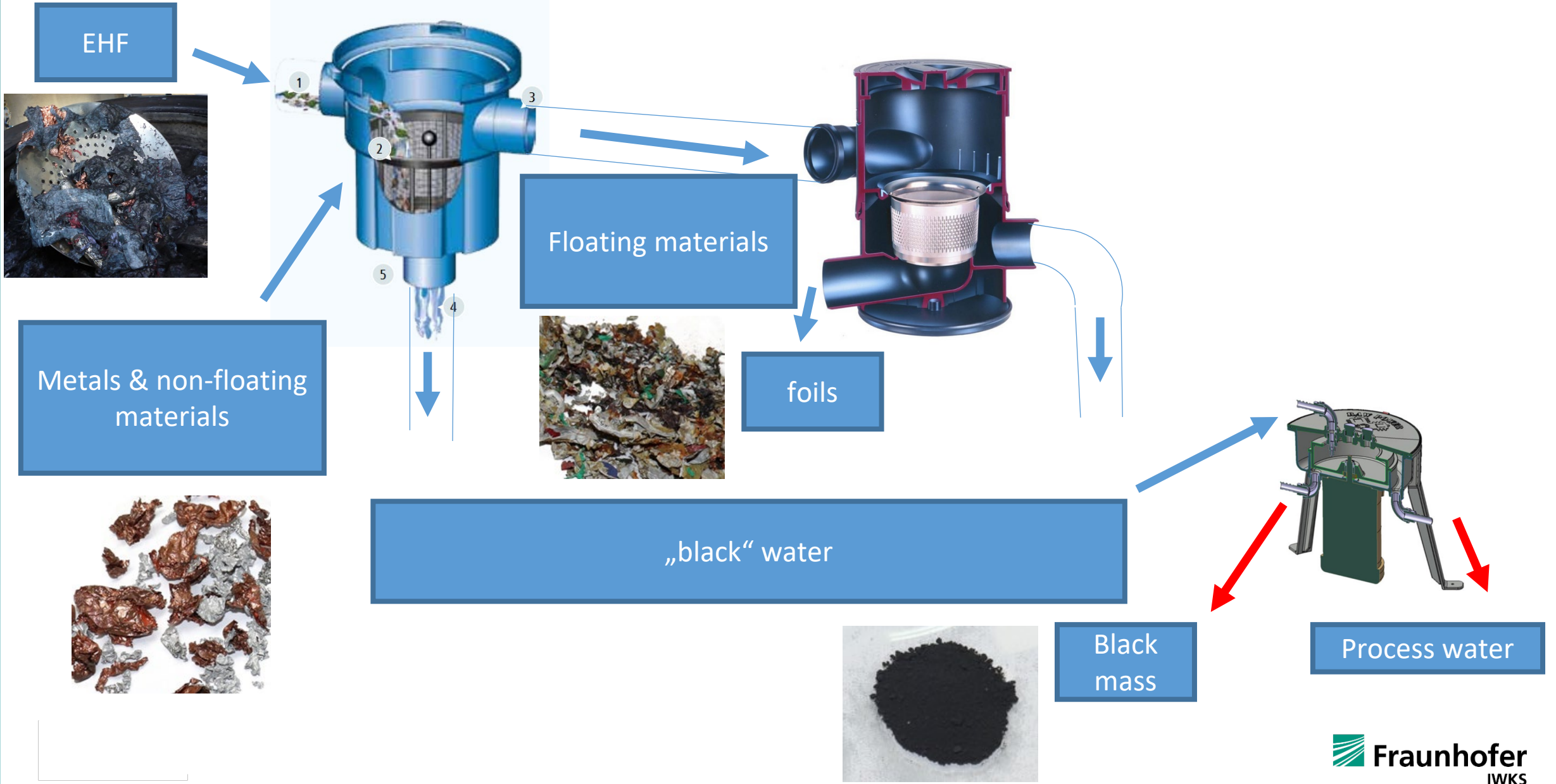
- Hochspannungs-Funkenentladung erzeugt Schockwellen
- Schockwellen breiten sich in flüssigem Medium aus und treffen auf Zielmaterial
- Material bricht an mechanischen Schwachstellen



# Elektrohydraulic Fragmentation



# Sorting of fractions



# Analytics

## Process Water

V7	V7.2 (6000 Impulse)
Water volume [L]	19,6 (TK2)
Amount of Pedelecs	40 gereinigte
pH	6,9
Conductivity [ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ]	2.620
COD [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	4.744
$F_{\text{total}}$	973,68
F [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	234,602
Cl [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	-
$\text{NO}_3^-$ [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	-
$\text{SO}_4^{2-}$ [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	78,679
$\text{PO}_4^{3-}$ [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	-
$P_{\text{ges}}$ [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	304
Li [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	221
Co [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	0,8
Mn [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	27,1
Ni [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	1,86
Fe [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	0,12
Cu [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	6,51
Al [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	6,35
Ca [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	< 0,25
Mg [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	0,29
Na [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	1,69
Si [ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ]	1,13

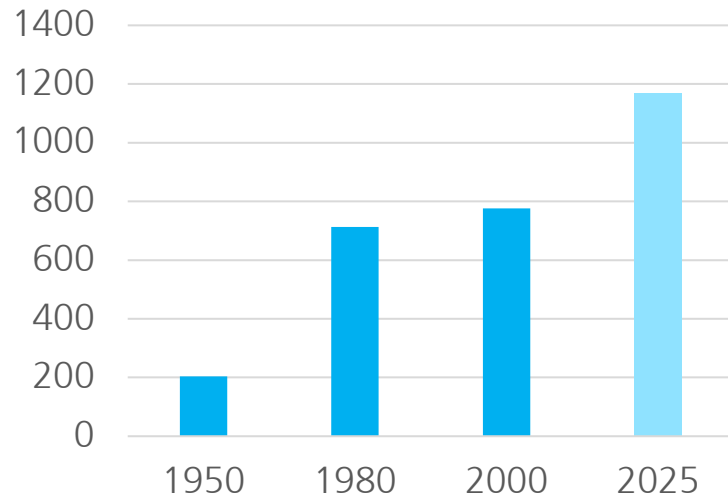
Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV)

Aluminium	3 mg/l
Eisen	3 mg/l
Fluorid, gesamt	30 mg/l
Phosphor, gesamt	2 mg/l
Kupfer	0,5 mg/l
Nickel	1 mg/l

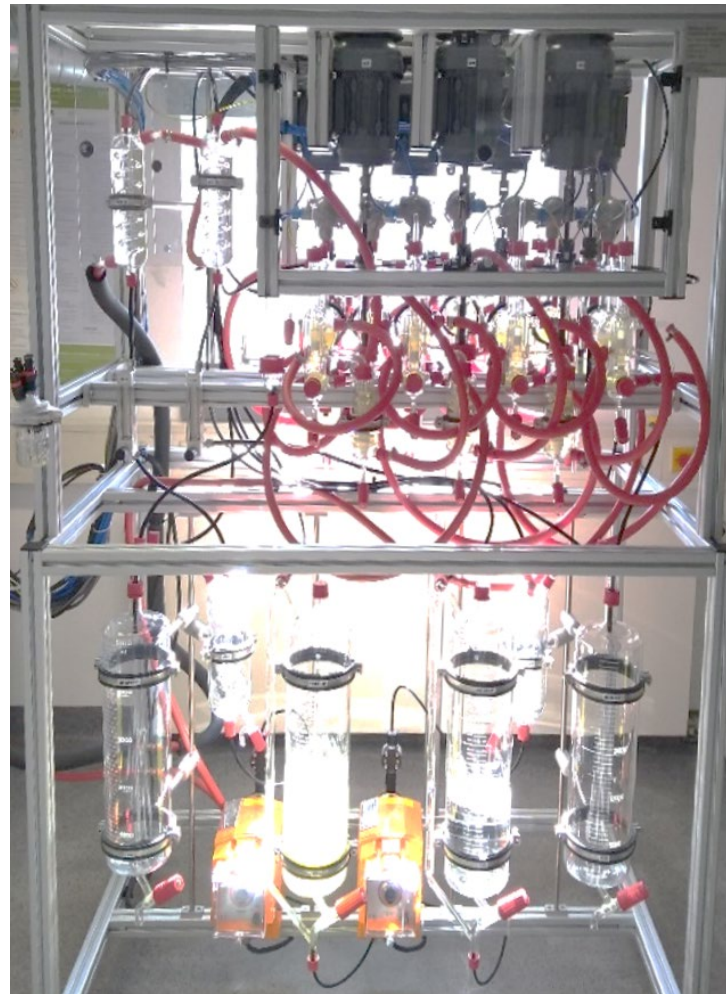


# Industrial Waste Water and Resources

Industrieller Wasserverbrauch  
jährlich weltweit [km<sup>3</sup>]



Quelle: Black, M./King, J.: Der Wasseratlas, EVA  
Europäische Verlagsanstalt, Hamburg 2009, S. 24 - 25.



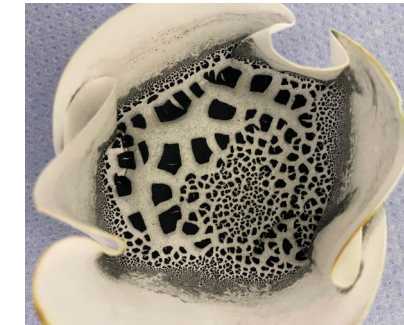
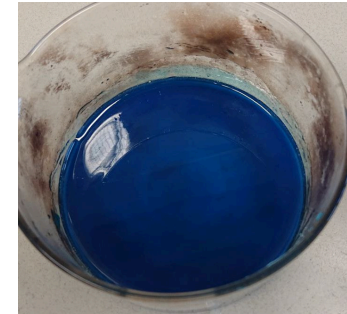
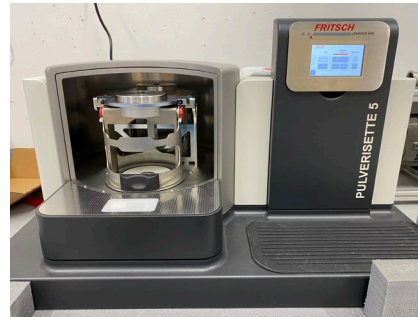
# Recycling electrodes



Leclanché



Hydrolibrec project



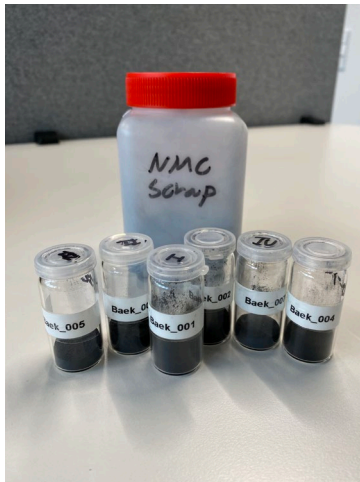
NCM scrap/Black mass

Mechanochemistry with molten salts

Washing/Drying

Washing/Drying

Heat treatment



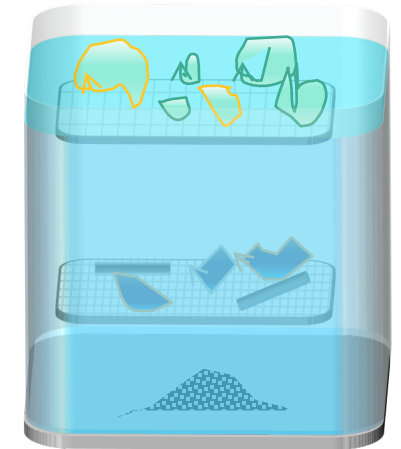
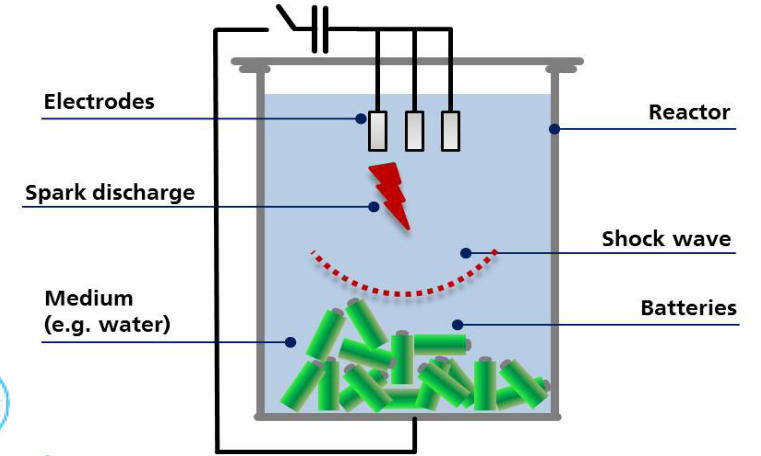
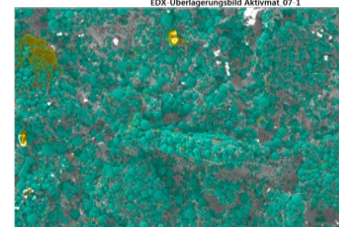
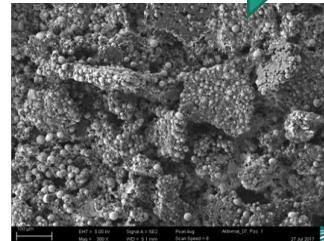
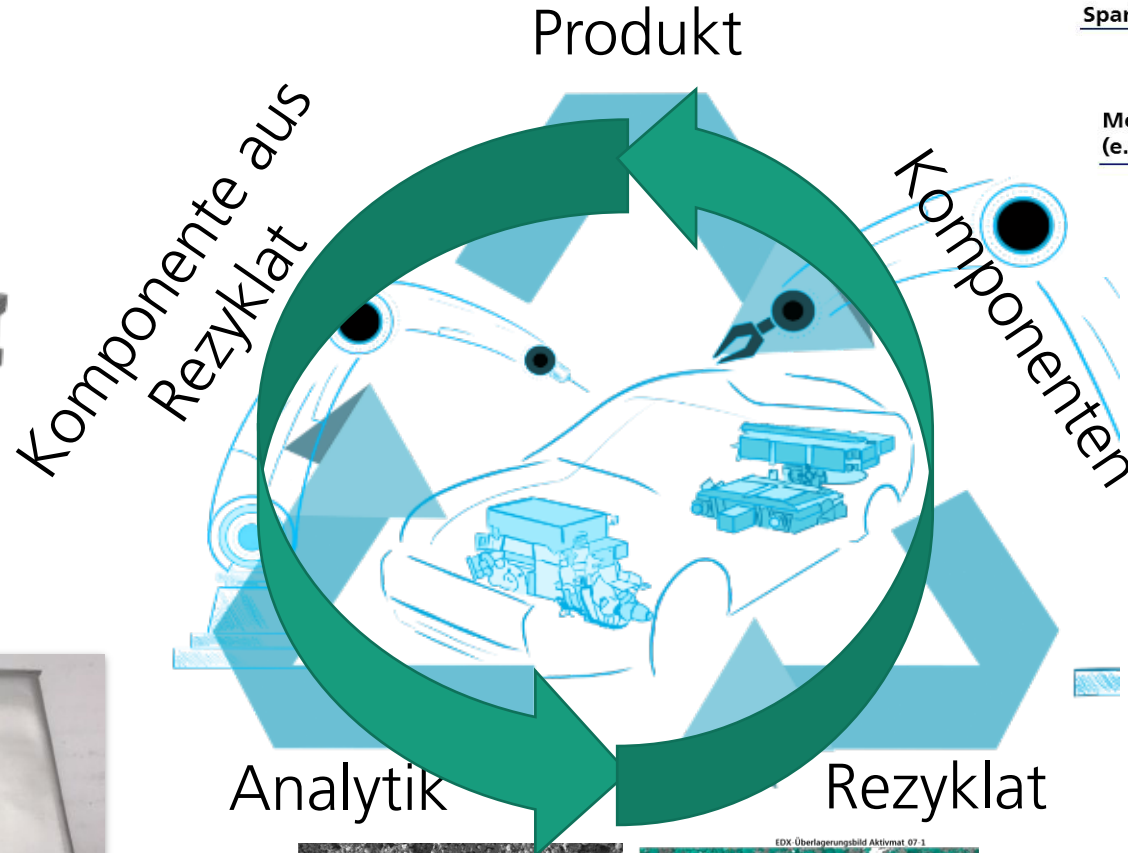
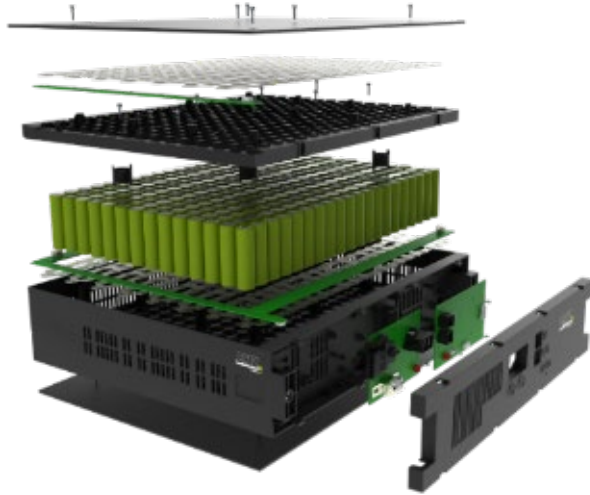
Relithiated powder



Ball-milled precursor



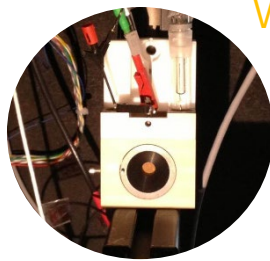
# Elektromobilität: Recycling-Batterien



# Leistungszentrum

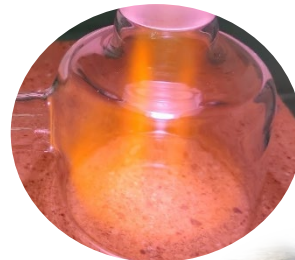


PV der nächsten Generation, direkte Wasserspaltung



Elektrolyse, Plasmalyse: Regenerative Membranen und Elektroden

**H<sub>2</sub> Erzeugung**



Brennstoffzellen- und Batterie-Recycling



**H<sub>2</sub> Nutzung**

Magnetokalorische Kühlung/ Verflüssigung

**H<sub>2</sub> Transp./Speicher**

Metallhydrid-Speicher, Wasserstoffversprödung

E-Mobilität





# Anlagen und Prozesse

Precursor



(Elektro)chemische Aufbereitung



Nass-, Trockensortierung,  
Prozesswasseraufbereitung



Zerkleinerung

Sortierung/Trennung

Zerkleinerung oder  
Pyrometallurgie

ggf. Vorbehand-  
lung  
(z.B. thermisch)

Entladung, Analytik



Roh-  
material

Material-  
herstellung

Inerte Präparation



Testzellenproduktion



Zellher-  
stellung

Batterie-  
herstellung

Lagerung, Transport



Nutzung

Rückgabe-  
logistik



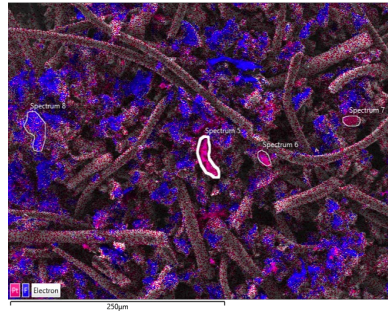
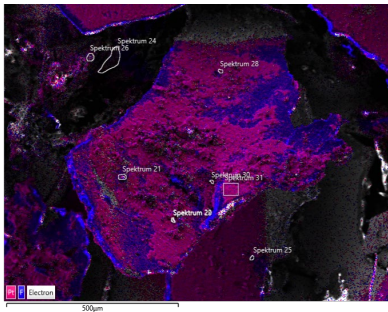
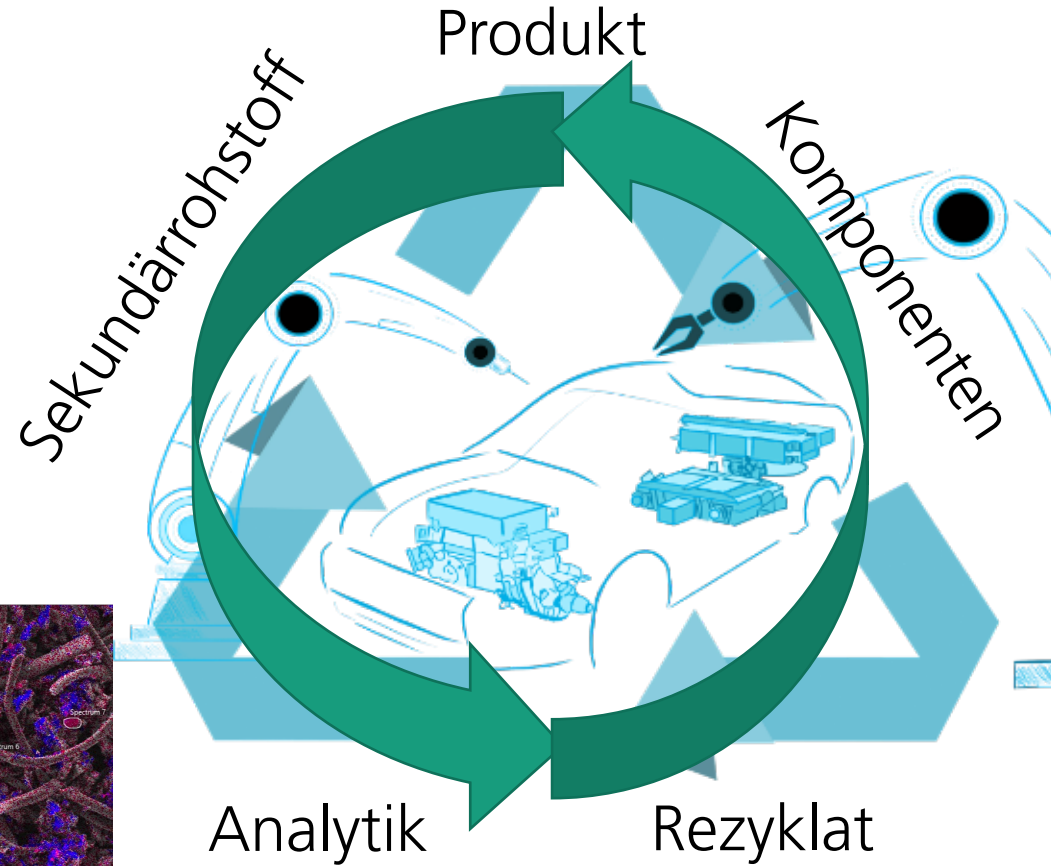
Automatisierung

Theoretische  
Grundlagen

LCA, Modellierung,  
Programmierung,  
Konstruktionen,  
Recherche

Demon-  
tage

# Recycling - Brennstoffzellen



REM-EDX von MEA (1200 µm) und GDL (900 µm) nach EHZ, pink: Pt (Katalysator), violett: F (Nafion, PTFE)



## Kontakt

**Fraunhofer IWKS**  
**Brentanostr. 2a, 63755 Alzenau**  
**Tel. +49 6023 32039-801**  
**Aschaffenburger Str. 121, 63457 Hanau**  
**Tel. +49 6023 32039-817**  
**[www.iwks.fraunhofer.de](http://www.iwks.fraunhofer.de)**

Besuchen Sie uns gerne auf:



Facebook



Instagram



LinkedIn



Twitter



XING.



YouTube