HELMHOLTZ ZENTRUM DRESDEN ROSSENDORF

HELMHOLTZ-INSTITUT FREIBERG FÜR RESSOURCENTECHNOLOGIE

FALLSTUDIE KÜHLGERÄTERECYCLING

Magdalena Heibeck & Thomas Mütze

m.heibeck@hzdr.de

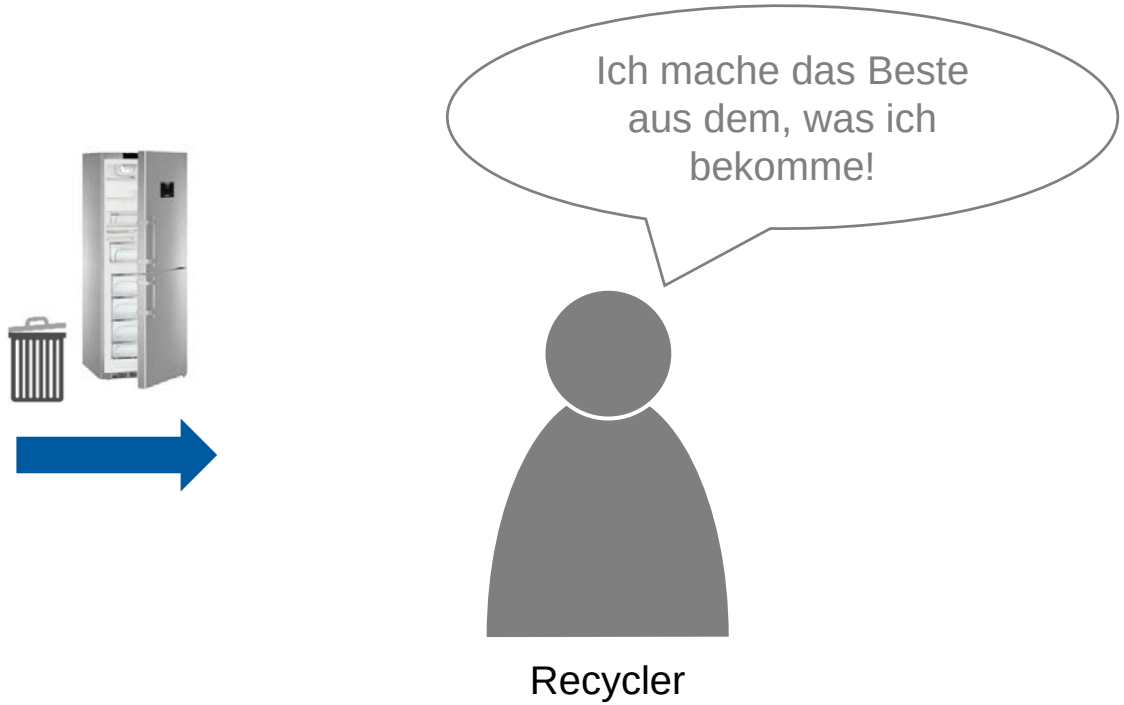
10.11.2022 Recy & DepoTech in Leoben

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

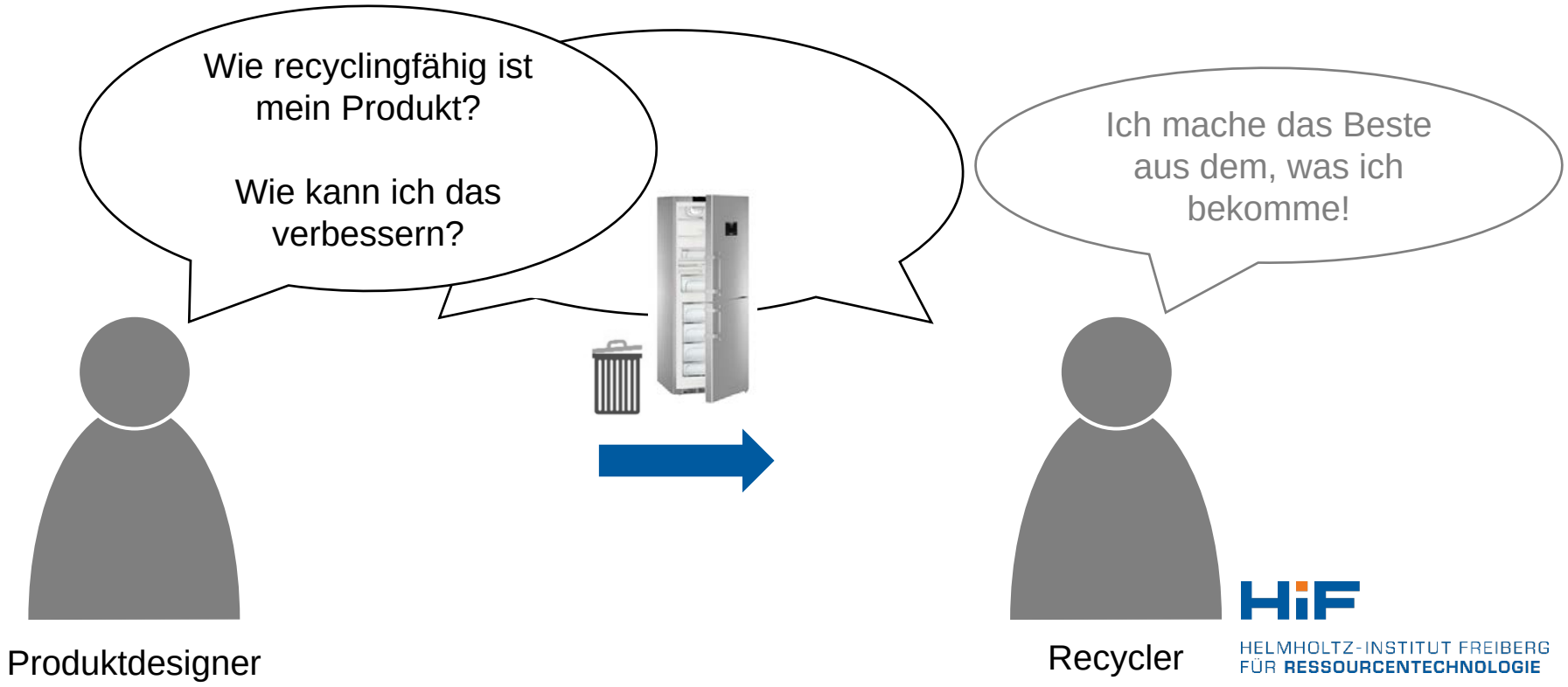
Motivation

Recyclingfähigkeit ist bisher Thema der Recycler:



Motivation

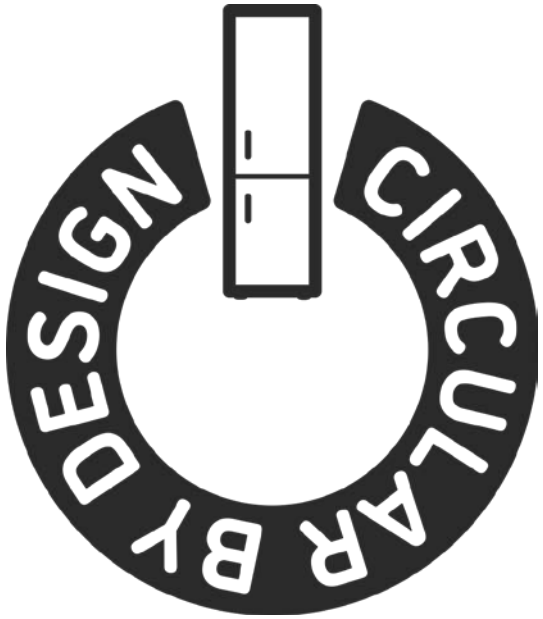
Recyclingfähigkeit ist bisher Thema der Recycler:



HELMHOLTZ-INSTITUT FREIBERG FÜR RESSOURCENTECHNOLOGIE

→ Recyclingfähigkeit verbessern durch **Zusammenspiel** zwischen **Design** und **Recycling**

Projekt „Circular by Design“
2019 - 2022



Ressourcenwende über nachhaltiges Produktdesign von Konsumgütern am Fallbeispiel Kühl-/Gefriergeräte

Förderkennzeichen: 033R244

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

FONA Ressourceneffizienz BMBF

ReziProK Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe

PROJEKTPARTNER*IN

HIF Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie

Wuppertal Institut

Folkwang Universität der Künste

BEC Elektro-Recycling

EKM

ASSOZIIERTE PARTNER*IN

LIEBHERR

rekular

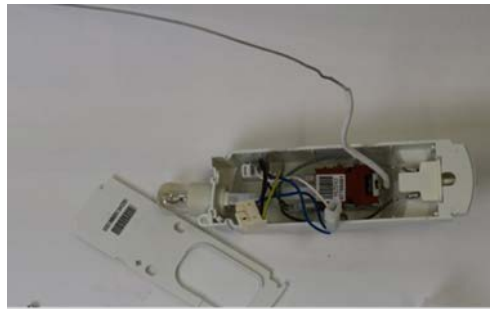
Effizienz Agentur NRW efa+

VDI Zentrum Ressourceneffizienz

HIF

Haushalts-Kühlgeräte: Design Trends

Herstellungsjahr: ca. **2000**



Herstellungsjahr: **2019**

Design Trends

- ↑ elektronische Komponenten
- ↑ Vakuumisolierpaneele
- ↑ Größe & Masse

→ aktuell getrieben durch **Digitalisierung** und **Energieeffizienz**

→ zukünftig Energie- & Materialeffizienz
= **Ressourceneffizienz**

→ Fokus: **Recyclingfähigkeit**

Haushalts-Kühlgeräte aus Recyclingperspektive

Wertstoffe (mit Masseanteilen)

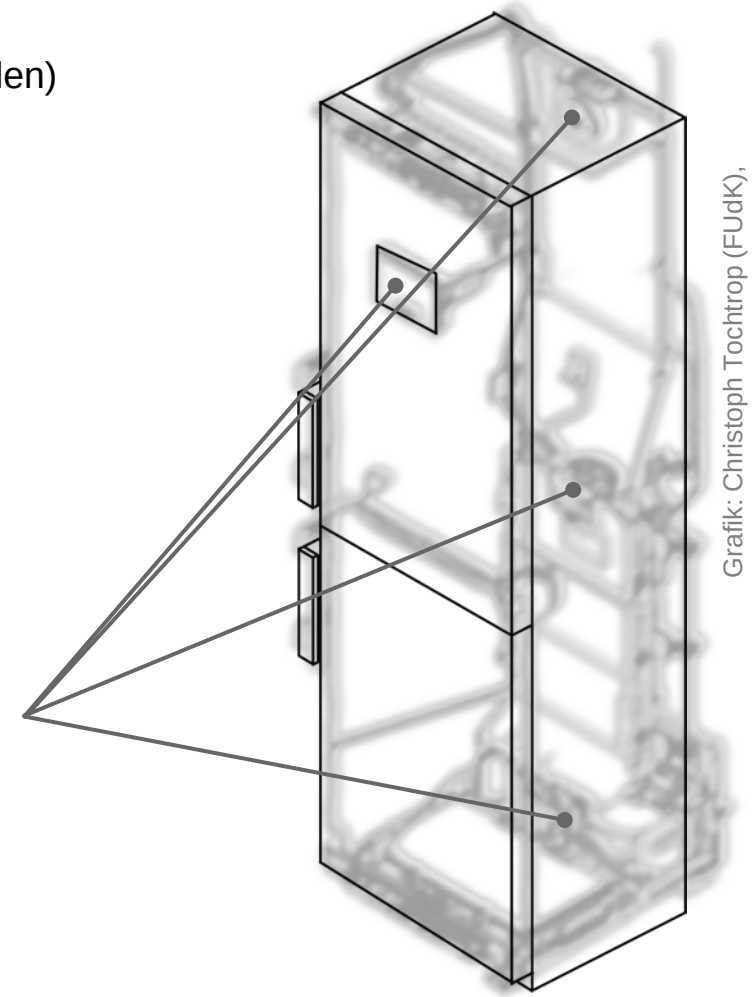
Stahl (35 %)

Hartkunststoffe (24 %)
(davon ca. 70 % PS & ABS)

Kompressor (9 %)

Aluminium (1 %)
Kupfer (0,2 %)

Elektroteile: Leiterplatten,
Displays, Ventilatoren, etc. (2 %)



Grafik: Christoph Tochtrop (FUdK), Magdalena Heibeck

Stör- / Schadstoffe

Kältemittel: Isobutan

Polyurethan-Isolierschaum (ca. 20 %)
→ Treibmittel: Pentan

Kompressorenöle

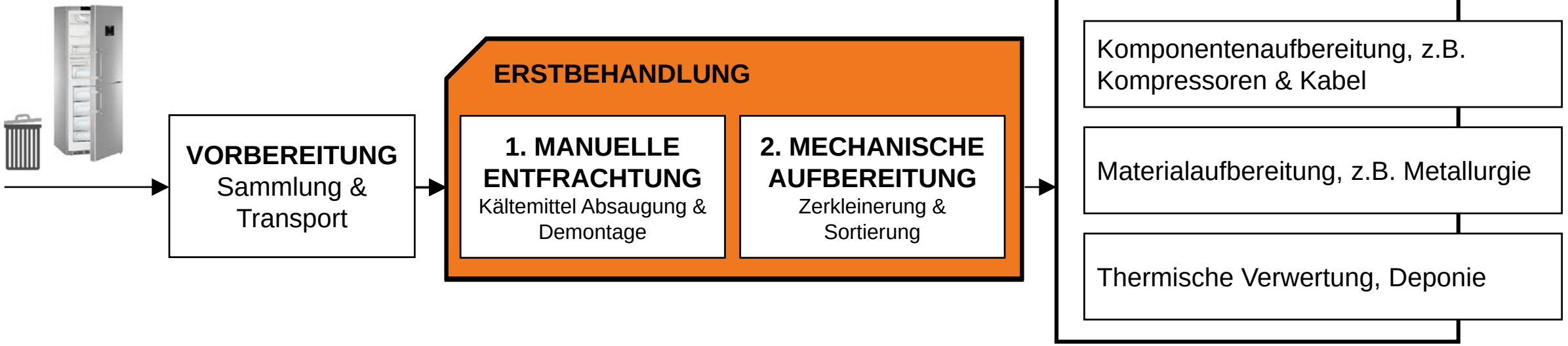
Kondensatoren

Kieselsäure in
Vakuumisolierpaneelen

→ Hoher Anteil an **mittelwerthaltigem Eisen und Kunststoff** sowie **Schadstoffe**, die eine **separate Aufbereitung** erfordern

Kühlgeräte Recycling-Infrastruktur

in Deutschland

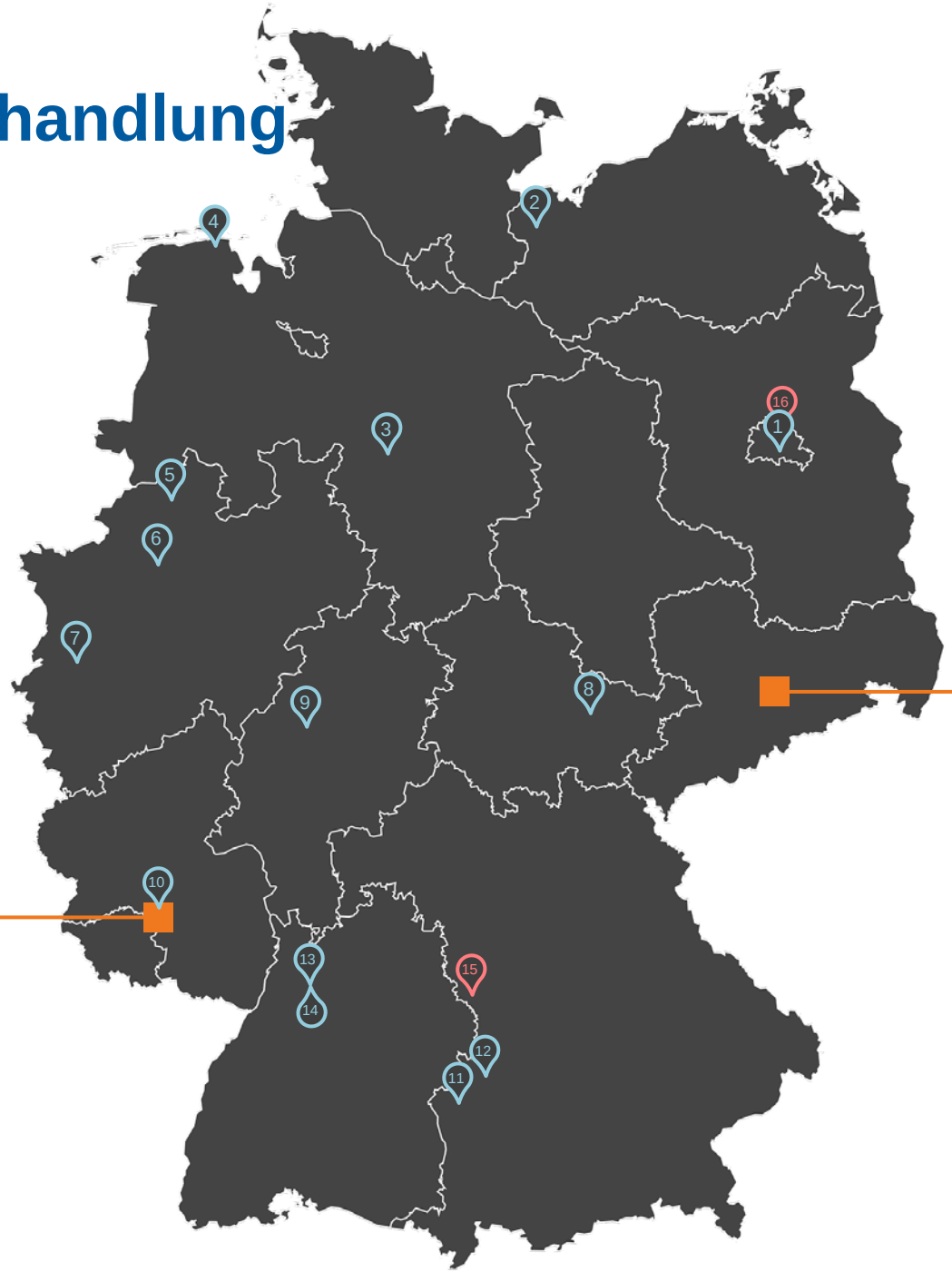


- Es ist schwer, Stoffströme „bis zum Ende“ zu verfolgen.

→ Fokus auf Kühlgeräte **Erstbehandlung**: **Experimentalkampagne**

Anlagen zur Erstbehandlung von Kühlgeräten

in Deutschland



HIF
HELMHOLTZ-INSTITUT FREIBERG
FÜR RESSOURCENTECHNOLOGIE

STENA RECYCLING
rekular
in Baumholder

nur Entfrachtung

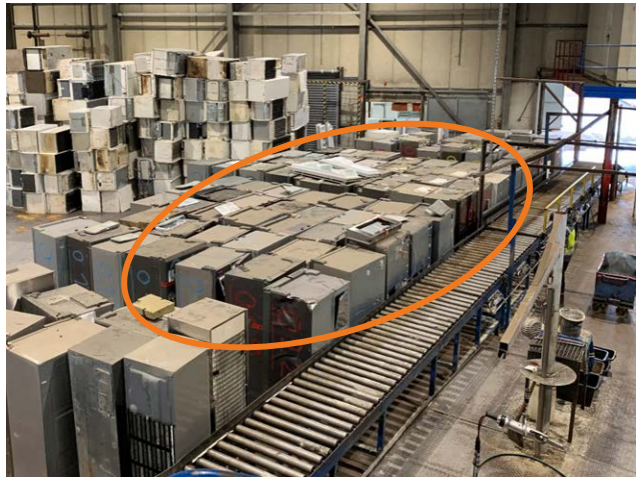
Entfrachtung und mech. Behandlung

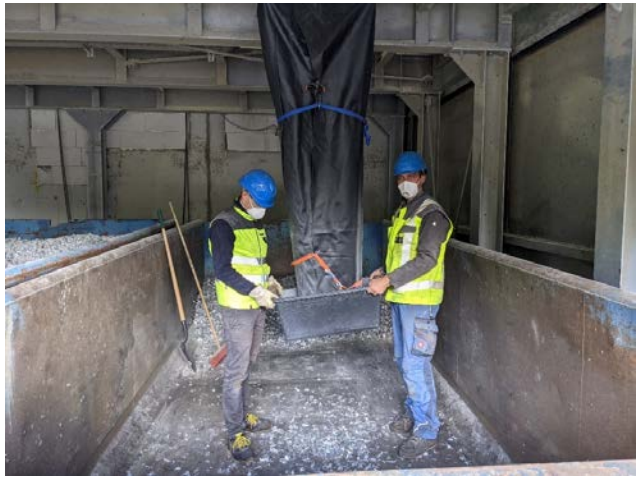
Grafik: Maria Wächter (EKM), Magdalena Heibeck

HIF

Experiment zum Kühlgeräterecycling

am 06. und 07.10.2021





Bilder: Magdalena Heibeck, Anne-Christin Jentzsch (HIF)

Versuchsablauf

- 100 Kühlgeräte charakterisieren
- Prozessinformationen sammeln zu
  - Kältemittelabsaugung
  - Kompressor Demontage
  - Energie- & Stickstoffverbrauch
- Massen bilanzieren
- Produktfraktionen (Eisen, Kunststoff und Nichteisen) beproben

STENA RECYCLING

rekular

→ **Status-quo** in einer Recyclinganlage für Kühlgeräte in Deutschland ermitteln

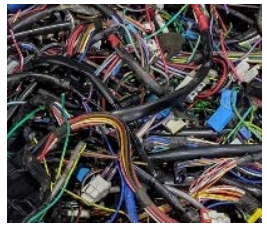
HiF

Kühlgeräte Erstbehandlung
mit Masseanteilen der ausgebrachten Produkte

100 Kühl-/ Gefriergeräte
m = 9.679 kg
(100 %)

STUFE 1:
MANUELLE ENTFRACHTUNG
Kältemittel Absaugung & Demontage

87 % entfrachtete Kühlgeräte



- 9,2 % Kompressoren
- 2,2 % Elektroteile (Leiterplatten, Displays, Kabel, Ventilatoren, etc.)
- 1,2 % Glas (Einlegeböden)
- 0,2 % Kupferleitungen
- 0,2 % Kälteöl + Kältemittel

→ In Stufe 1 werden **werthaltige** und **störende** Stoffe **manuell entfernt**.

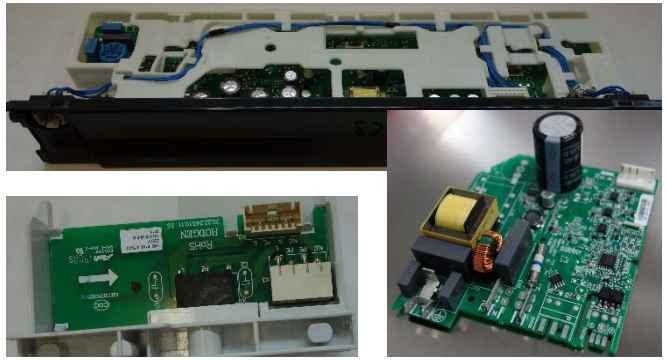
Ergebnisse manueller Entfrachtung

Welche Designentscheidungen bereiten Probleme?

- Kompressor Demontage
  - ☹ Schraube (ca. 1 min)
  - ☺ Kunststoffniet (ca. 15 s)

Bilder: Christoph Tochtrop (FUdK)

→ Demontage für Recycling ≠ Demontage für Reparatur



Weitere Designvorschläge

- standardisiertes Kältemittelauslassventil
- zugänglichere Anordnung von Leiterplatten
- Label

→ **Großes Potenzial** für verbessertes **Design zur Entfrachtung**

Von „weißer Ware“ zu „silberner Ware“?

Eisenfraktion

30 %

70 %

Außengehäuse

restliche Eisen-Teile (im Innern) bestehen aus **Baustahl**

87 %

13 % (Trend: ↑)

Baustahl (niedriglegiert), beschichtet

NiRo Stahl (Cr > 10,5 %), unbeschichtet

Probleme

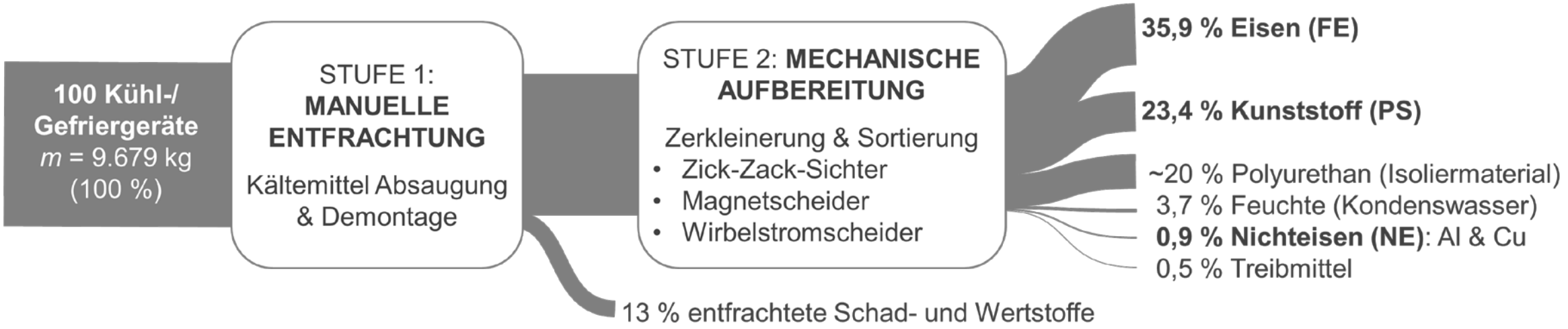
- NiRo Stahl landet im Baustahl.
- Chrom geht in Schlacke verloren und verunreinigt diese.

ca. 10x wertvoller als Baustahl

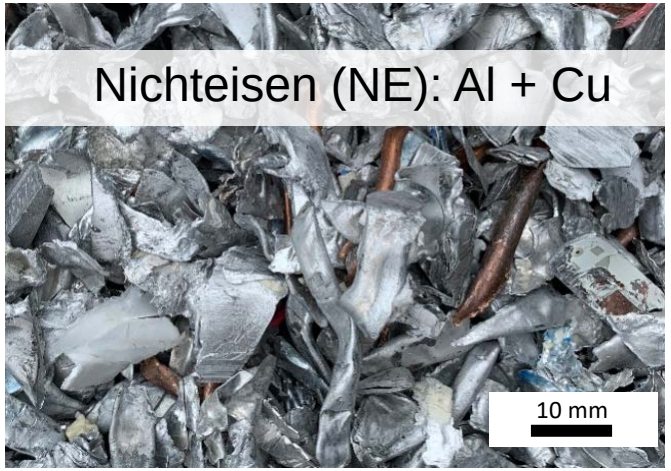
A) auf **NiRo** Gehäuse **verzichten**

B) Geräte **vorsortieren** und batchweise aufbereiten (**NiRo-reiche** FE Fraktion)

Kühlgeräte Erstbehandlung
mit Masseanteilen der ausgebrachten Produkte



Probenahme und -analyse:



Ergebnisse der Probenanalyse

Komponente	Masseanteil an Proben in %	Wertstoffausbringen R_W in %		
		FE	NE	PS
Stahl	58,2	99,5	0,0	0,5
Hart-Kunststoff	37,4	3,2	0,2	96,7
PUR	0,5	72,8	0,6	26,6
Aluminium	1,6	1,9	73,5	24,6
Kabel	1,1	4,9	0,2	94,9
Magnet	0,6	46,5	0,7	52,8
Kupfer (ohne Kabel)	0,4	6,5	57,3	36,2
Andere (Glas, Holz, Leiterplatten etc.)	0,2	43,6	2,1	54,4

Ursachen für **Verunreinigungen**

Aufschlussgrad *A*

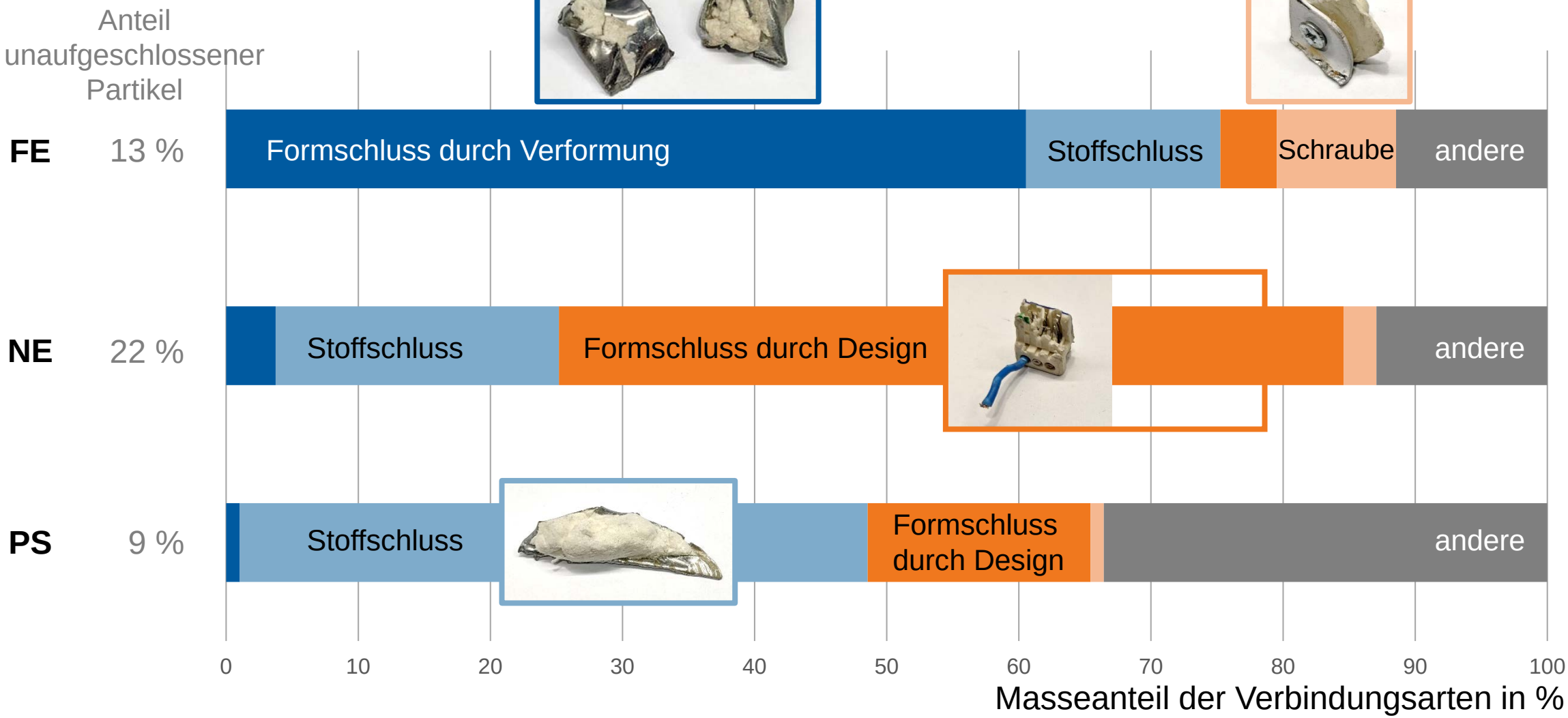
$A_{PUR,FE}$ = 10 %, $A_{PUR,PS}$ = 23 %

$A_{Al,NE}$ = 97 %, $A_{Al,PS}$ = 60 %

Kunststoffmantel (Isolierung)

Kunststoffmantel (Türdichtung)

Verbindungsarten



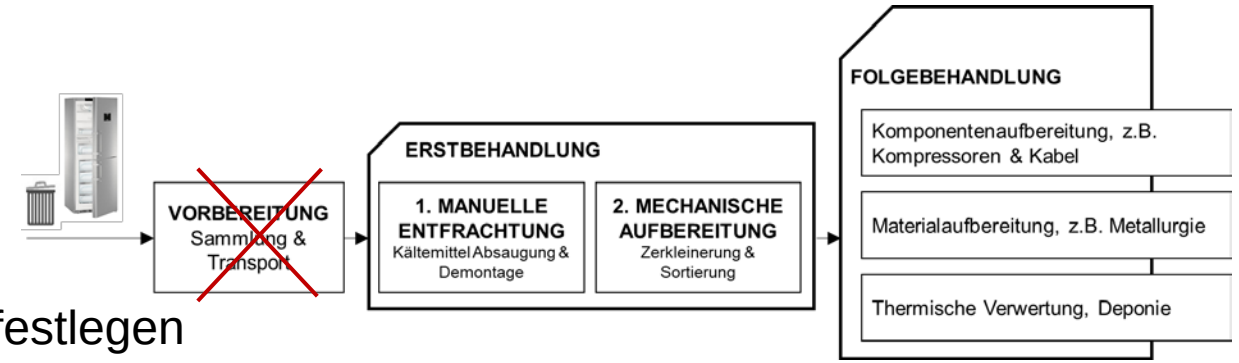
→ **Design**-, **material-** und **prozess**-spezifische **Restverbunde**

Recyclingfähigkeitsrate Kühlgerät

nach DIN EN 45555 (2020)

Recyclingfähigkeitsrate Kühlgerät

nach DIN EN 45555 (2020)



- Referenz-EoL-Behandlungsszenario für Kühlgeräte festlegen
  - **Daten** für Erstbehandlung aus **Experiment** (Rest: **Experteninterviews**)
  - Materialspezifische Effizienz je Behandlungsschritt zu Material-Recyclingfähigkeit R_i vereint

Material *i*	μ_i	R_i
Stahl	43 %	98 %
Hart-Kunststoffe	24 %	50 %
PUR Schaum	23 %	10 %
Kondensat	4 %	95 %
Kupfer	2 %	94 %
Aluminium	1 %	79 %
Glas	1 %	90 %

$$R = \sum_i (R_i * \mu_i)$$

Recyclingfähigkeitsrate *R* beträgt ca. **65 %**

→ DIN EN 45555: ein mögliches Werkzeug für Produktdesigner die **Recyclingfähigkeit** zu **bewerten** (Datenbeschaffung schwierig)

Designvorschläge

Bündelung und gute Erreichbarkeit von Technikmodulen
für Reparatur & Recycling

Folkwang Universität der Künste

Wuppertal Institut

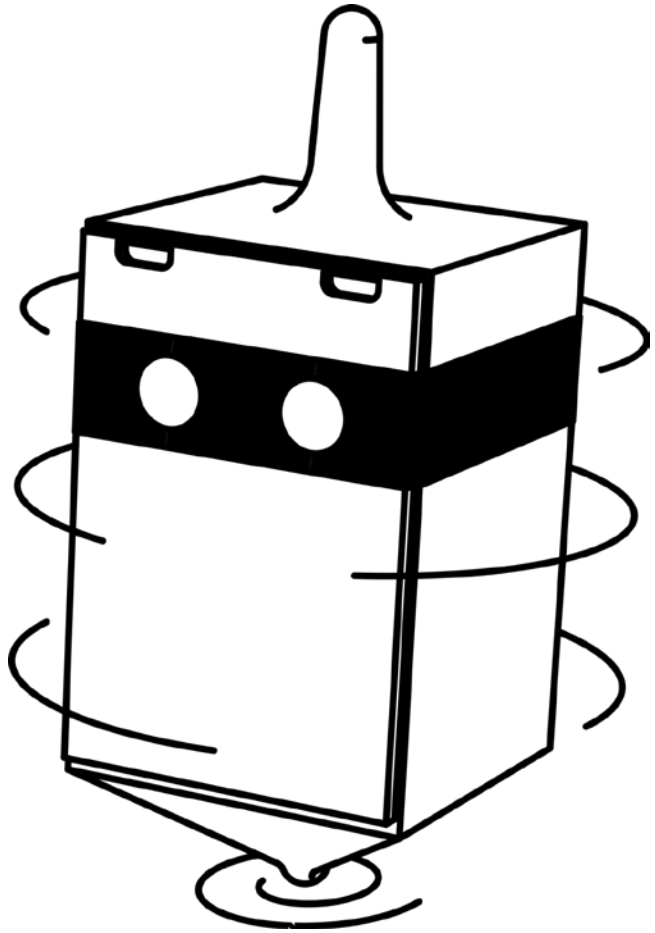
Konzept & Design: Christoph Tochtrop & Cornelius Richter,
Rendering: Shahriar Assadi

Zusammenfassung

- **Recyclingfähigkeitsrate** für Alt-Kühlgeräte beträgt aktuell **ca. 65 %**.
- Es gibt **Potenziale** für ein recyclinggerechteres Design.

Ausblick

- **Sensorbasierte Charakterisierung** von Recycling-Stoffströmen
  - Materialzusammensetzung & Verbindungsverhältnisse
- **Prozessmodelle** für Aufschlusszerkleinerung und Sortierung
  - Modellierung der Aufschlusszerkleinerung (mit TU Dresden)
  - Plan für Aufbereitungs-Technikum: Flexiplant



das kreiselnde Kühlgerät

Grafik: Christoph Tochtrop (FUdK)

→ **Vision:** Recyclingfähigkeit schon **im Designstadium** abschätzen und **optimieren**

HELMHOLTZ ZENTRUM DRESDEN ROSSENDORF

HELMHOLTZ-INSTITUT FREIBERG FÜR RESSOURCENTECHNOLOGIE

FALLSTUDIE KÜHLGERÄTERECYCLING

Magdalena Heibeck & Thomas Mütze

m.heibeck@hzdr.de

10.11.2022 Recy & DepoTech in Leoben

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Produkt-Zusammensetzung

Mit Masseanteilen μ_i der Komponenten (Mittelwerte über Proben mit Standardabweichung)

Komponente *i*	FE: μ_i in %	NE: μ_i in %	PS: μ_i in %	Total: μ_i in %
Stahl	97,1 ± 0,8	0,2 ± 0,3	0,7 ± 1,0	58,2
Hart-Kunststoff	1,4 ± 0,5	3,9 ± 1,2	92,9 ± 1,9	37,4
PUR	0,6 ± 0,5	0,2 ± 0,1	0,3 ± 0,2	0,5
Aluminium	0,1 ± 0,1	78,8 ± 2,6	1,0 ± 0,7	1,6
Kabel	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0.1	2,5 ± 0,8	1,1
Magnet	0,5 ± 0,2	0,3 ± 0,1	0,8 ± 0,4	0,6
Kupfer (ohne Kabel)	0,04 ± 0,1	14,5 ± 3,1	0,4 ± 0,4	0,4
Andere (Glas, Holz, Leiterplatten etc.)	0,1 ± 0,1	0,2 ± 0,2	0,2 ± 0,2	0,2
SUMME	**100**	**100**	**100**	**100**

→ **Ursachen** für **Verunreinigungen**: Schlechter **Aufschluss** oder schlechte **Sortierung**?

Aufschlusskoeffizient A_K

Definition nach Berube:

$$A_{\mathrm{K},i} = \frac{m_{\mathrm{frei},i} + m_{\mathrm{verw},i}}{m_{\mathrm{ges},i}}$$

aufgeschlossen vorliegende Masse der Komponente i

in Verwachsungen vorliegende Masse der Komponente i

Masse **aller Partikel**, welche Komponente i **enthalten**

Minimalbeispiel:

Partikelmenge mit drei Komponenten (Farben)

Aufschlussgrad
(bei gleicher Dichte)

$A_{\mathrm{K,blau}} = 100\%$

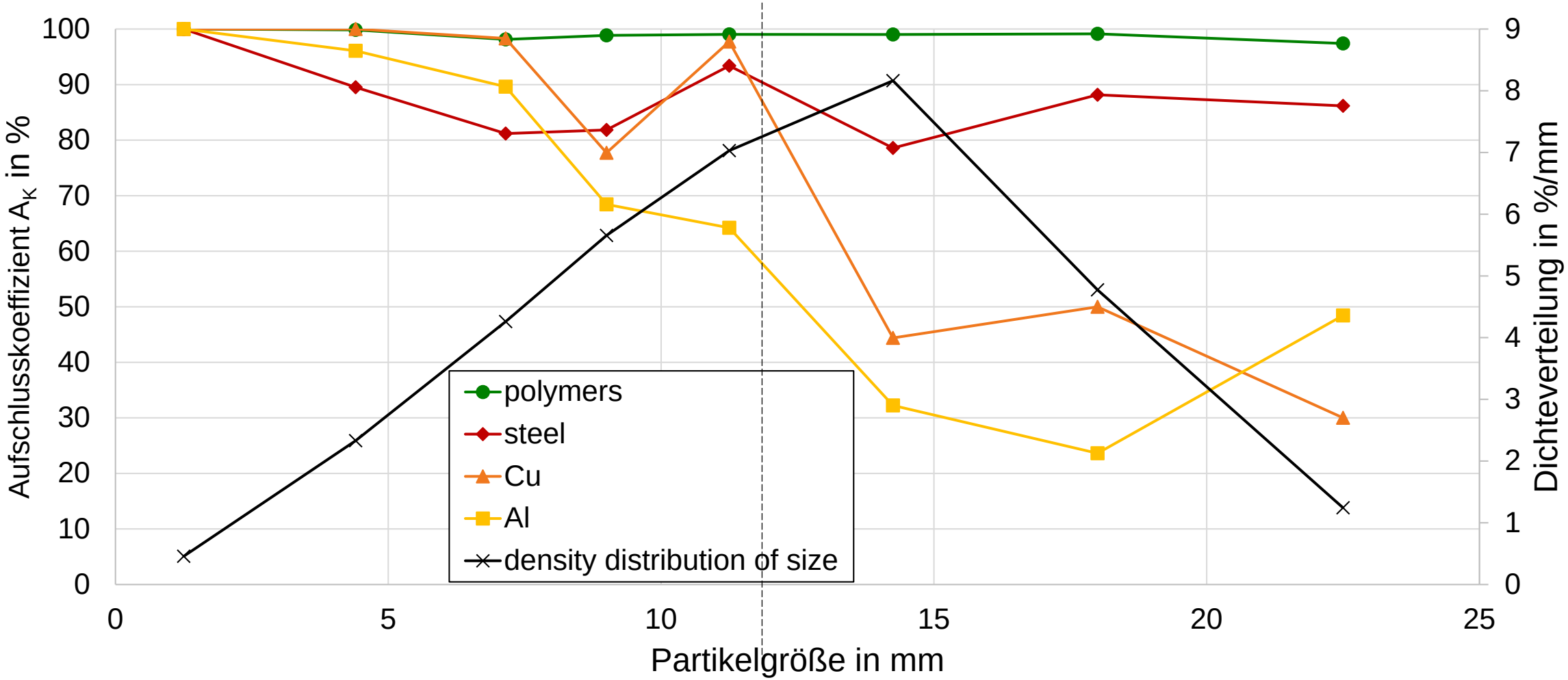
$A_{\mathrm{K,orange}} = 75\%$

$A_{\mathrm{K,grün}} = 50\%$

Äquivalenz-partikel

Aufschlusskoeffizient A_K (nach Berube)

In Abhängigkeit von der Größe für Kunststoff Produkt (PS)



→ **Al&Cu** > 12,5 mm: **schlechter Aufschluss** → Klassieren + weiter zerkleinern

Designvorschläge

Folkwang Universität der Künste

Wuppertal Institut

Konzept & Design: Christoph Tochtrop & Alica Assadi

Charakterisierung der Kühl-/Gefrierkombinationen

Datenerhebung

- Abmessungen
  (Auswahlkriterium: Höhe > 1,60 m)
- Gewicht
- Typenschild
  - Hersteller
  - Kältemittel Typ & Menge
  - Produktionsjahr
- Defekte & Fehlteile
- Kompressor Befestigung
- Gehäuse Stahllegierung

31 schmale Geräte

185±12 cm hoch
60±5 cm breit
70±10 kg

69 breite Geräte
32 Samsung, 37 andere Hersteller

175±4 cm hoch
90±1 cm breit
110±20 kg

→ Design**gruppen** nach Abmessungen und Hersteller **ohne signifikante Unterschiede, keine Information über** Material, Verbindungsarten und Produktionsjahr

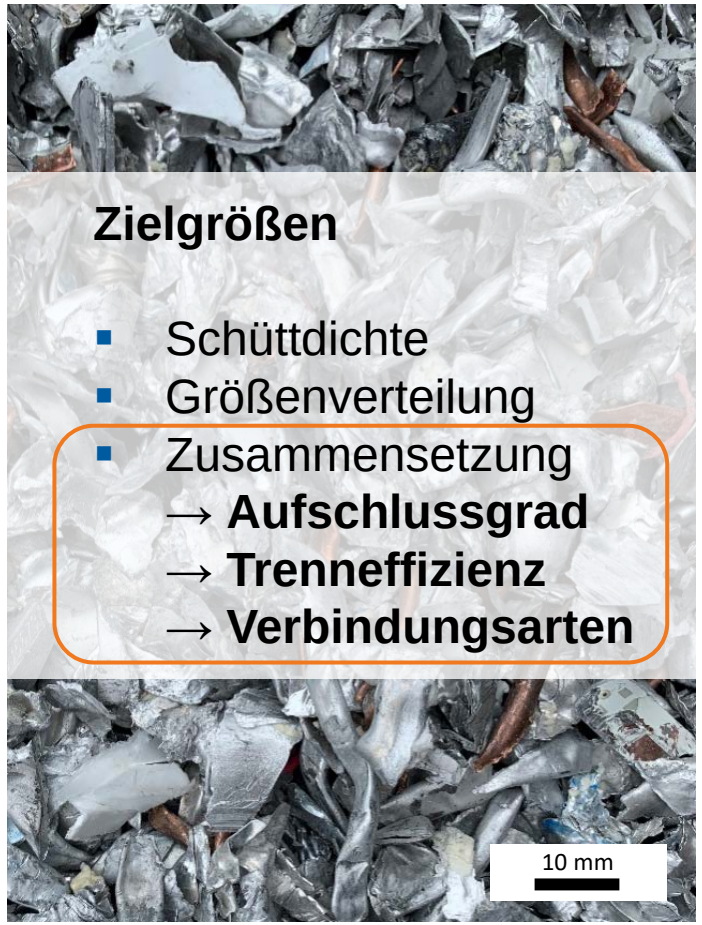
Kühlgeräte Erstbehandlung
mit Masseanteilen der ausgebrachten Produkte

→ Produkte FE, PS und NE beprobt und analysiert

Probenanalyse

Eisenhaltige Fraktion (FE)

Nichteisen Fraktion (NE): Al + Cu



Zielgrößen

- Schüttdichte
- Größenverteilung
- Zusammensetzung
  → **Aufschlussgrad**
  → **Trenneffizienz**
  → **Verbindungsarten**

Kunststoff Fraktion (PS)

→ Typische **Qualitäts-Parameter** + **Designspezifika** bestimmen