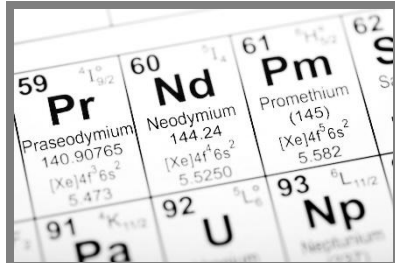




Kreislaufwirtschaft in Zahlen: Die Bedeutung von Quoten

Bayerische Kreislaufwirtschafts- und
Ressourceneffizienztage (KReTa)

Prof. Dr. Peter Hense (Hochschule Bochum)
Akademie der Kreislaufwirtschaft



59 Pr Praseodymium 140.90765 [Xe]4f ³ 6s ² 5.473	60 Nd Neodymium 144.24 [Xe]4f ⁴ 6s ² 5.5250	61 Pm Promethium (145) [Xe]4f ⁵ 6s ² 5.582
91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium

Kritikalität
(CRM*)



Substituierbarkeit
(Phosphor)

Quoten?



Energie
(Aluminium)



Belastungen
(Kunststoffe)

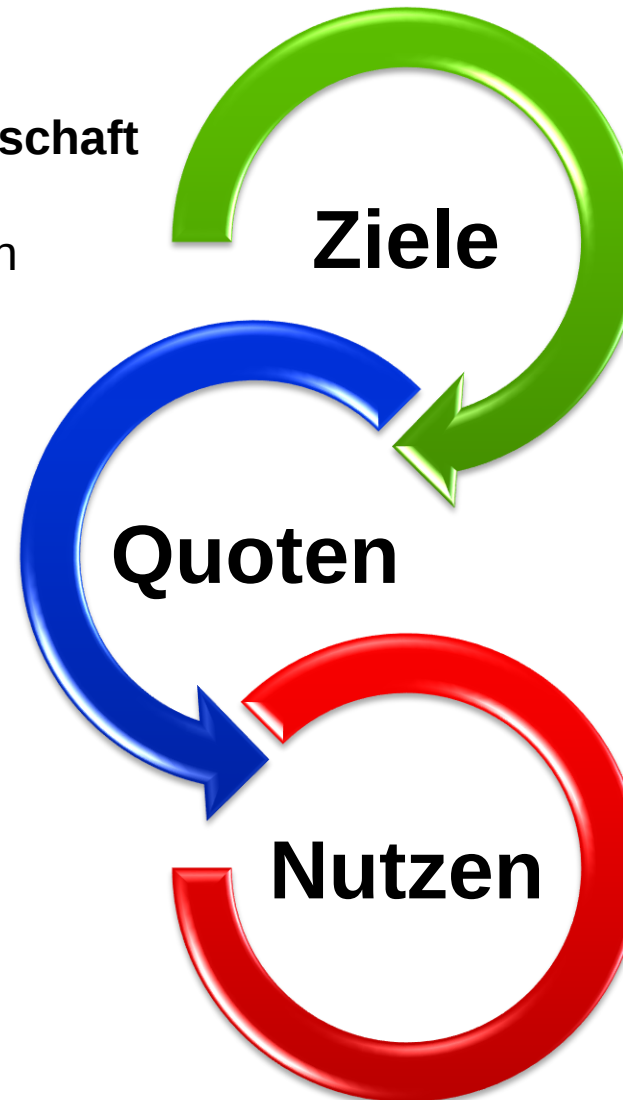
*CRM: versorgungskritische Metalle (engl. Critical Raw Materials)

Übergeordnete Ziele der Kreislaufwirtschaft

- Schutz von Menschen und Umwelt
- Schonung der natürlichen Ressourcen
- ✓ Beitrag zum Klimaschutz (*indirekt*)

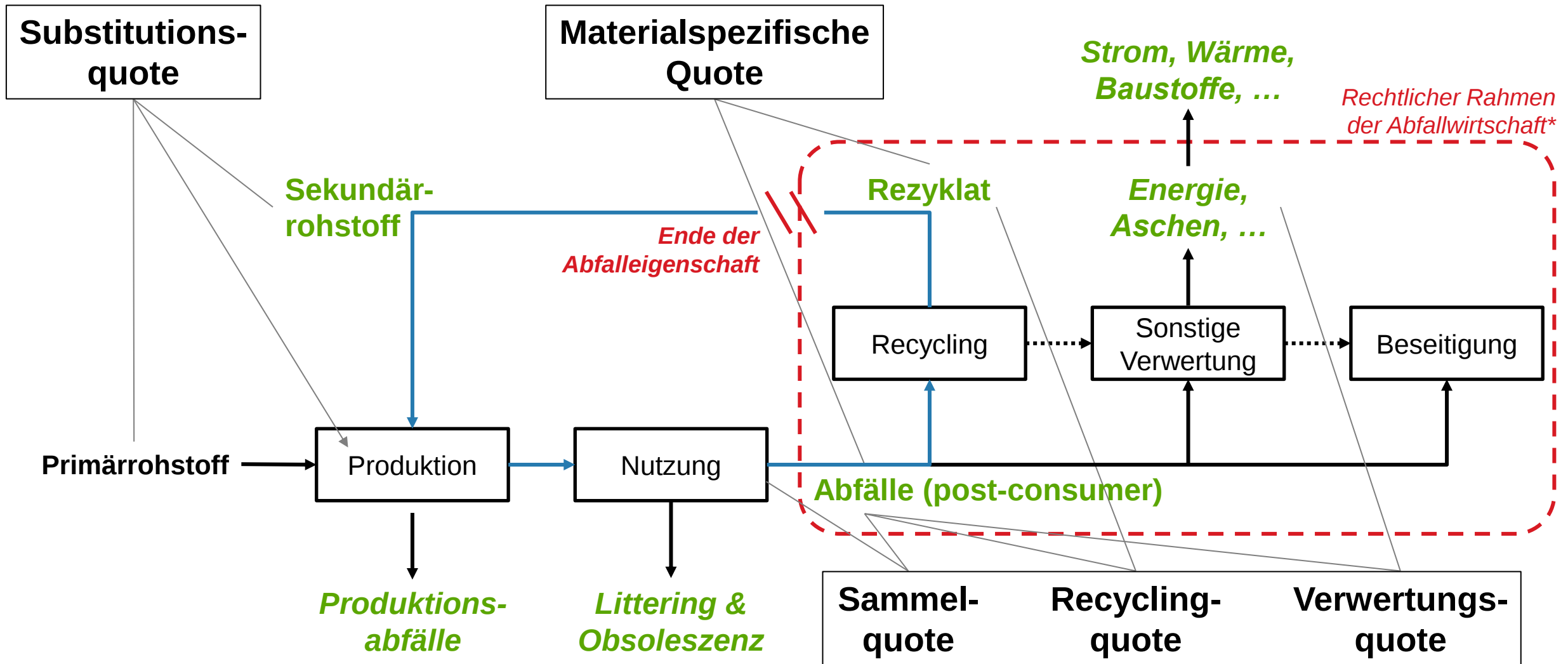
Nutzen aus der Kreislaufwirtschaft

- Volkswirtschaftlicher Nutzen
- Erfüllung der übergeordneten Ziele
- ? Erwartungen erfüllt
- ? Aufwand / Nutzen



Quoten in der Kreislaufwirtschaft

- Ein Lenkungsinstrument (von vielen)
- Ziel: Abfälle zu Rohstoffen machen
- ✓ Beitrag zu den übergeordneten Zielen



Arten von Quoten (I)

- **Sammel-/ Verwertungs-/ Recyclingquoten**
 - Häufigste Verwendungsart
 - Quantitative Vorgaben zum (gesamten) Aufkommen eines Materialstroms
 - Oft in zeitlichen Intervallen steigend
 - Bsp. Siedlungsabfälle^[2]: Vorbereitung zur Wiederverwendung und Recycling
 - seit 2020: 50 Gew.-%
 - seit 2025: 55 Gew.-%
 - ab 2030: 60 Gew.-%
 - ab 2035: 65 Gew.-%

$$\frac{\text{Altgeräte}_{\text{gesammelt}}}{\text{Ø Geräte}_{\text{in Verkehr gebracht}}} = \geq 65 \%$$

Sammelquote^[1]

für Elektro(nik)altgeräte seit 2019 (vereinfacht)



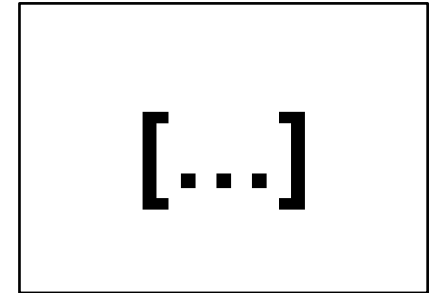
Elektro(nik)altgeräte



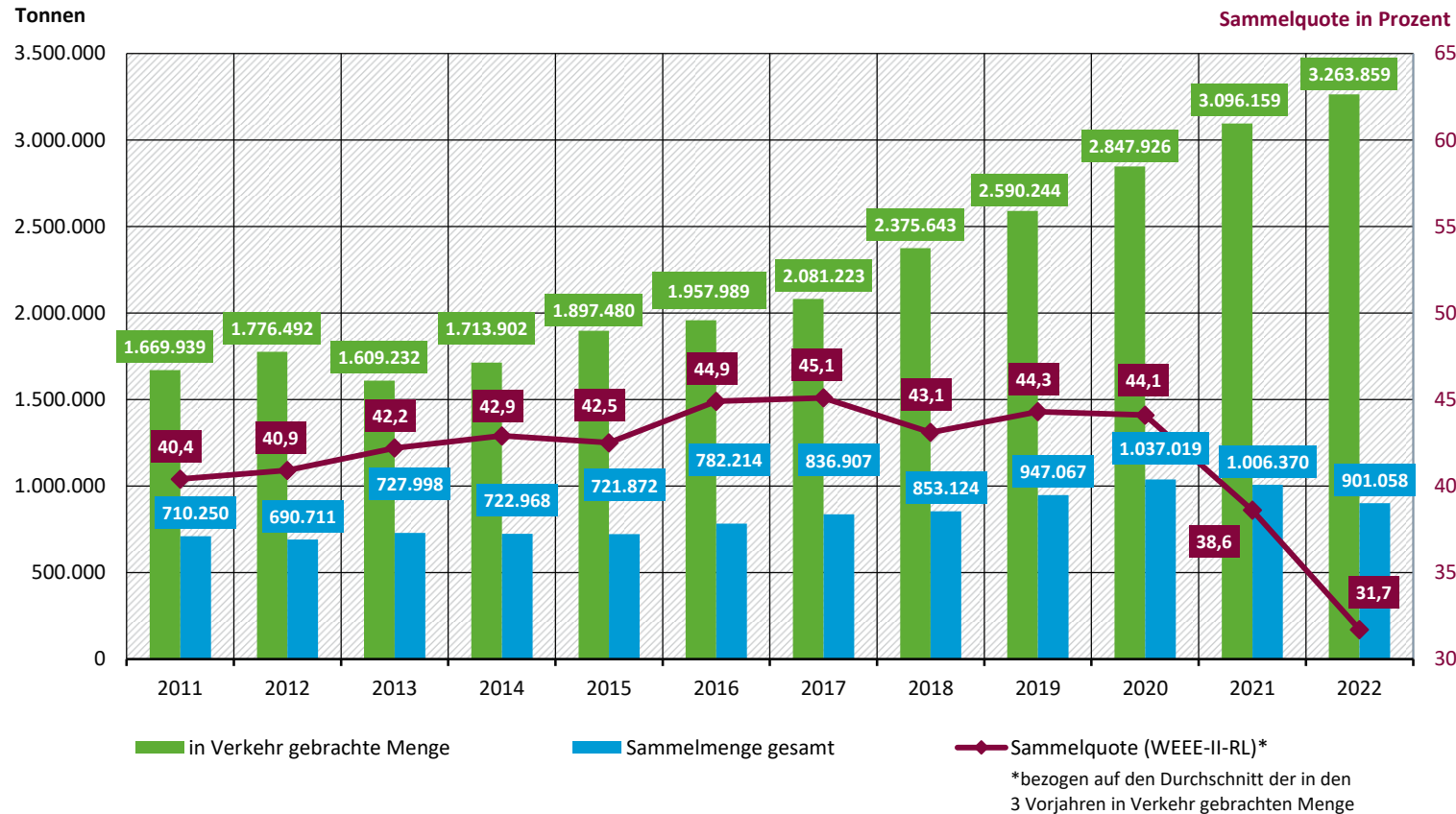
Verpackungsabfälle



Bau- und Abbruchabfälle



Beispiel: Elektro(nik)altgeräte (in D)



In Verkehr gebrachte Mengen, Sammelmengen und -quoten
bei Elektro(alt)geräten in Deutschland^[3]

$$\frac{\text{Altgeräte}_{\text{gesammelt}}}{\text{Ø Geräte}_{\text{in Verkehr gebracht}}} = \geq 65 \%$$

Sammelquote^[1]
für Elektro(nik)altgeräte seit 2019 (vereinfacht)

$$\frac{\text{Altgeräte}_{\text{verwertet}}}{\text{Geräte}_{\text{gesammelt}}} = 75 \dots 85 \%$$

Verwertungsquote^[1]
für Elektro(nik)altgeräte (vereinfacht)
umfasst Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling,
sonstige Verwertung

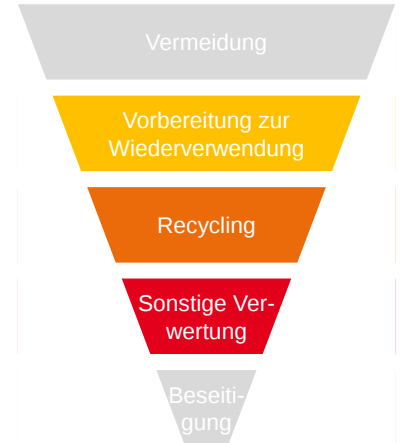
$$\frac{\text{Altgeräte}_{\text{recycelt \& wiederverw.}}}{\text{Geräte}_{\text{gesammelt}}} = 55 \dots 80 \%$$

Quote für Recycling und Wiederverwendung^[1]
für Elektro(nik)altgeräte (vereinfacht)

Sammel-/ Verwertungs-/ Recyclingquoten Kritik

- Verwertungs- vs. Recyclingquote ?!
 - ✗ *Teils unklare Abgrenzung*
- Rein massebezogen
 - ✗ *Recycling wichtiger Materialien oft irrelevant (z. B. CRM*)*
- Sammlung ohne Recycling | Rezyklate ohne Markt?
 - ✗ *Push-Ansatz ohne Marktintegration*
 - ✗ *„Downcycling“ / „Upcycling“ ?!*

*CRM: versorgungskritische Metalle (engl. Critical Raw Materials)



Verwertung
in der Abfallhierarchie



PV-Module



Exportierter E-Schrott



Textilien
aus Kunststoffabfällen

Arten von Quoten (II)

- **Material-/ Elementspezifische Recyclingquoten**

- Jüngste Verwendungsart
 - Derzeit nur in Batterieverordnung^[6]
- Spezifische quantitative Vorgaben zur Rückgewinnung einzelner Materialien
- Steigerung festgelegt (für Batterien)
 - ab 2027: 50 % Li | 90 % Co, Cu, Pb, Ni
 - ab 2031: 80 % Li | 95 % Co, Cu, Pb, Ni

$$\frac{Li_{recyclt}}{Li_{in LIB}} = \geq 50 \%^2$$

Elementspezifische Recyclingquote^[4]
für Lithium aus Lithium-Ionen-Batterien ab 2027



Lithium-Ionen-Batterie

Material-/ Elementspezifische Recyclingquoten

Kritik

- Schlupfloch der klassischen RC-Quote wird geschlossen
 - ✓ *F&E-Anstrengungen werden ausgelöst*
 - ✓ *Erstmaliges Recycling einzelner Materialien (z. B. CRM)*
- Ausschleusung von Schadstoffen möglich
 - 👍 *Ausschluss von Cd, Hg & Co. aus dem Kreislauf*
- Ausweitung auf Eigenschaftsrohstoffe möglich
 - 👍 *RC-Zement (hydraulische Aktivität)*
- Sammlung ohne Recycling | Rezyklate ohne Markt?
 - ✗ *„Phosphorhalden“*



„Rückgewinnung“
von Schwermetallen



PV-Module



Portland-Zement



Phosphorrückgewinnung
aus Klärschlamm

Arten von Quoten (III)

• Rezyklateinsatz-/ Substitutionsquoten

- Materialspezifische Vorgaben zum Einsatz von Sekundärrohstoffen in der Produktion
 - Eingriff in Produktionsprozesse
- Verwendung bei PET-Flaschen^[5]
 - seit 2025: mind. 25 % PET-Rezyklat
 - ab 2030: mind. 30 % PET-Rezyklat
- Verwendung bei Batterien^[4]
 - ab 08.2031: 6 % Li, 6 % Ni, 16 % Co, 85 % Pb
 - ab 08.2036: 12 % Li, 15 % Ni, 26 % Co
- Umsetzung im Critical Raw Materials Act^[6]
 - ab 2030: mind. 25 % des jährlichen CRM-Verbrauchs

$$\frac{PET_{\text{sekundär}}}{PET_{\text{gesamt}}} = \geq 25 \%^3$$

Substitutionsquote^[5]

für PET-Rezyklat in PET-Flaschen seit 2025



PET-Flaschen



Lithium-Ionen-Batterie



Strategische Rohstoffe (CRM)

Rezyklateinsatz-/ Substitutionsquoten Kritik

- Pull-Effekt auf Rezyklate
 - ✓ 2 Rohstoffpreise: Sekundär > Primär
 - ✓ Design for Recycling
 - ✓ Recyclingorientierte Geschäftsmodelle
 - ✓ F&E-Anstrengungen
 - ✓ Landfill-Mining und Re-Importe von Abfällen
- Beachtung des rechtlichen und technischen Rahmens
 - ! Einhaltung maximaler Schadstofflevel
 - ! Sicherstellung von Sekundärrohstoffen



Nachfrage nach Rezyklaten



Neue Geschäftsmodelle
Pay-per-Use, Rent vs. Buy, ...



Chemisch-analytischer Fingerprint
und Zertifizierungen



Design for Recycling



Landfill-Mining

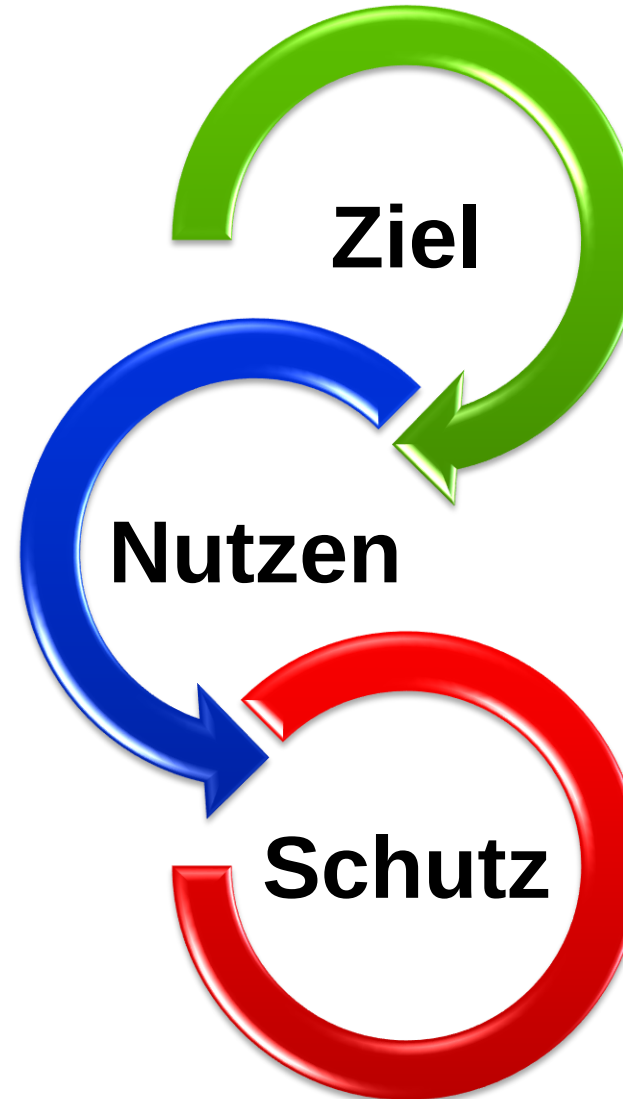
Allgemeine Kritik

Quoten können kein Ziel sein!

Sie sind eine Maßnahme (*von vielen*)
zum Erreichen von Zielen

Quoten müssen übergeordneten Zielen dienen

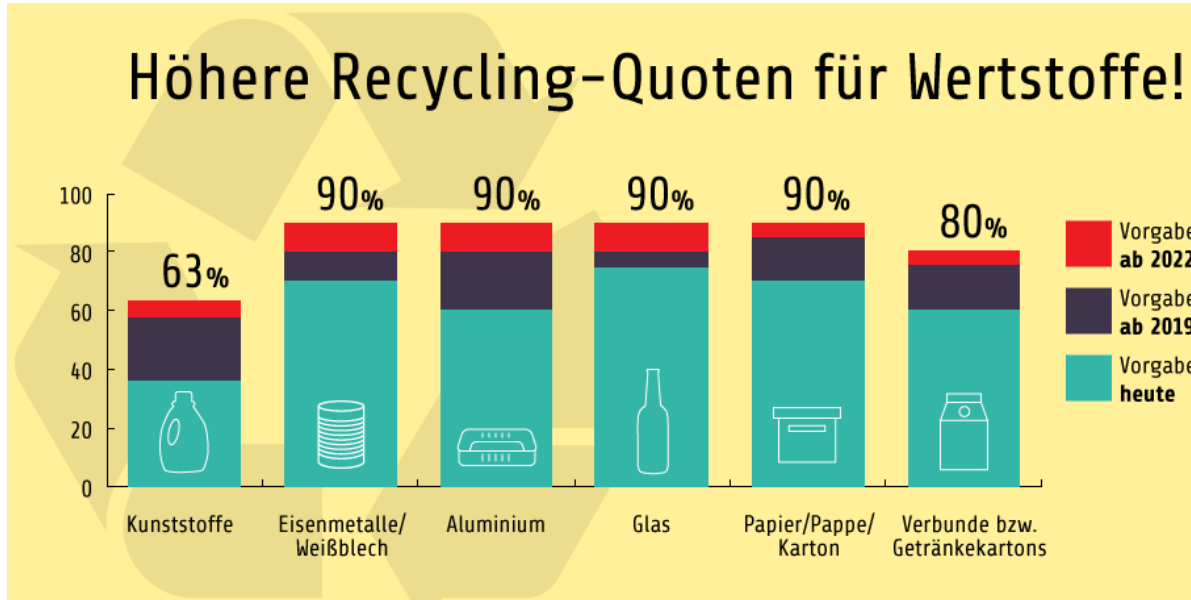
Sie dürfen keine Kreislaufführung von
Schadstoffen bedingen



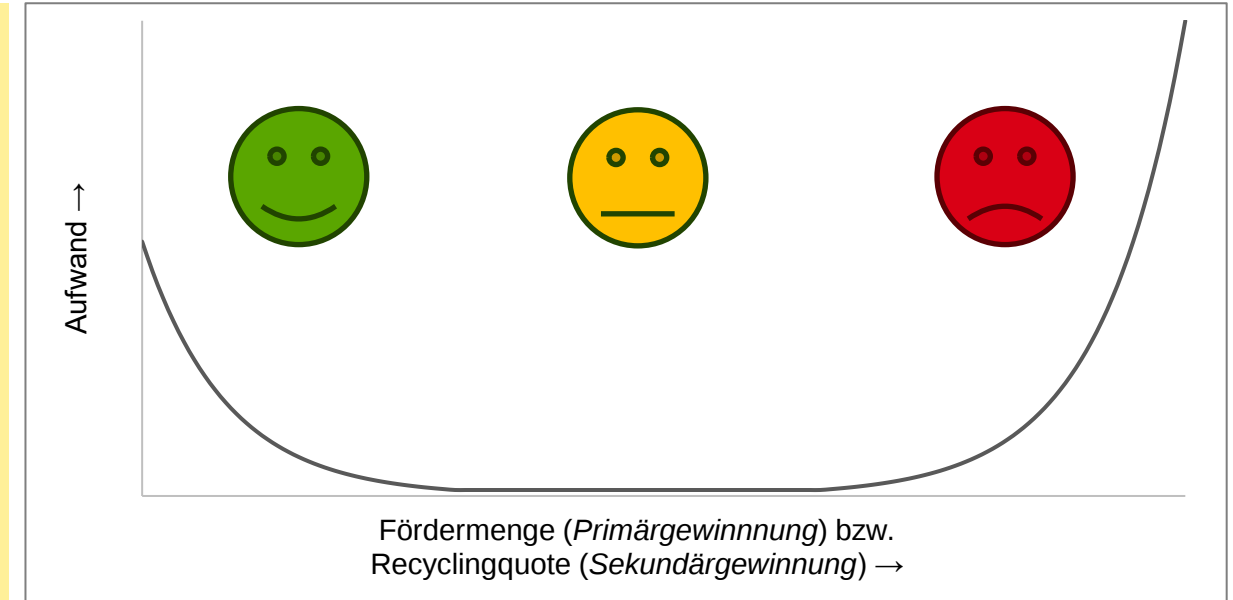
Quoten müssen erreichbar sein
Sie müssen einen volkswirtschaftlichen
Nutzen haben

Allgemeine Kritik

- *Müssen Quoten immer steigen?*



Banner des BMUV zu RC-Quoten für Verpackungen (DE)

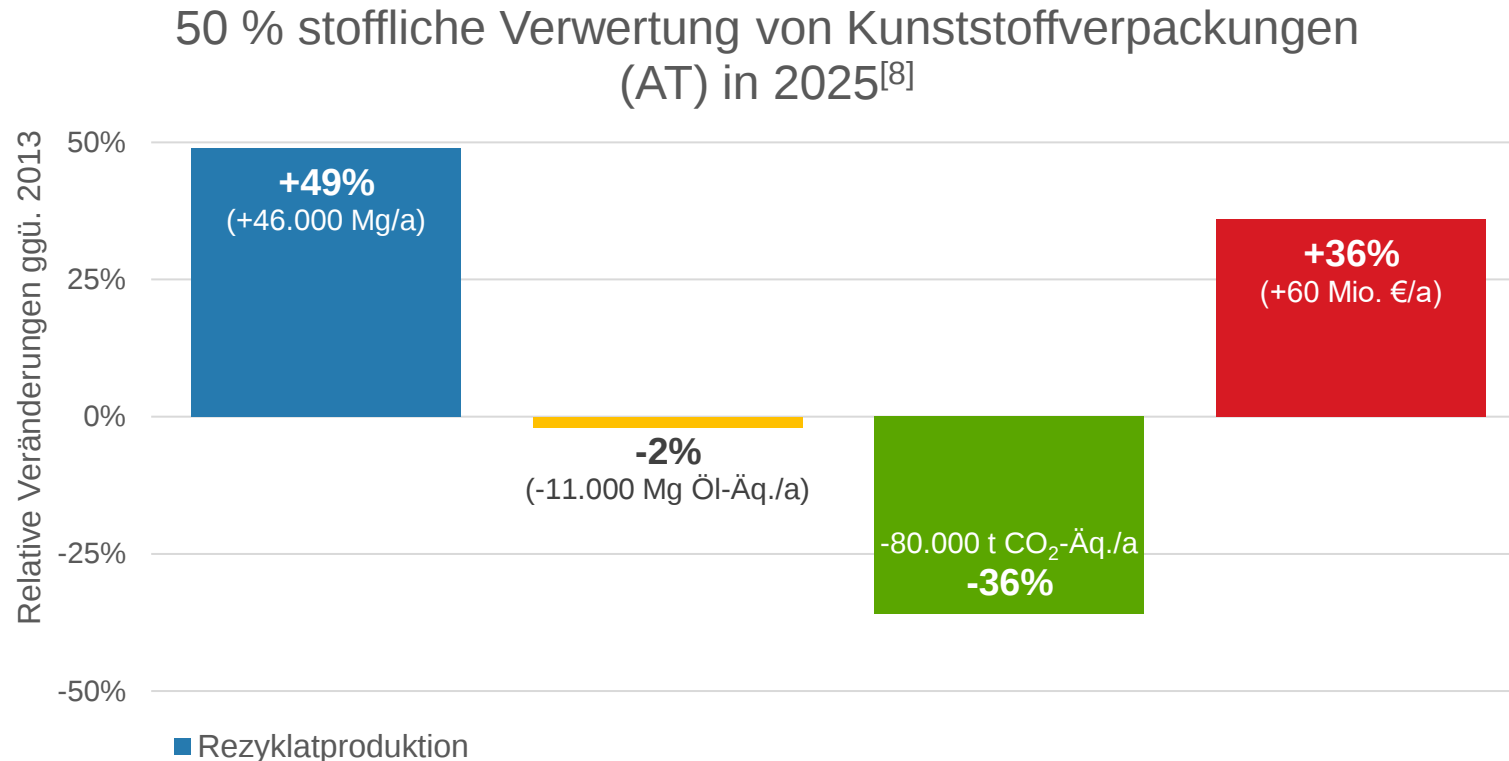


Badewannenkurve (adaptiert)^[7]

➤ **Die Effizienz (Nutzen / Aufwand) kann kippen!**

Allgemeine Kritik

- Sind Quoten gut für die (Volks-)Wirtschaft?



$$\frac{60 \text{ Mio. €/a}}{80.000 \text{ Mg CO}_2/\text{a}} = 750 \frac{\text{€}}{\text{Mg CO}_2}$$

CO₂-Vermeidungskosten
spezifisch (vgl.: 20...50x über Status Quo)^[8]

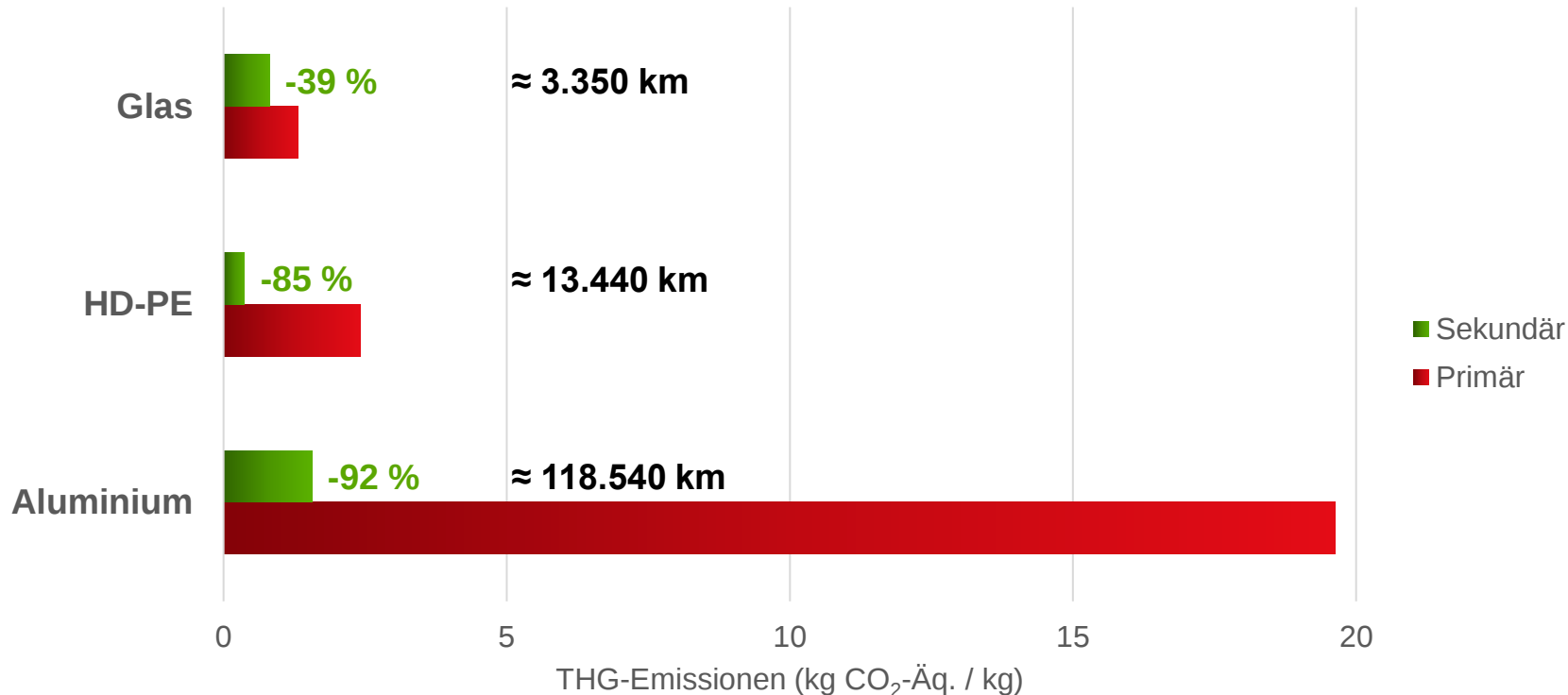
$$\frac{60 \text{ Mio. €/a}}{11.000 \text{ Mg Öl/a}} = 5.455 \frac{\text{€}}{\text{Mg Öl}}$$
$$= 693 \frac{\text{€}}{\text{Barrel Öl}}$$

Vergleichskurs Öl-Äquivalent
spezifisch (vgl.: x10 über Status Quo)^[8]

➤ **Quoten können (zu) teuer sein!**

Allgemeine Kritik

- *Quoten über Quoten!*



- Macht es Sinn möglichst viel Glas zu recyceln?
 - Sollte der Fokus evtl. auf „kritischeren“ Materialien liegen?
- Sollten wir Glas nicht besser mehrfach verwenden?
 - Mehrwegpflicht statt Recyclingquote?
- *Je geringer der Unterschied zwischen Primär- und Sekundärgewinnung ist, desto eher lohnen sich alternative Formen!*

➤ ***Quoten sind nur ein Werkzeug von vielen!***

Der Weg zu einer »optimalen« Quote

➤ Allgemein

- Quoten müssen in gesellschaftliche und politische Zielbereiche passen
 - Schutz des Menschen und der Umwelt (inkl. Gefahrenabwehr: „Zero Pollution“)
 - Schutz der natürlichen Ressourcen (v. a. Klimaschutz)
 - Rohstoffsicherung (v. a. CRM)
- Quoten müssen zu spezifischen Abfallströmen passen
 - Art der Quote
 - Zahlenwert(e) der Quote
- Die vorgegebenen Zahlen müssen erreichbar sein
 - u. a. Grenzen der Thermodynamik beachten („Zero Waste“)



Abb.: globalmagazin.com; pexels.com; valori.it;
pikist.com; freebie.photography

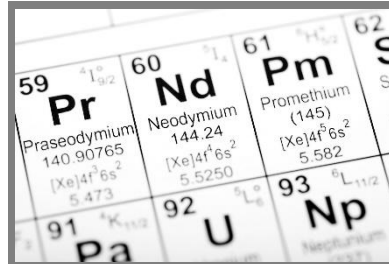
Der Weg zu einer »optimalen« Quote

1) Wahl von **Indikatoren** für die Zielerreichung

- Es können mehrere, unter Umständen konkurrierende Zielsetzungen verfolgt werden
- Auswahl eines Indikators oder Priorisierung bei mehreren Indikatoren
 - Politische Entscheidung (Transparenz & Sachlichkeit)
 - Empfohlene Methode: Life Cycle Assessment (LCA)



Kunststoffe



Critical Raw Materials



Mineral. Baustoffe



Treibhauspotenzial



Verfügbarkeit &
Vulnerabilität



Flächen &
Ökosysteme

Der Weg zu einer »optimalen« Quote

2) Konzeptentwicklung einer Quote

a) Qualität: Auswahl der Art der Quote + Definition von Zähler & Nenner

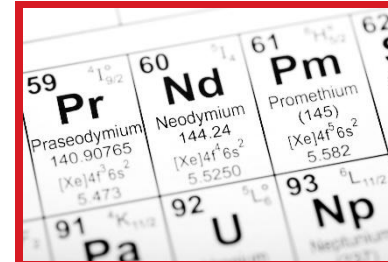


Littering



Sammelquote

- ✓ Fehlwürfe & Produktanhaftungen
- ✓ Länge der Nutzungsphase
- ✓ Importe & Exporte
- ✓ [...]



CRM-Recycling



Substitutionsquote

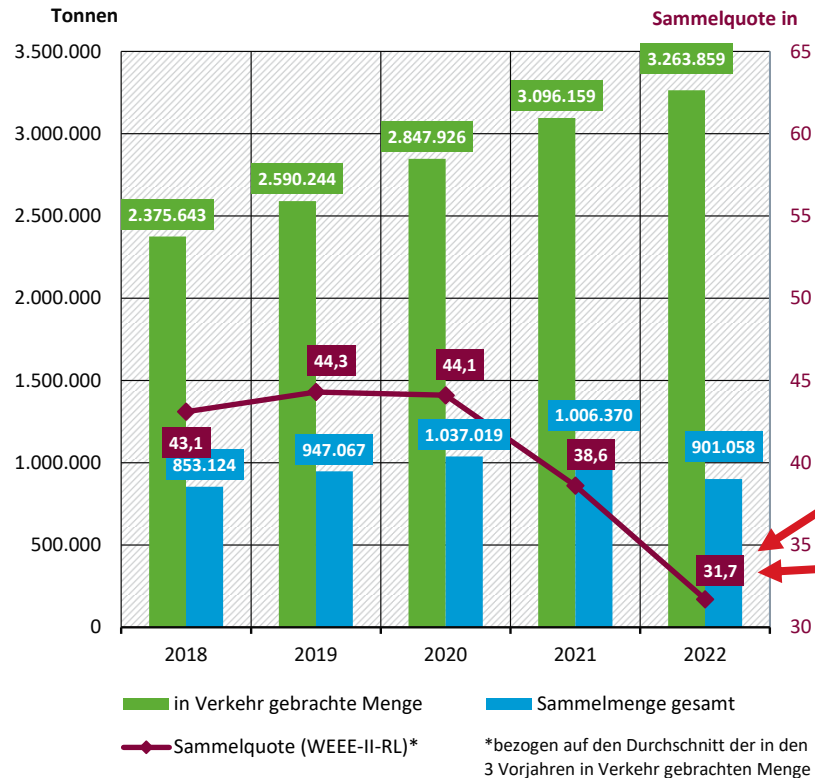
- ✓ (technische) Machbarkeit
- ✓ Analytik & Nachweise
- ✓ Schadstoffakkumulationen
- ✓ [...]

Der Weg zu einer »optimalen« Quote

2) Konzeptentwicklung einer Quote

b. Quantität: Definition des Zielwertes

➤ Empfohlene Methode: Materialflussanalyse (MFA)



Veränderungen unserer Produkte und Nutzungsarten



Abbildung der realen Nutzungsdauer

In Verkehr gebrachte Mengen, Sammelmengen und -quoten bei Elektro(alt)geräten in Deutschland^[3]

[3] UBA 2024

Der Weg zu einer »optimalen« Quote

3) Bilanzierung / **Monitoring** der Zielerreichung

R_O : Optimale Quote

R_G : Gesetzlich festgelegte Quote

$$R_G < R_O$$

Potenzial wird nicht
ausgeschöpft

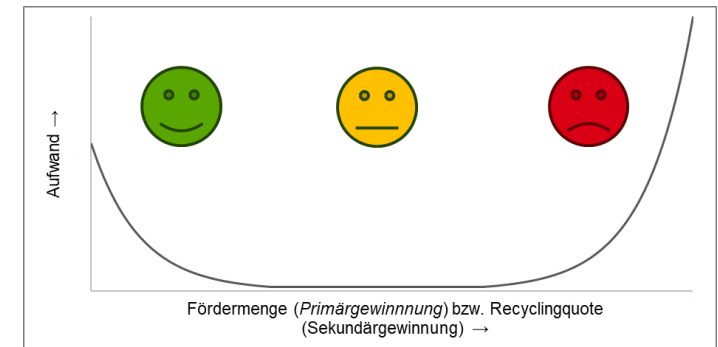


$$R_G \leq R_O$$

Höchst möglicher
(volkswirtschaftlicher)
Nutzen

$$R_G > R_O$$

Ökologische und sozio-
ökonomische bzw. volks-
wirtschaftliche Nachteile



Der Weg zu einer »optimalen« Quote

3) Bilanzierung / **Monitoring** der Zielerreichung

R_O : Optimale Quote

R_G : Gesetzlich festgelegte Quote

$$R_G \leq R_O$$

Höchst möglicher
(volkswirtschaftlicher)
Nutzen



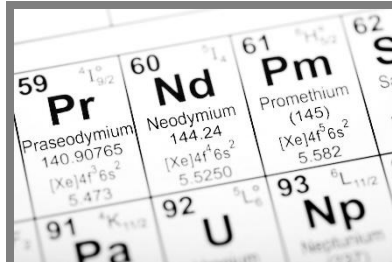
- Abnehmende Produktmassen / steigende -anzahl
- Steigende Komplexität und Materialvielfalt
- (Design for Recycling)



»Moving Target«



- Recyclinganlagen mit weiterentwickelter Technik und neuen Technologien
- Bessere Datenerfassung und -verarbeitung



59 Pr Praseodymium 140.90765 [Xe]4f ³ 6s ² 5.473	60 Nd Neodymium 144.24 [Xe]4f ⁴ 6s ² 5.5250	61 Pm Promethium (145) [Xe]4f ⁵ 6s ² 5.582
91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium

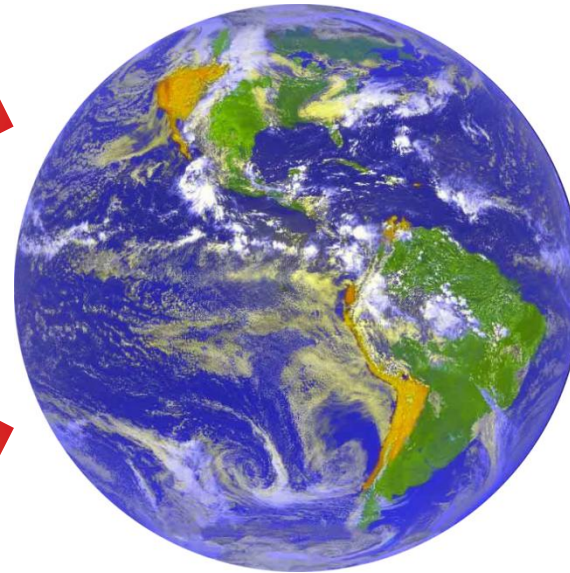
Kritikalität
(CRM*)

- Erstmaliges Recycling von CRM mittels **Substitutionsquoten**



Substituierbarkeit
(Phosphor)

- Rückgewinnung lebenswichtiger Stoffe dank **spezifischer Rückgewinnungsquoten**



Energie
(Aluminium)

- Energieeinsparungen durch **Recyclingquoten** für energieintensive Rohstoffe



Belastungen
(Kunststoffe)

- Schutz von Menschen und Umwelt durch **Sammelquoten** für Kunststoffe

*CRM: versorgungskritische Metalle (engl. Critical Raw Materials)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Prof. Dr. Peter Hense

Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwesen

Lehrgebiet Umwelttechnik, insbesondere Kreislaufwirtschaft und Ressourcenmanagement

Am Hochschulcampus 1 / Raum H3-7

D-44801 Bochum

T: +49 234 32 10 275

M: +49 174 1906740

peter.hense@hs-bochum.de