

PET- und Polyester-Recycling: vom Entsorgungsproblem zur Rohstoffquelle

Stephan Scholl

TU Braunschweig, Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik

Agenda

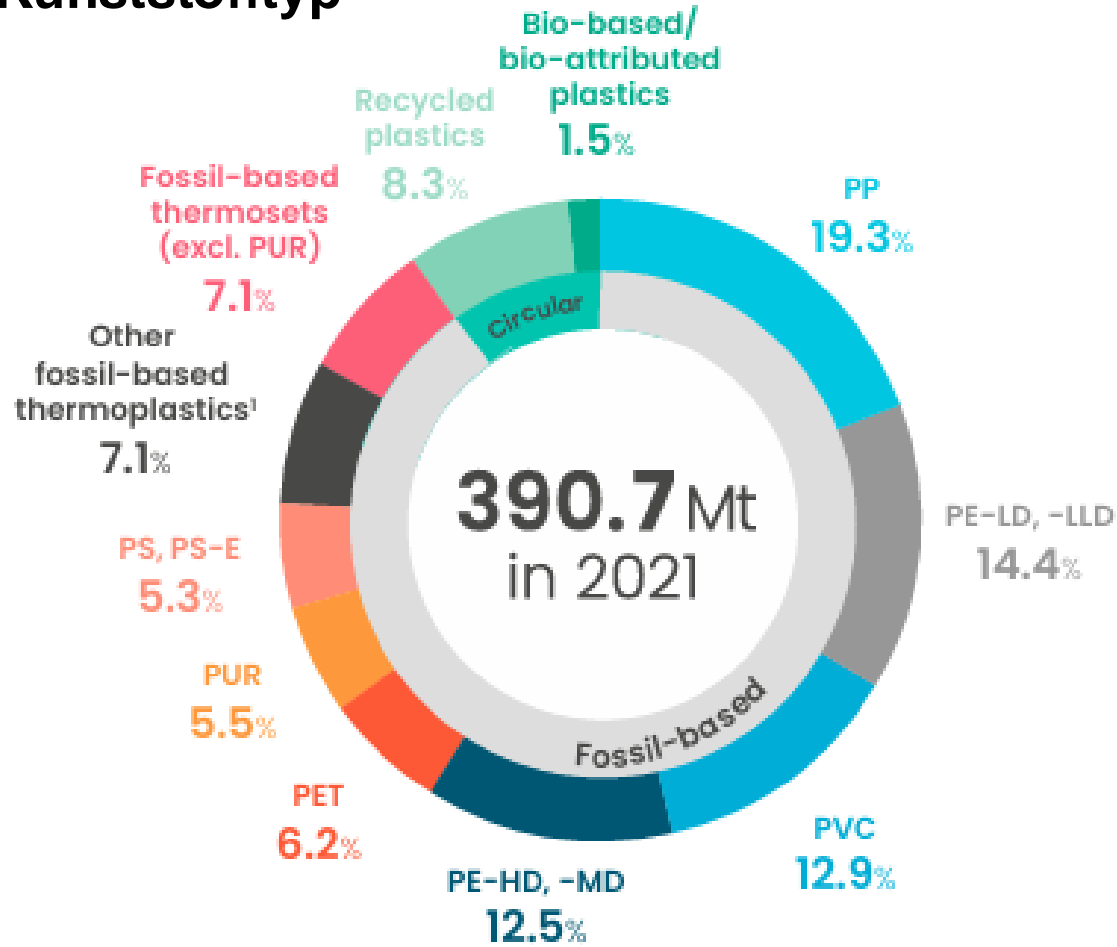
- **Kunststoffe & Kunststoffrecycling heute**
- **Chemisches Recycling am Beispiel PET-Monomerrecycling**
- **Integration in eine zirkuläre Wirtschaft**

Agenda

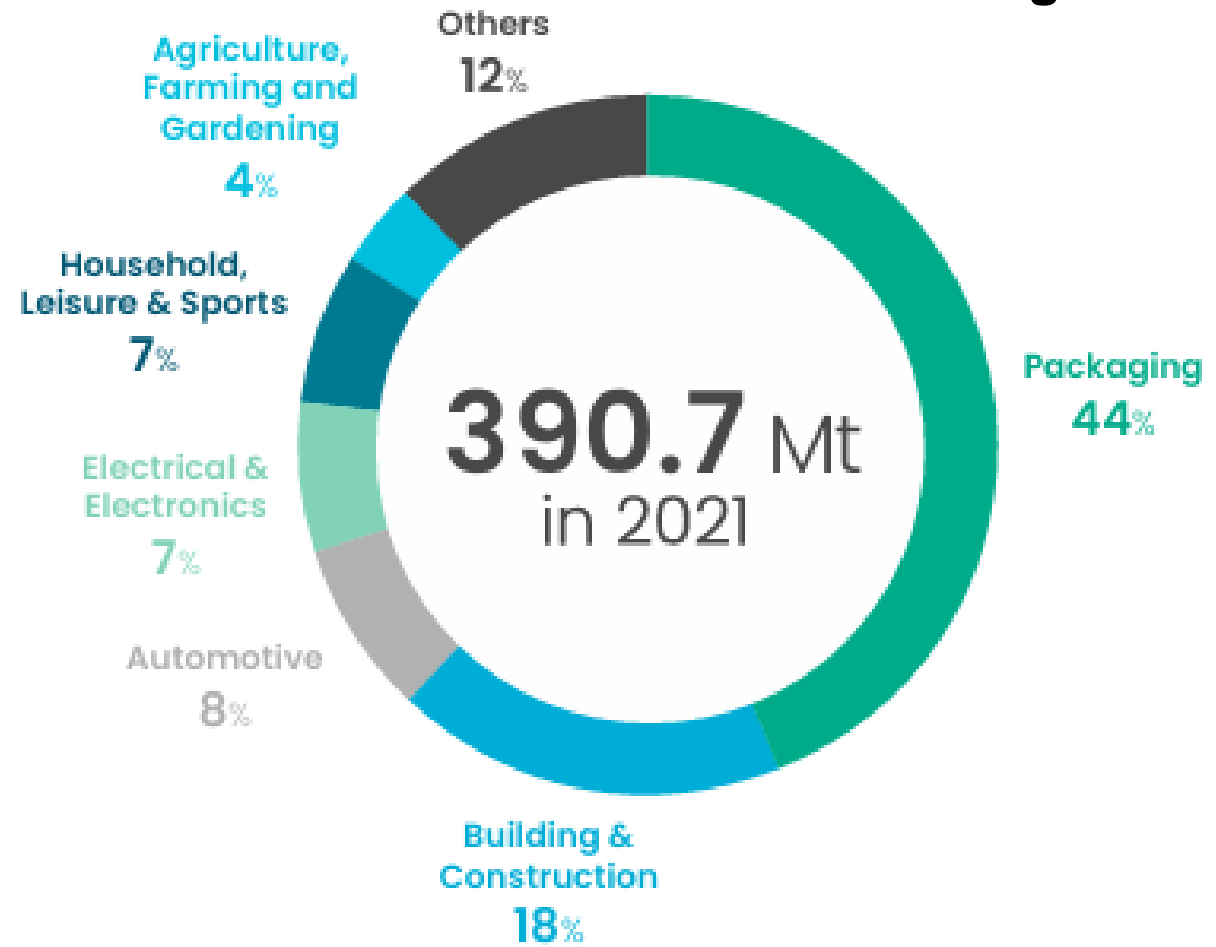
- **Kunststoffe & Kunststoffrecycling heute**
- Chemisches Recycling am Beispiel PET-Monomerrecycling
- Integration in eine zirkuläre Wirtschaft

Kunststoffe: Produktion und Anwendung weltweit

Kunststofftyp

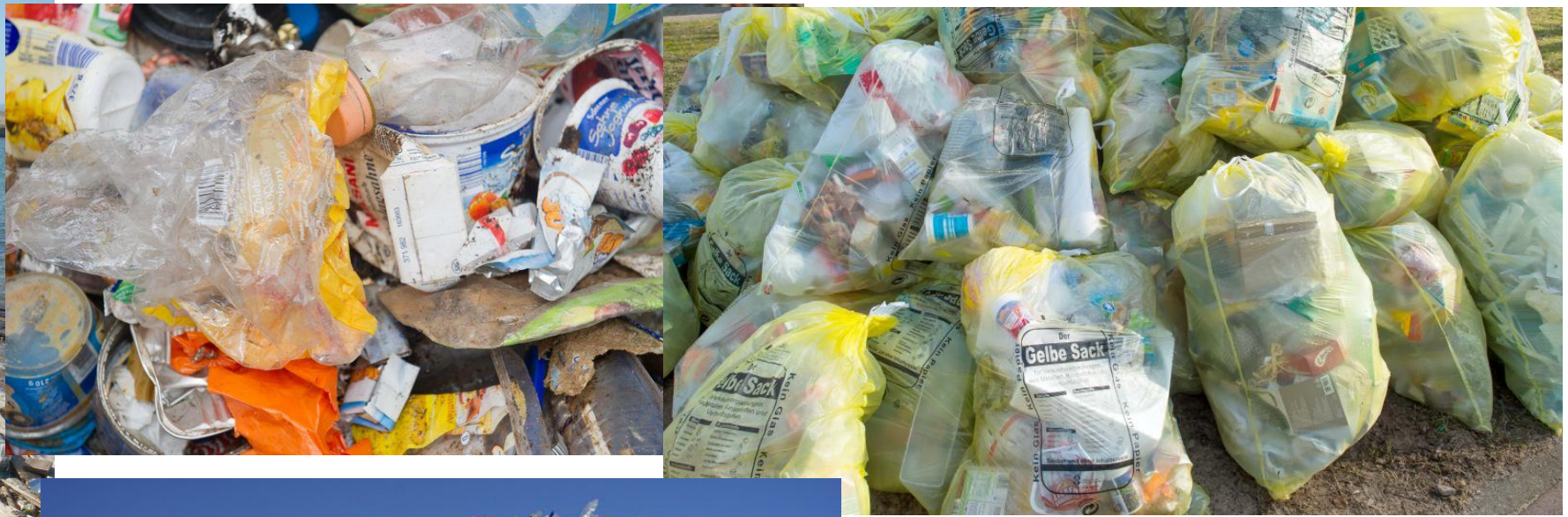


Anwendung



Quelle: Plastics Europe, The Facts 2022

Plastikmüll ist bisher vor allem ein Umweltproblem ...



Unsere Probleme haben wir dem Globalen Süden „vor die Türe gekippt“

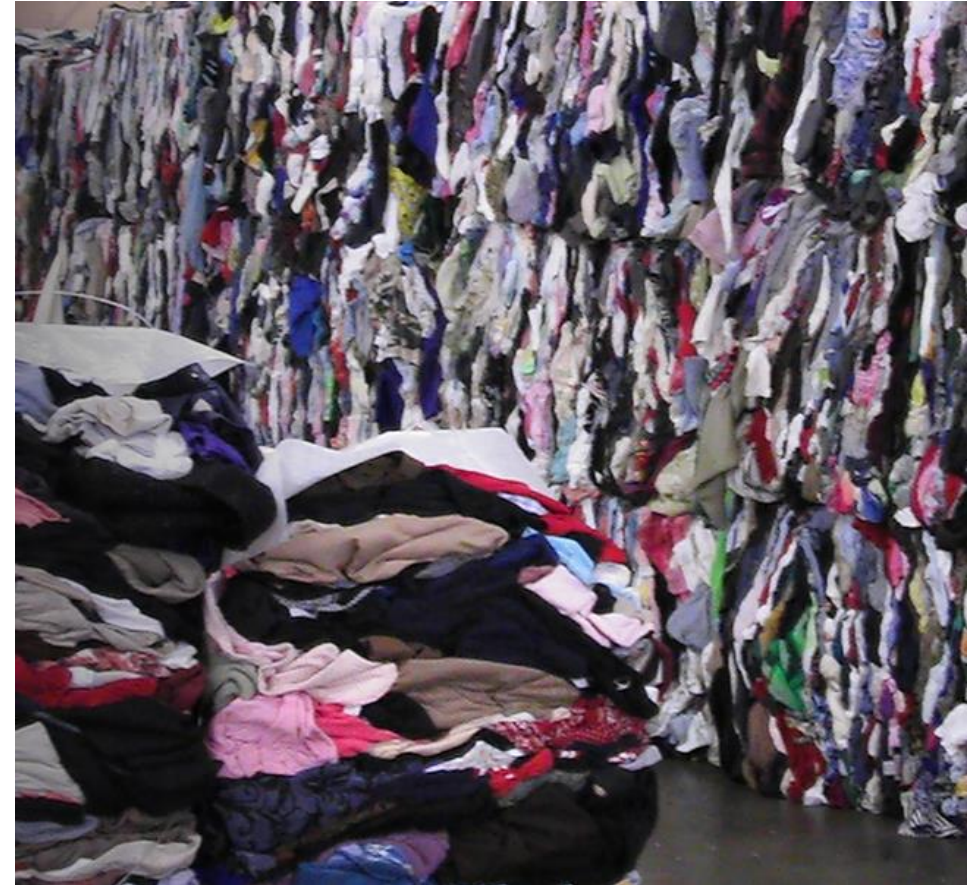


Bisher wird “Plastikmüll” vor allem aus Lebensmittelverpackungen wahrgenommen

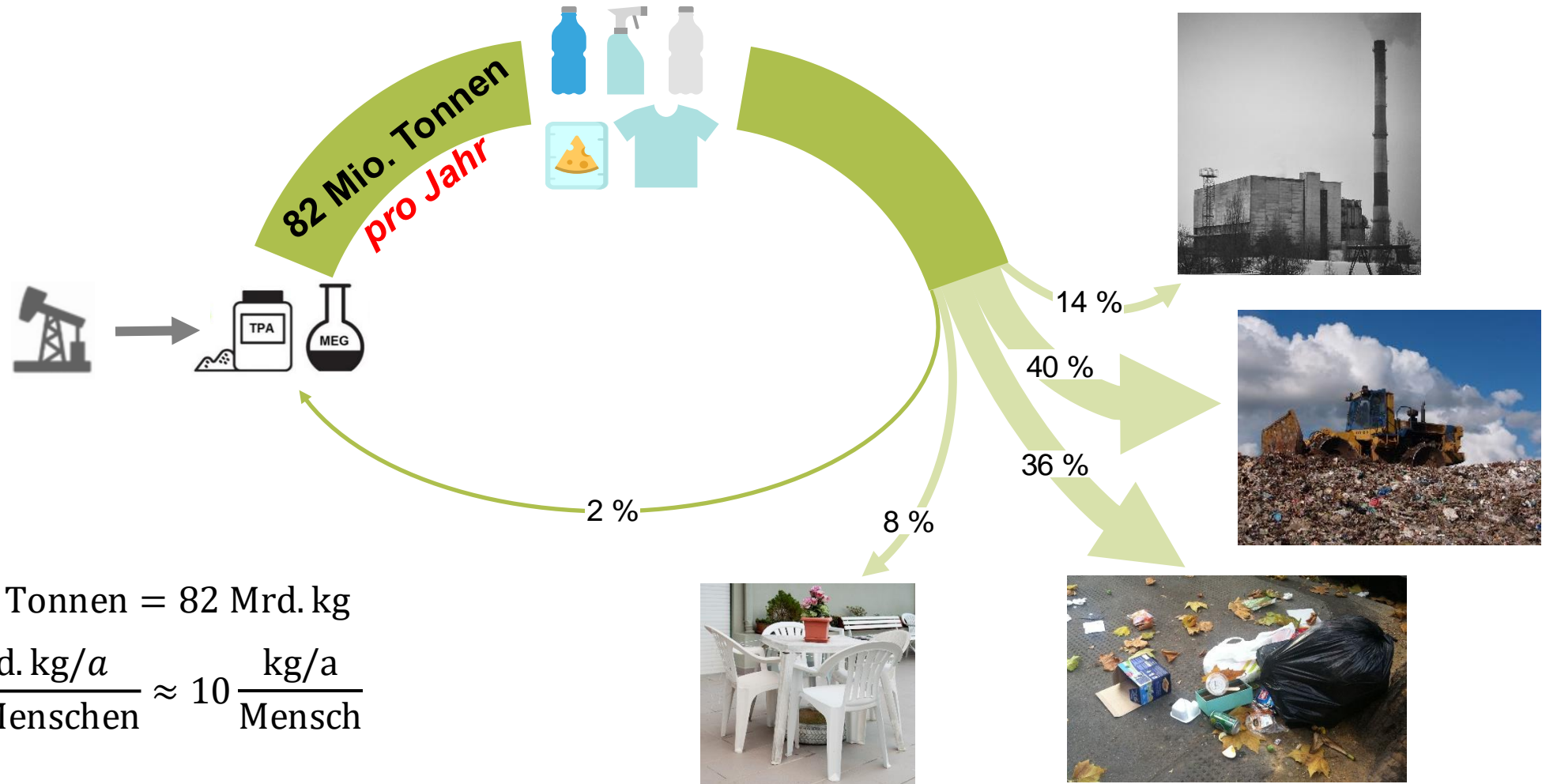
**Lebensmittelverpackungen:
ein großes und präsentés Problem**



**Polyestertextilien:
ein viel größeres Problem**



Weltweite PET-Produktion und ihr (heutiger) Lebensweg

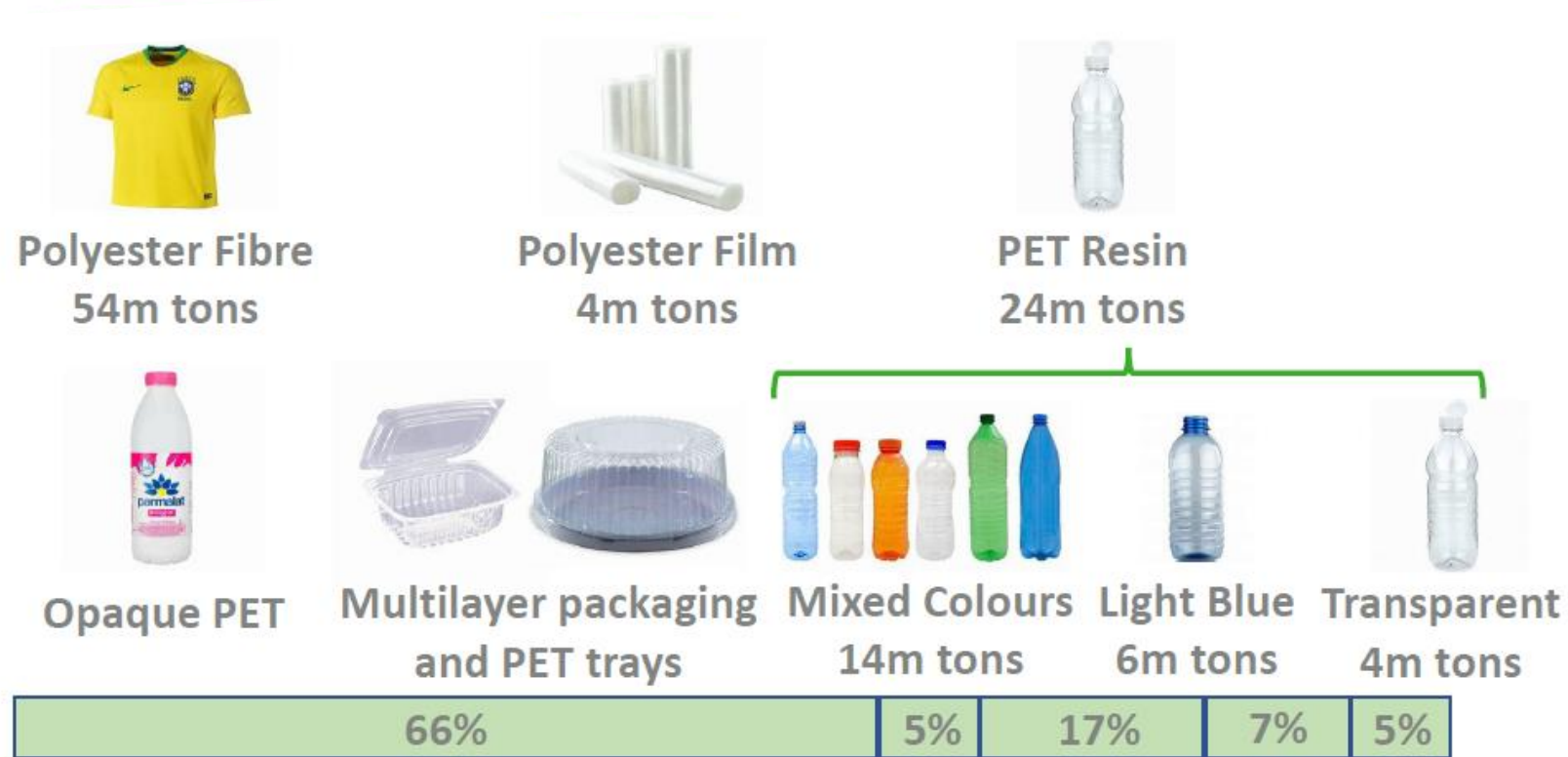


82 Mio. Tonnen = 82 Mrd. kg

$$\frac{82 \text{ Mrd. kg/a}}{8 \text{ Mrd. Menschen}} \approx 10 \frac{\text{kg/a}}{\text{Mensch}}$$

82 Mio t/a Polyester suchen nach einer zirkulären Lösung

- Komplementäre Ansätze



Chemical



REVOLPET[®]

Mechanical



Source numbers: ICIS, 2018

Der Weg des Kunststoffabfalls



Sammeln

Sortieren



**Waschen
Schreddern**



Kunststoffflakes

Verschiedene Recyclingwege konkurrieren um Feedmaterial

Mechanisches Recycling

- ❖ Flasche zu Flasche
- ❖ Flasche zu Textilfaser



Nicht nur Freizeitkleidung ...

- Recycling hat auch die Festmode erreicht



Zirkularität ?

Verschiedene Recyclingwege konkurrieren um Feedmaterial

Mechanisches Recycling

- ❖ Flasche zu Flasche
- ❖ Flasche zu Textilfaser
- ❖ Textilfaser zu Malervlies und Dämmmaterial



Verbrennung (Thermisches Recycling)

- Ersatz von Erdöl und Erdgas
- Abfall beseitigt & Wärme produziert
- Aber: Stoff wird zerstört

Chemisches Recycling

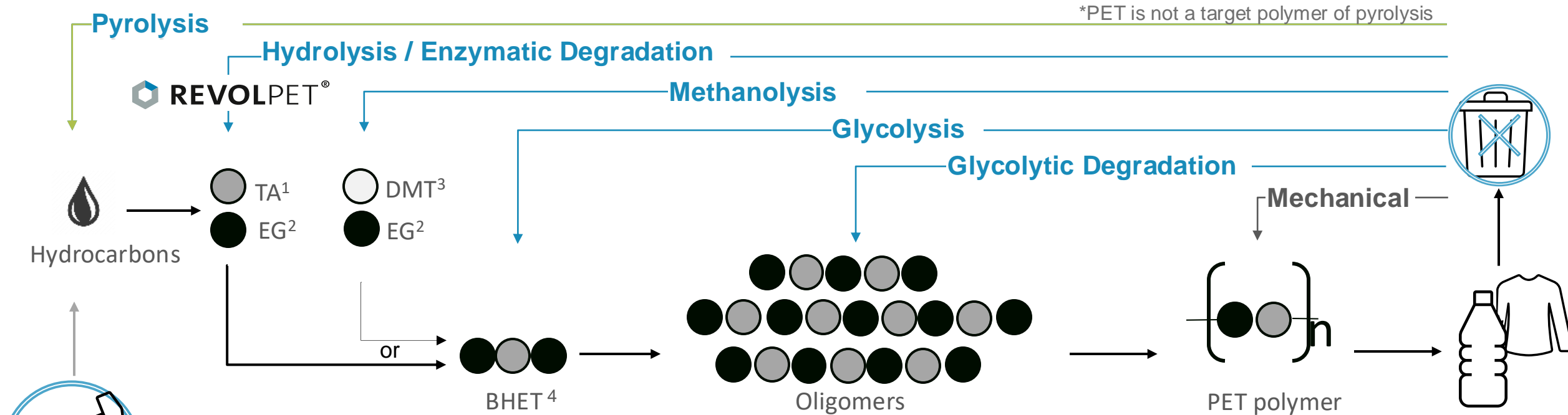


Agenda

- Kunststoffe & Kunststoffrecycling heute
- **Chemisches Recycling am Beispiel PET-Monomerrecycling**
- Integration in eine zirkuläre Wirtschaft

PET-Recycling Pathways

Verschiedene Technologien resultieren in unterschiedlichen Produkten



¹Terephthalic Acid (TA)

²Ethylene Glycol (EG)

³Dimethyl Terephthalate (DMT)

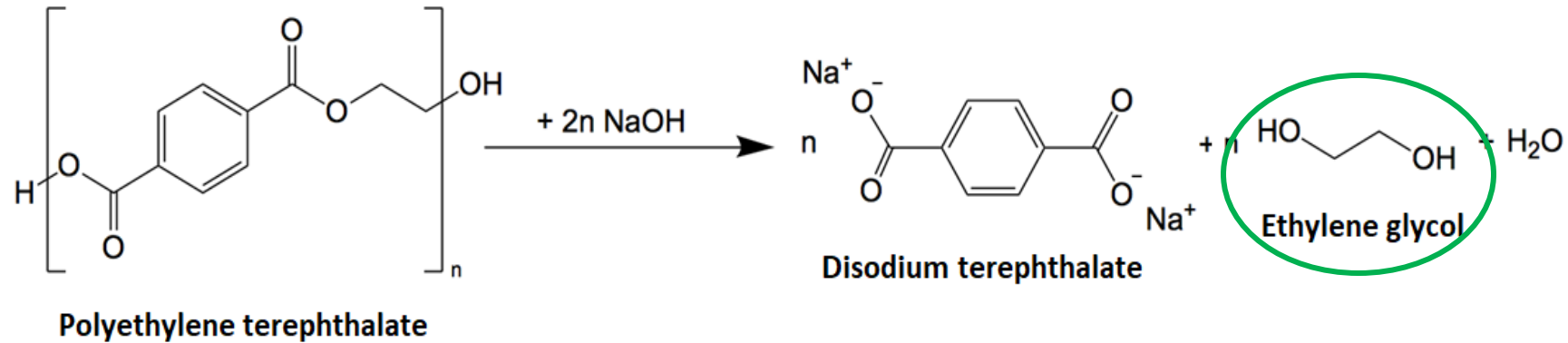
⁴Bis(2-Hydroxyethyl) Terephthalat (BHET)

[2] According to Uetliberg Partners, 2022

Der revolPET® Prozess: Depolymerisation

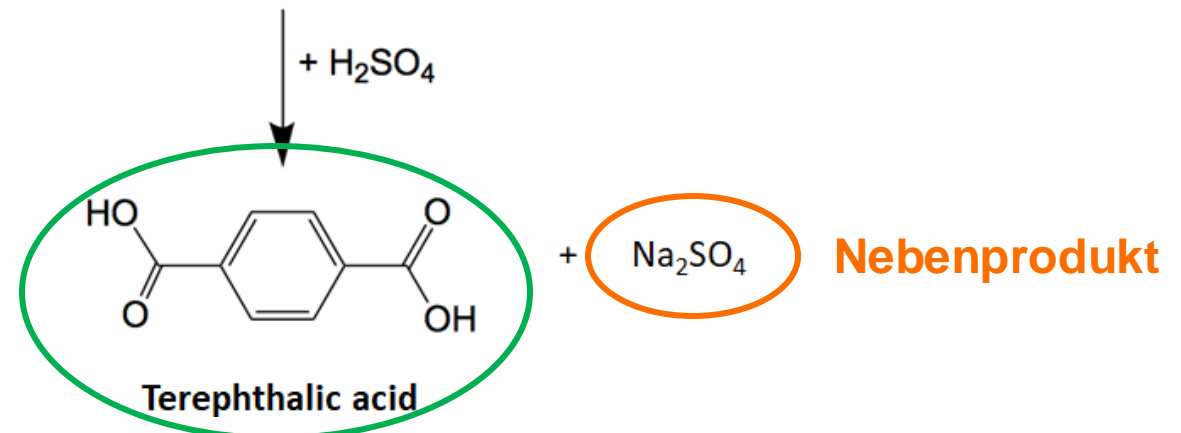
- Die chemische Route zur vollen Zirkularität

Depolymerisation: alkalische Hydrolyse



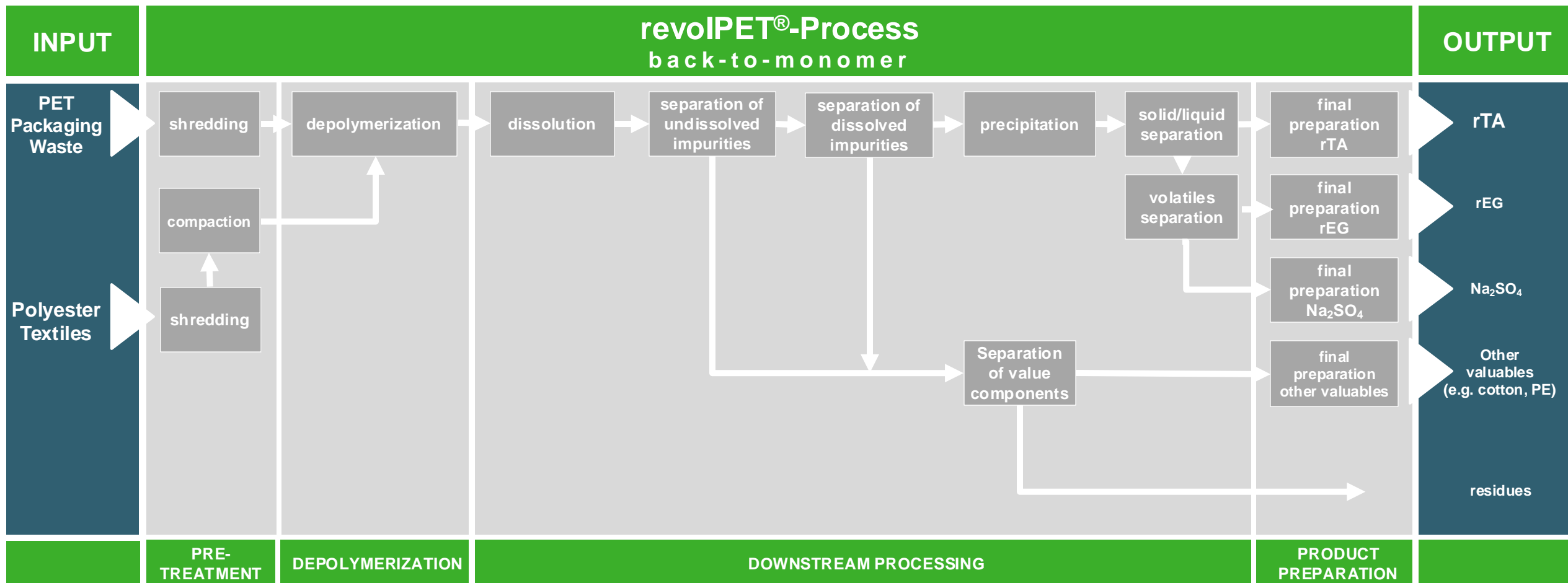
Monomere des PET

Terephthalsäure-Gewinnung: Fällung

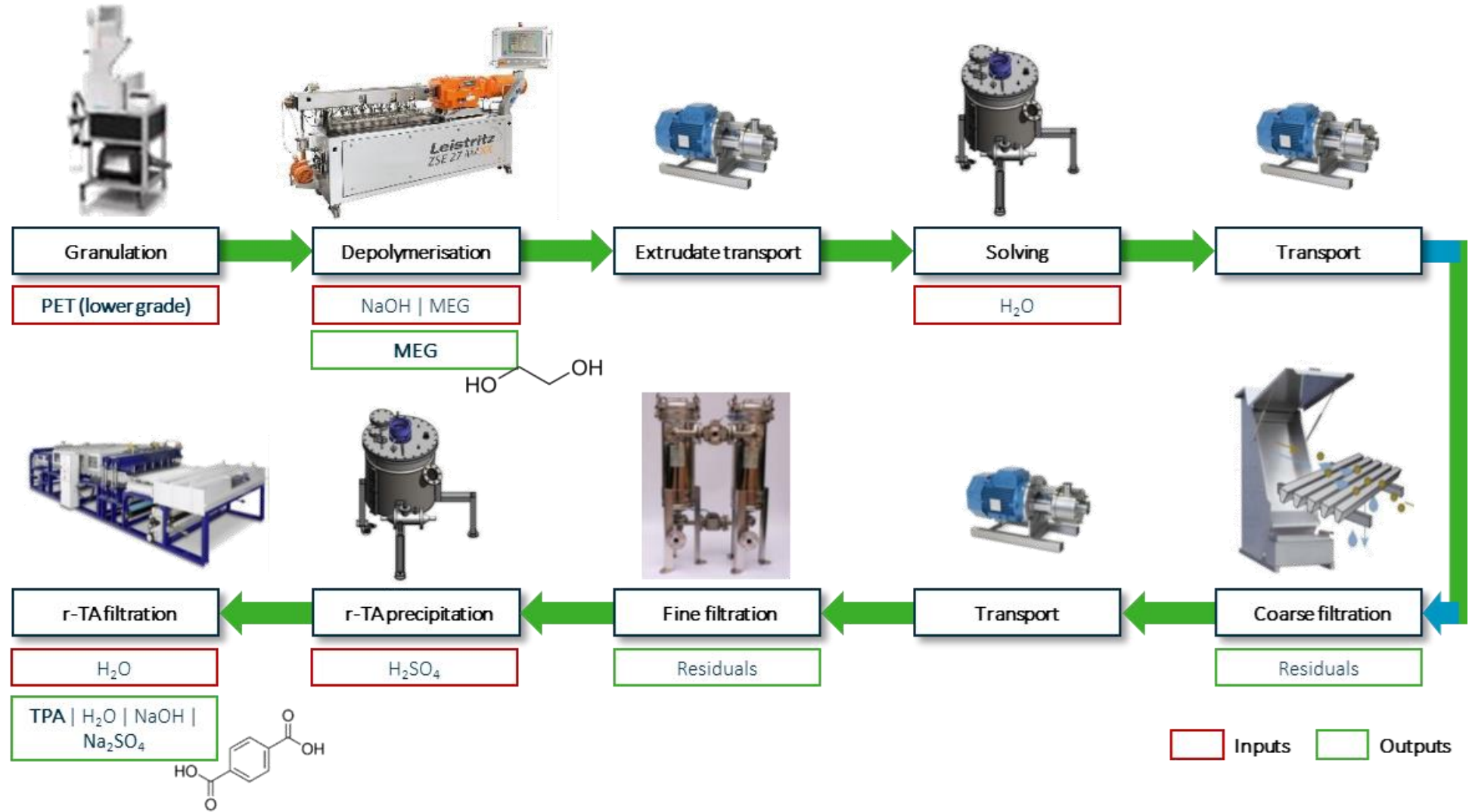


Der revolPET®-Prozess und seine Realisierung in einer Technikumsanlage

- Kontinuierlich, modular, flexibel, bilanzierbar, skalierbar



revolPET® process: Depolymerisation mit nachfolgender Aufarbeitung



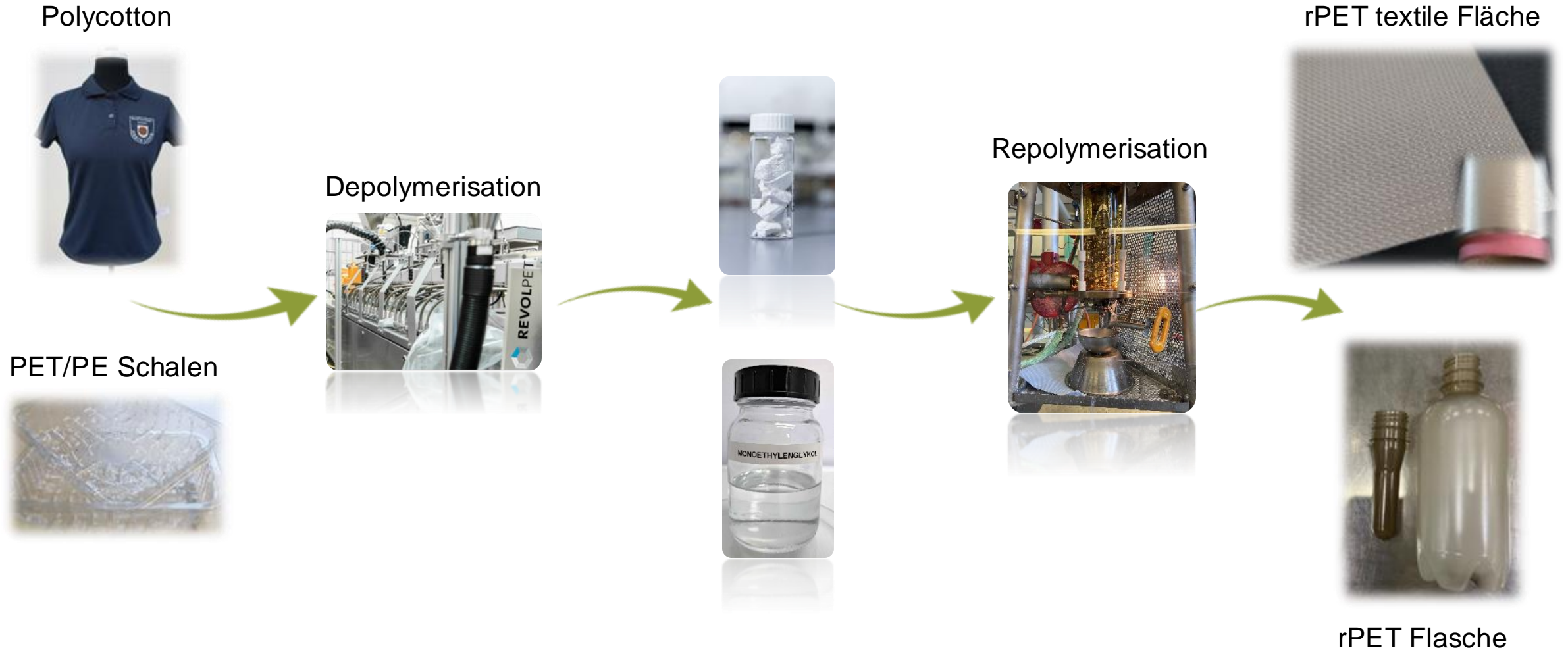
Fa. Rittec Umwelttechnik GmbH: Technikumsanlage in Braunschweig

- Durchsatz ca. 14 – 20 kg/h PET-haltiger Feedstrom



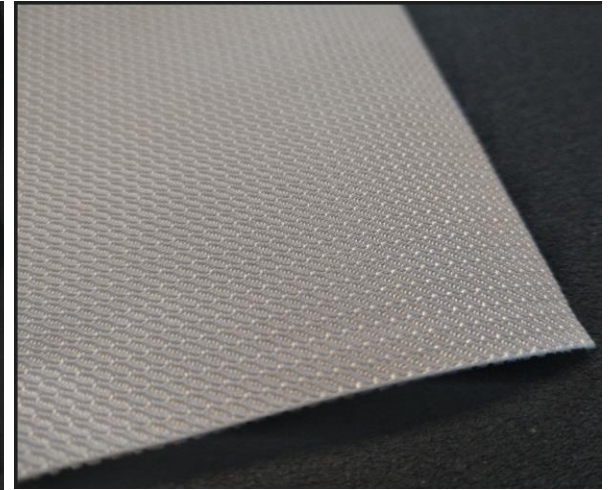
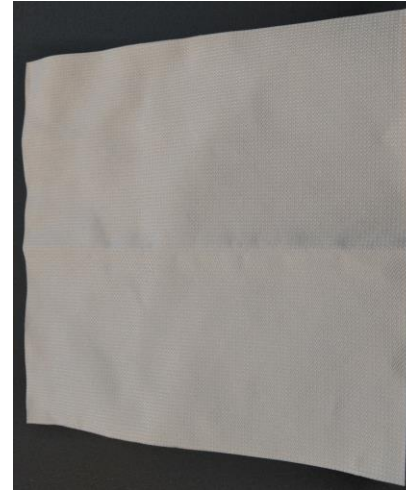
revolPET®: “Drop-in-ready” recycelte Monomere

- Erstes Schließen des Kreislaufs



Neue Produkte aus recycelten Monomeren

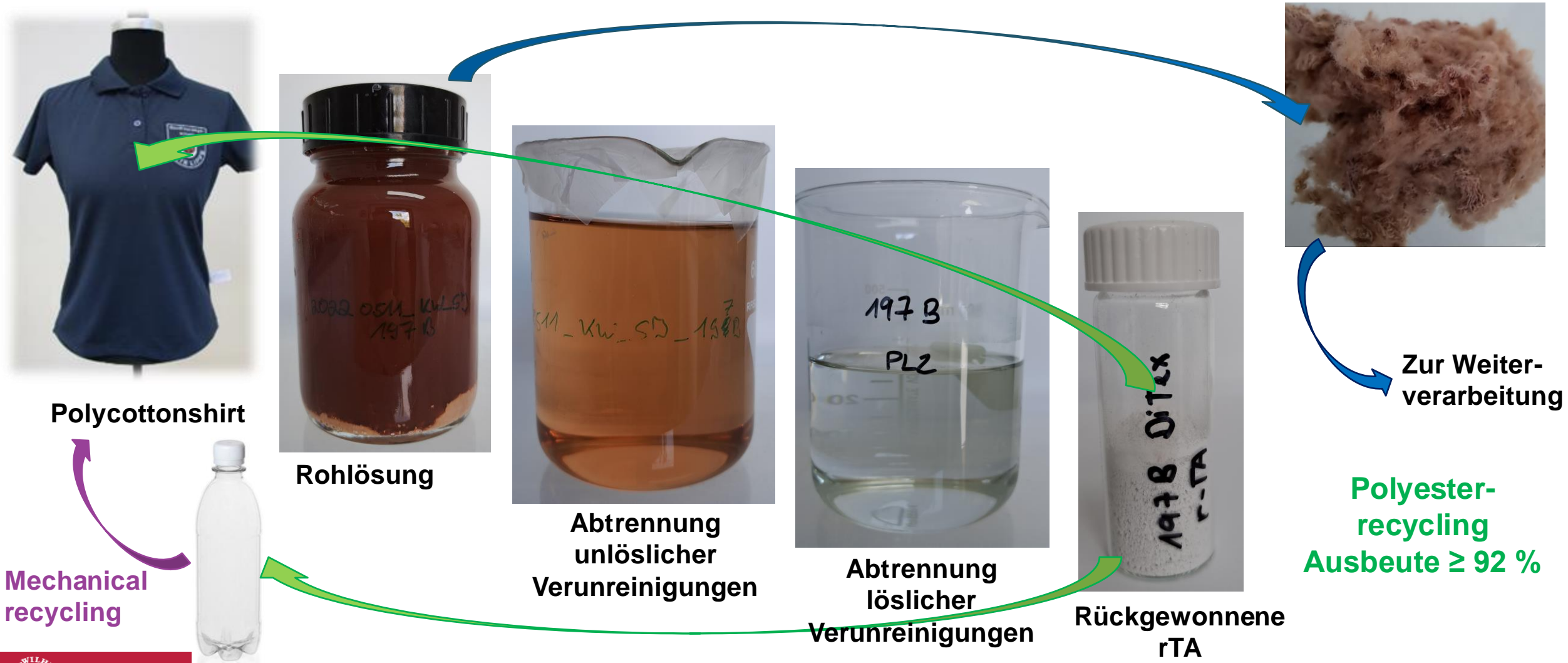
Repolymerisation



Mechanische und physikalische Parameter werden erfüllt

Links: aus fossilen Monomeren;
rechts: aus r-Monomeren
Opaceness wg. zu hoher Natriumsulfatkonzentration in rTA

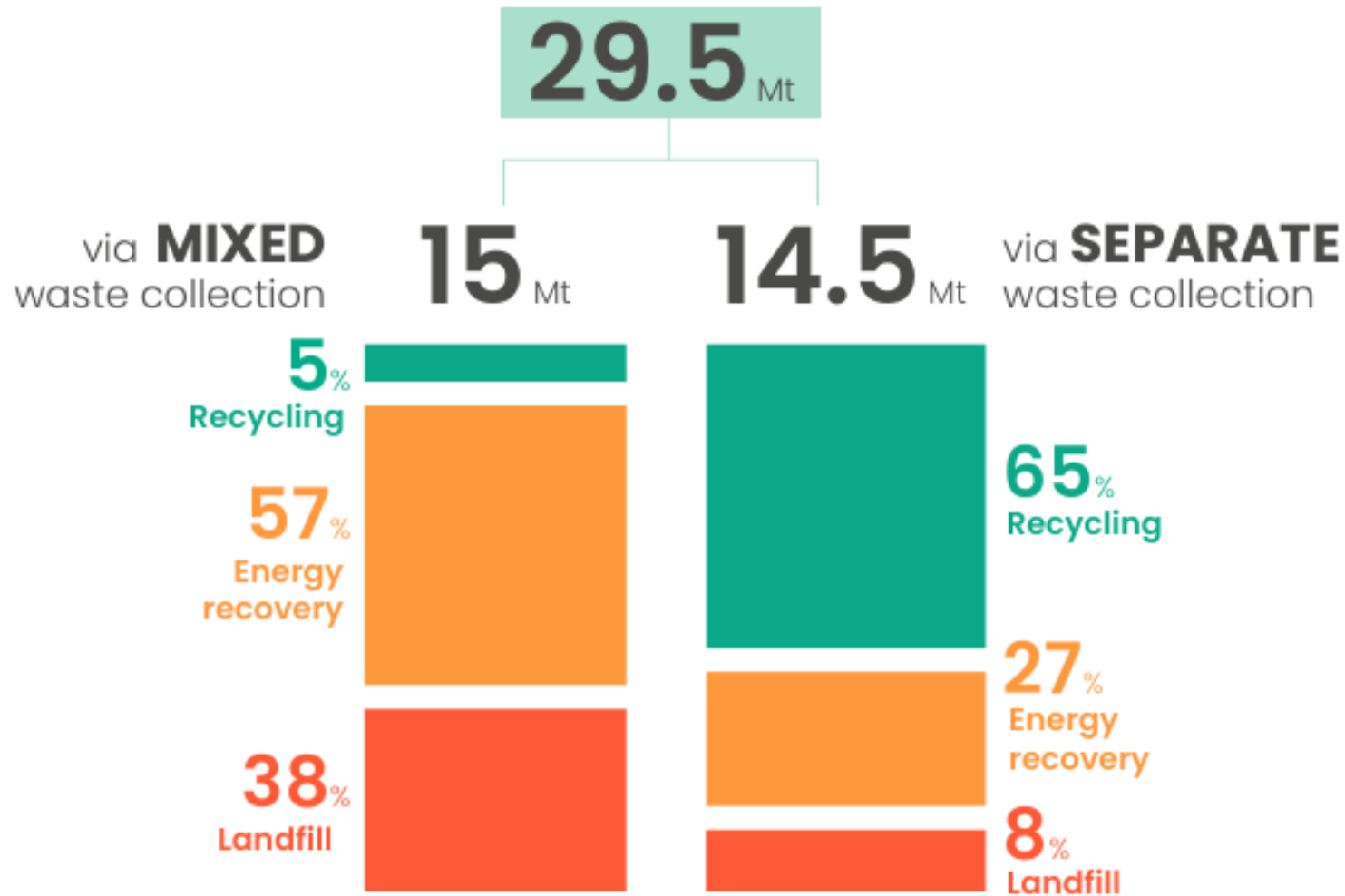
Aus einem Polycottonshirt werden wieder Trinkflaschen - „Upcycling“ dank dem revolPET® back-to-monomer Recycling



Agenda

- Kunststoffe & Kunststoffrecycling heute
- Chemisches Recycling am Beispiel PET-Monomerrecycling
- **Integration in eine zirkuläre Wirtschaft**

Getrennte Sammlung: Schlüssel zu einem stofflichen Recycling



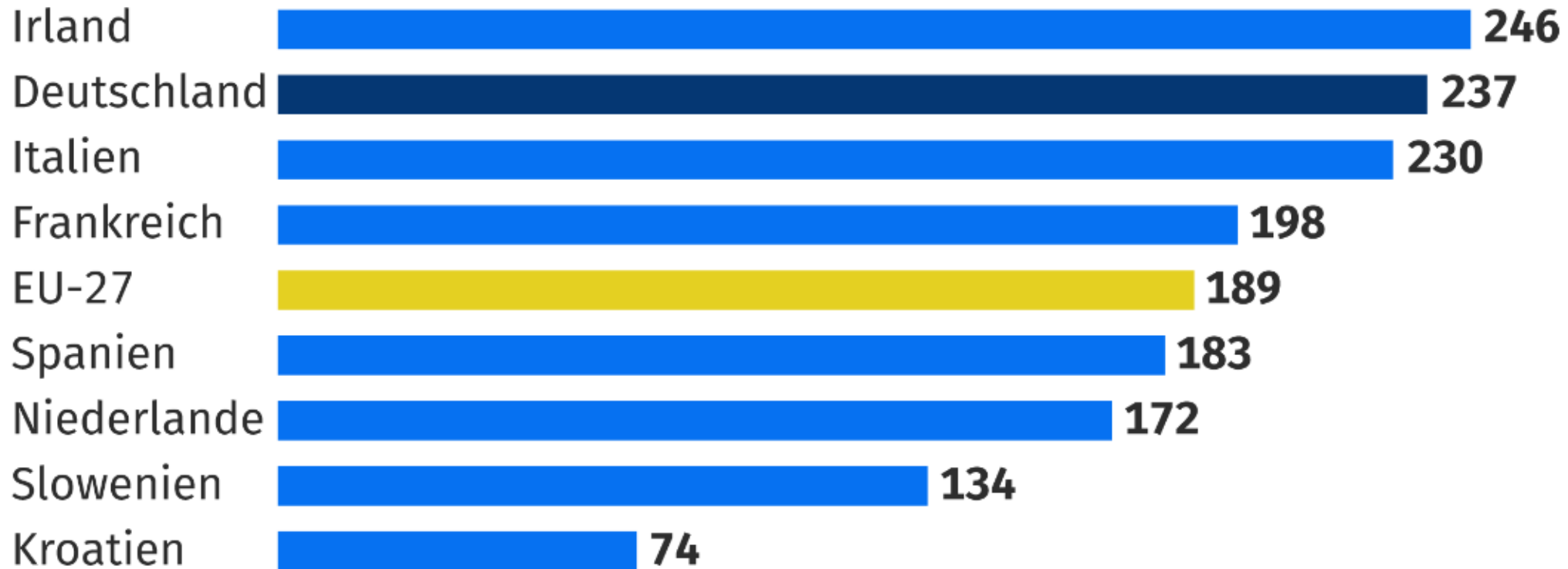
Daten für EU 27 + N/CH/GB

Was heißt das jetzt für eine entsprechende Großanlage?

- Recyclingtechnologie ist verfügbar auf TRL = 4 – 5 für PET aus Verpackungen und Polyester aus Textilien
 - Aktuell: $20 \text{ kg/h} * 1000 \text{ h/a} = 20 \text{ t/a}$ verarbeiteter Feedstrom
 - ↳ Wie groß trauen wir uns bauen im nächsten Schritt?
- Welche Kapazität sollte eine industrielle Großanlage haben?

Verpackungsabfälle 2021

- Ausgewählte EU-Staaten, in kg/(Kopf-Jahr)

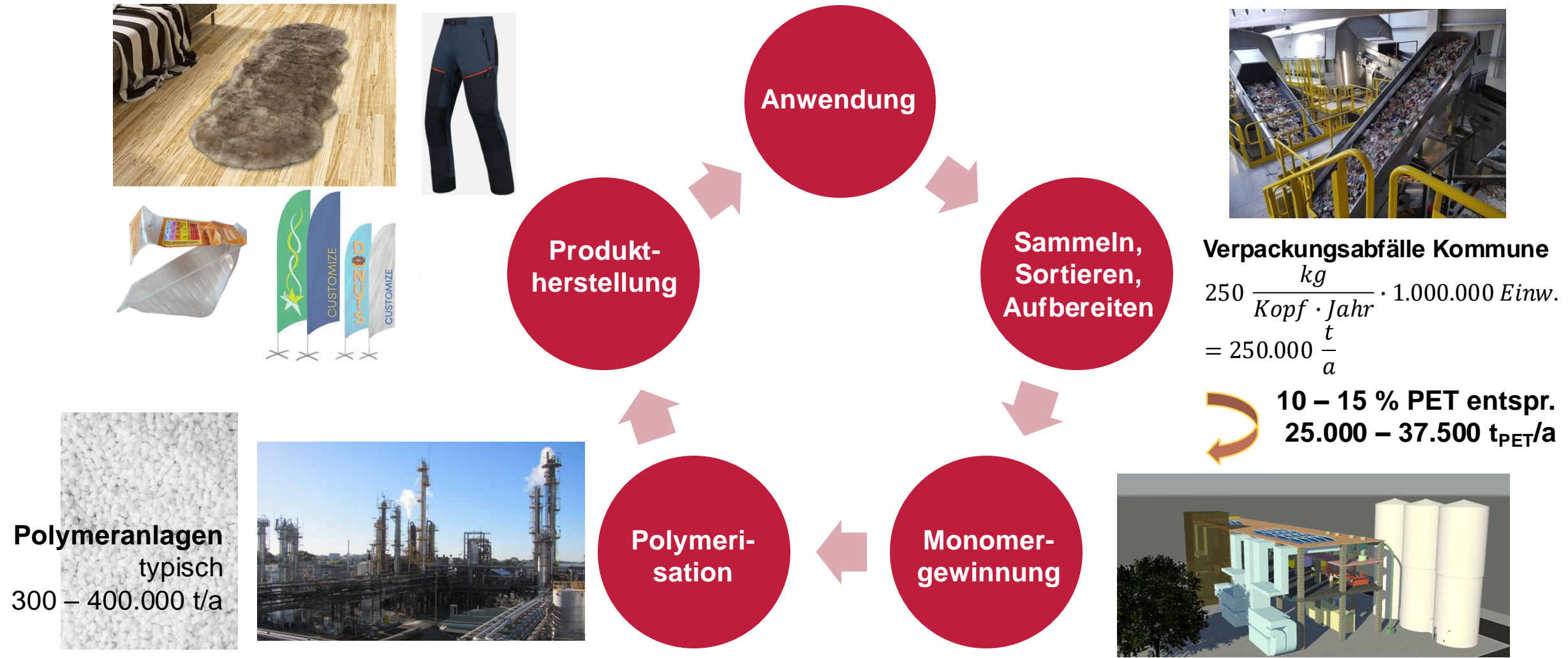


EU-27 vorläufige Schätzung / Quelle: Eurostat

©  Statistisches Bundesamt (Destatis), 2023

EUROPA
IN ZAHLEN

Einbindung einer PET-Recyclinganlage in einer zirkulären Wirtschaft



Kapazitätsabschätzung einer Großanlage zum chemischen PET-Recycling



Metropolregion Braunschweig, Göttingen, Hannover, Wolfsburg

- N-S ca. 250 km, O-W ca. 150 km
- 19.000 km²
- 3.800.000 Einwohner

Verpackungsabfälle Region

$$250 \frac{\text{kg}}{\text{Kopf} \cdot \text{Jahr}} \cdot 3.800.000 \text{ Einw.} = 950.000 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

10 - 15 % PET = 95.000 ... 142.500 t/a

Polymeranlagen typisch 300 – 400.000 t/a

⇒ Kapazität Recyclinganlage 50 ... 100.000 t/a Feedmaterial

„Für die Zukunft planen wir den Bau großmaßstäblicher chemischer Verarbeitungsanlagen mit einer geschätzten Kapazität von 45 000 Tonnen jährlich. Eine Standardanlage wird ausreichend effizient sein, um die in einem Umkreis von 500 bis 1 000 Kilometern verfügbaren PET-Abfälle zu verarbeiten“, betont Fragiaco.“*

* CEO Garbo SRL, Cerano/IT.

Was heißt das jetzt für eine entsprechende Großanlage?

- Recyclingtechnologie ist verfügbar auf TRL = 4 – 5 für PET aus Verpackungen und Polyester aus Textilien
 - Aktuell: $20 \text{ kg/h} * 1000 \text{ h/a} = 20 \text{ t/a}$ verarbeiteter Feedstrom
 - ↳ Wie groß trauen wir uns bauen im nächsten Schritt?
- Welche Kapazität sollte eine industrielle Großanlage haben? → **Erwartung: 40 ... 100 kt/a Feedstrom**
- Welcher Feedstrom wird verarbeitet: Verpackungsabfälle und/oder Polyester-Textilien?
 - ↳ Klare oder schwach gefärbte Flaschen können alle → Konkurrenz um Feedstrom
 - ↳ „Schwierige Verpackungsabfälle“: Verbundverpackungen, gefärbte Verpackungen, Ausschussfraktionen
 - ↳ „Den Gewinn macht man beim Einkauf“
 - ↳ Komplexe Feedströme, speziell Textilien, beinhalten mehrere zu gewinnende Wertkomponenten

Getrenntes Sammeln ist nur der 1. Schritt

- PET-Recycling aus Lebensmittelverpackungen vs. Textilien

Lebensmittelverpackungen

- PET-Flaschen, Siegelverpackungen, Lebensmittelschalen
- Un- oder schwach gefärbt
- Überwiegend PET, geringer PE-Anteil
- Dosierfähiges Feedmaterial (Flakes) als Handelsware verfügbar
- Geringer Anteil nicht gelöster Bestandteile - kann verworfen werden
- Ggf. keine/geringe Entfärbung notwendig
- Geringer Reinigungsaufwand für Hauptprodukt rTA



Textilien

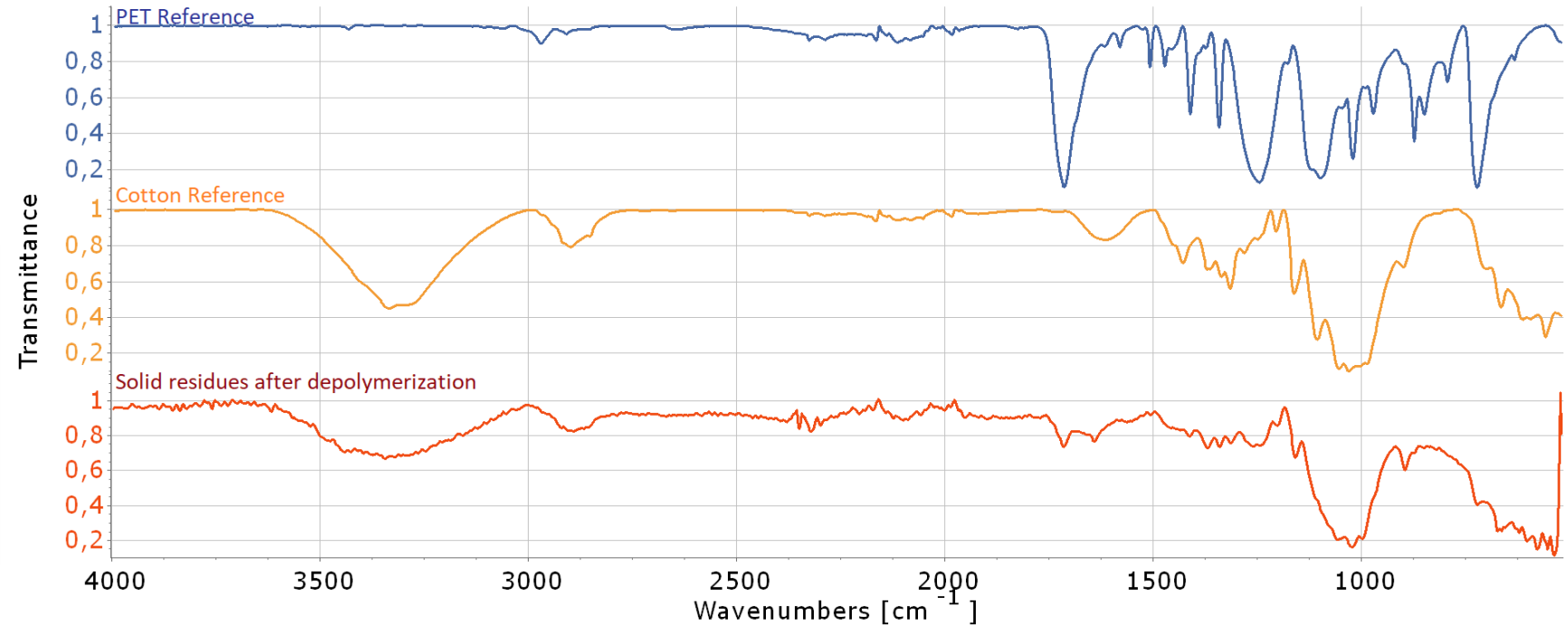
- Polyesterhaltige Textilien mit hohem Fremdstoffanteil
- Keine Verfügbarkeit eines definierten Stoffstroms konstanter Qualität
- Sammeln, Sortieren, Dosierbarkeit herstellen
- Farben, Wasserabweiser, Biozide, Flammschutzmittel, Applikationen, Aufdrucke, Verarbeitungshilfsstoffe etc.
- Erheblicher Anteil weiterer Wertstoffe: Baumwolle, Polyamide, Polyurethane, teilw. Farbstoffe, Flammschutzmittel, ...
 - gezielte Ausschleusung und Gewinnung
- Erheblicher Trenn- und Reinigungsaufwand zur Gewinnung aller enthaltenen Wertkomponenten
 - Aufwand/Nutzen-Abschätzung notwendig



revolPET® Prozess: Faser-zu-Faser Recycling

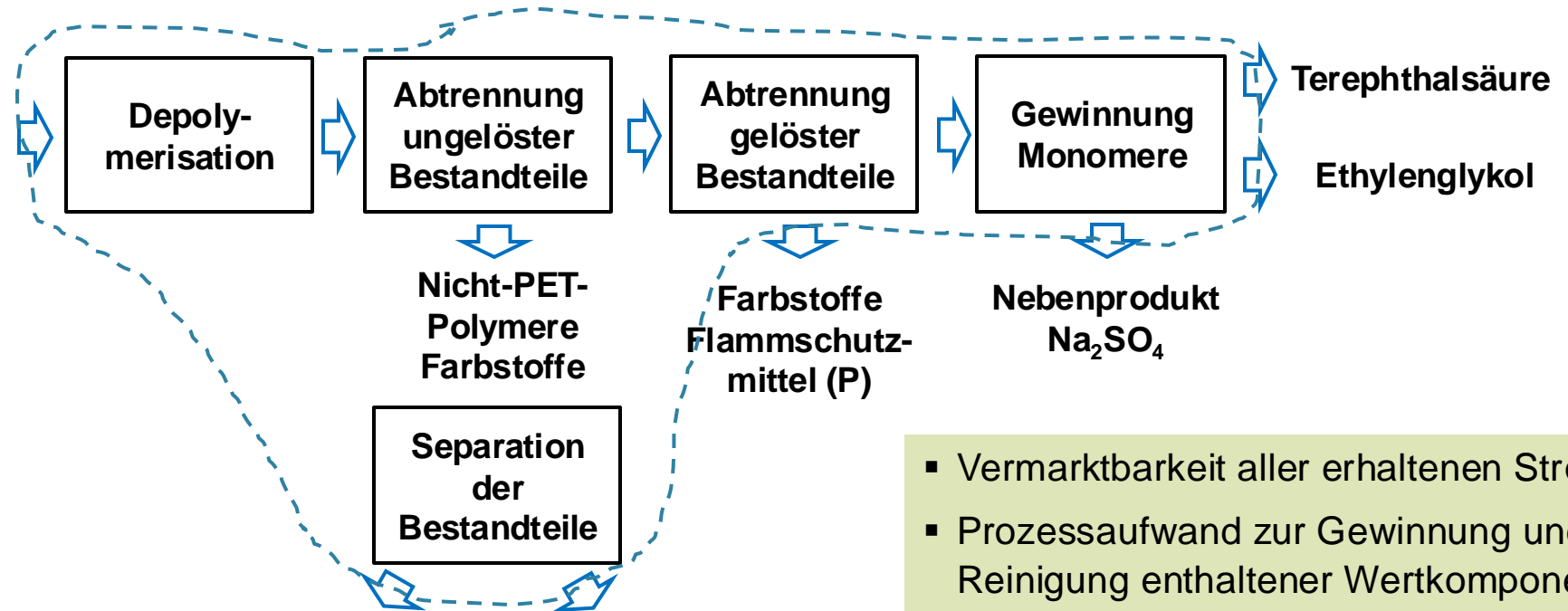
- Selektive PET-Depolymerisation aus Polycotton ergibt Baumwoll-Wertstoffstrom

- Die Mehrzahl der Textilien besteht aus verschiedenen Fasermaterialien, e.g. Polycotton = Polyester + Baumwolle
- Kein PET festgestellt in Rückständen: hoher Depolymerisationsgrad
- Feste Rückstände: Baumwolle, Polyolefine, Papier etc.
- Bewertung der Eignung für weiteres Recycling
- revolPET® Prozess kann als Trennschritt fungieren, um weitere Wertkomponenten zugänglich zu machen



PET-Recycling: Gewinnung aller lohnenden Wertstoffströme

- Komplexe PET-Abfälle eröffnen neue Herausforderungen und Chancen



z. B. Baumwolle

z. B. Farbstoffe



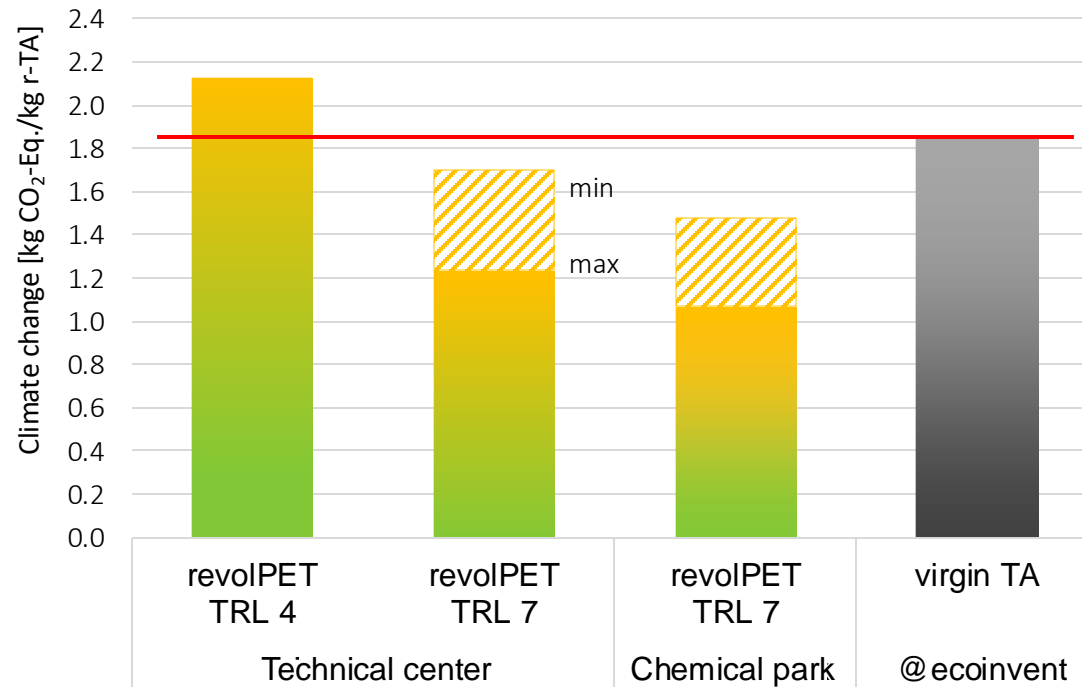
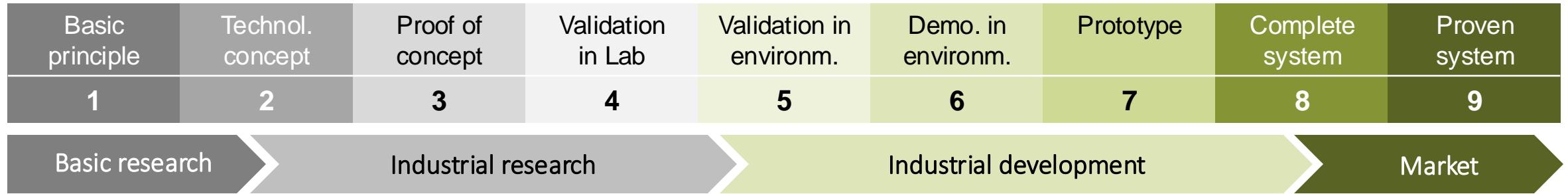
- Vermarktbarkeit aller erhaltenen Ströme
- Prozessaufwand zur Gewinnung und Reinigung enthaltener Wertkomponenten
- Qualitätsanforderungen, Spezifikationen
- „Drop-In-Ready“ für fossil basierte Produkte
- „Multi purpose“ vs. „dedicated“ Plant
- Markterschließung für neue r-Produkte, z. B. Farbstoffe, Flammschutzmittel, ...

Was heißt das jetzt für eine entsprechende Großanlage?

- Recyclingtechnologie ist verfügbar auf TRL = 4 – 5 für PET aus Verpackungen und Polyester aus Textilien
 - Aktuell: $20 \text{ kg/h} * 1000 \text{ h/a} = 20 \text{ t/a}$ verarbeiteter Feedstrom
 - ↳ Wie groß trauen wir uns bauen im nächsten Schritt?
- Welche Kapazität sollte eine industrielle Großanlage haben? → **Erwartung: 40 ... 100 kt/a Feedstrom**
- Welcher Feedstrom wird verarbeitet: Verpackungsabfälle und/oder Polyester-Textilien?
 - ↳ Klare oder schwach gefärbte Flaschen können alle → Konkurrenz um Feedstrom
 - ↳ „Schwierige Verpackungsabfälle“: Verbundverpackungen, gefärbte Verpackungen, Ausschussfraktionen
 - ↳ „Den Gewinn macht man beim Einkauf“
 - ↳ Komplexe Feedströme, speziell Textilien, beinhalten mehrere zu gewinnende Wertkomponenten
- Wer betreibt eine solche Anlage zum chemischen Recycling?
 - Recycler oder Chemieproduzent?
 - Anlage muss 24/7 für 7000 - 8000 h/a betrieben werden
- Wo sollte eine solche Anlage stehen?
 - Neben Sortieranlage oder neben Polymeranlage?

LCA @ revolPET®

- Ökologische Betrachtung zur Szenarienbewertung



Zirkularität für Polyester auf Basis eines Back-to-Monomer-Recycling

→ Technologisch machbar und robust, ökonomisch wettbewerbsfähig und ökologisch vorteilhaft

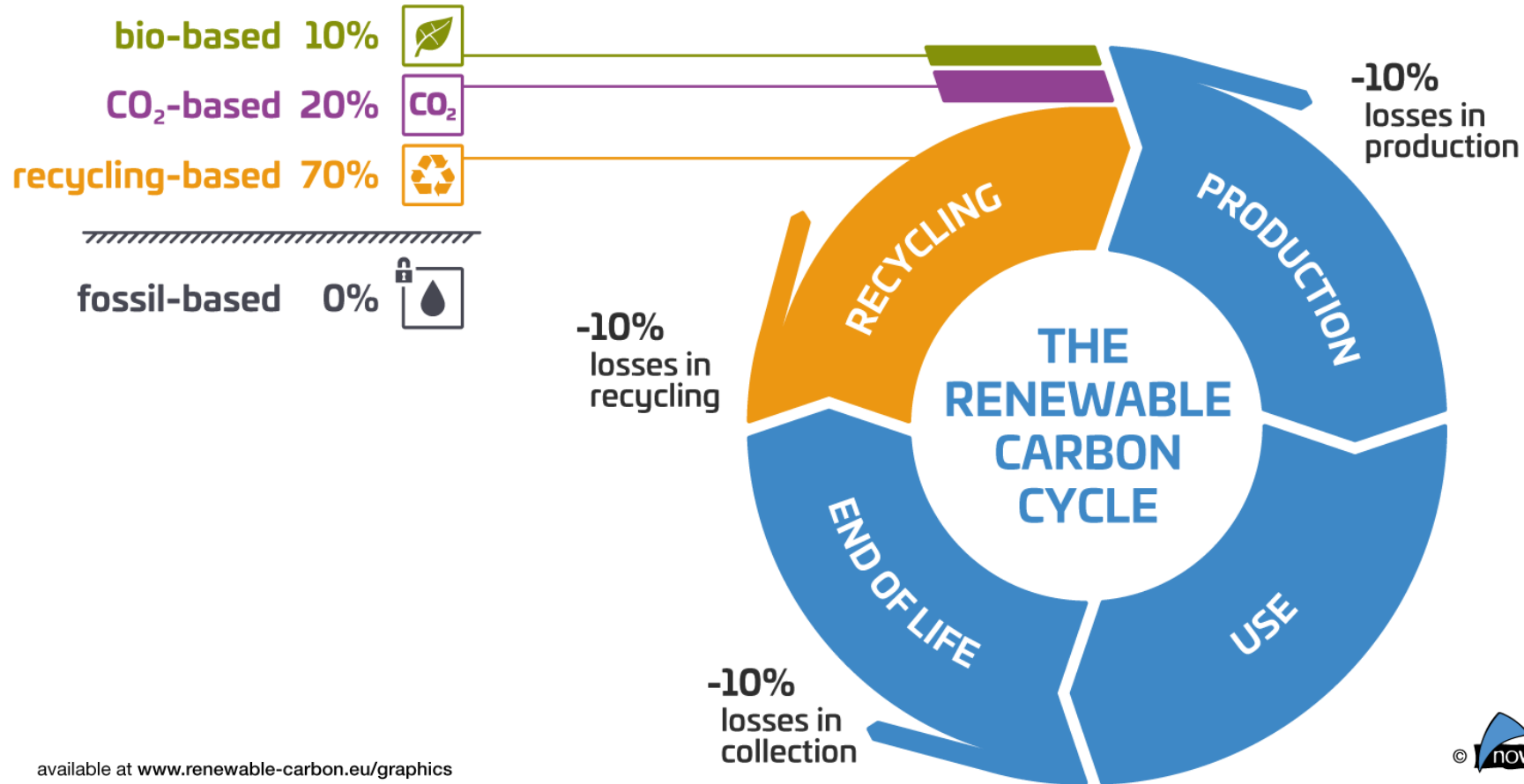
Was heißt das jetzt für eine entsprechende Großanlage?

- Recyclingtechnologie ist verfügbar auf TRL = 4 – 5 für PET aus Verpackungen und Polyester aus Textilien
 - Aktuell: $20 \text{ kg/h} * 1000 \text{ h/a} = 20 \text{ t/a}$ verarbeiteter Feedstrom
 - ↳ Wie groß trauen wir uns bauen im nächsten Schritt?
- Welche Kapazität sollte eine industrielle Großanlage haben? → **Erwartung: 40 ... 100 kt/a Feedstrom**
- Welcher Feedstrom wird verarbeitet: Verpackungsabfälle und/oder Polyester-Textilien?
 - ↳ Klare oder schwach gefärbte Flaschen können alle → Konkurrenz um Feedstrom
 - ↳ „Schwierige Verpackungsabfälle“: Verbundverpackungen, gefärbte Verpackungen, Ausschussfraktionen
 - ↳ „Den Gewinn macht man beim Einkauf“
 - ↳ Komplexe Feedströme, speziell Textilien, beinhalten mehrere zu gewinnende Wertkomponenten
- Wer betreibt eine solche Anlage zum chemischen Recycling?
 - Recycler oder Chemieproduzent?
 - Anlage muss 24/7 für 7000 - 8000 h/a betrieben werden → **Chemieproduzent**
- Wo sollte eine solche Anlage stehen?
 - Neben Sortieranlage oder neben Polymeranlage? → **Im Chempark**
- Womit verdient die Anlage ihr Geld?
 - Entsorgung der Feedmaterialien oder Verkauf der recycelten Produkte?
- Wie fügt sich das ein in das große Bild?

Circular Economy Szenario 2050

Schlüsselemente einer erneuerbaren Rohstoffversorgung

SCENARIO FOR THE PLASTIC INDUSTRY 2050



Vielen Dank für Ihr Interesse!

Fragen, Kommentare?



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



Technologie-
transferpreis

Winner 2023

Contact:

Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl

Institute Head

X49 531 391 2780

s.scholl@tu-braunschweig.de

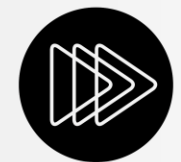
I N N O V A T I O N S P R E I S
N I E D E R S A C H S E N
2 0 1 8

Sieger!

in der Kategorie „Wirtschaft“



WINNER



Next Economy
Award 2021



Technische
Universität
Braunschweig

Oct. 30, 2024 | Kreislaufwirtschaft @ Liberec | S. Scholl | page 37



Wie geht es jetzt weiter?



Zusammen mit der
RITTEC 8.0
Umweltechnik GmbH
www.rittec.eu

