

**IKK**

Institut für Kunststoff-  
und Kreislauftechnik  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres

## ARBURG TECHNOLOGIE-TAGE 2022

### CIRCULAR ECONOMY - KONZEPTE FÜR NACHHALTIGE KUNSTSTOFFBAUTEILE AUS REZYKLATEN

*Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres*

Loßburg, 22. – 24. Juni



## Scope

**IKK**  
Institut für Kunststoff-  
und Kreislauftechnik

- Wann ist ein Rezyklat ein Rezyklat?
- Wieviel Rezyklat muss in einem Rezyklat drin sein, damit ein Rezyklat auch Rezyklat heißen darf?
- Führen alle Recyclingverfahren zu dem gleichen Ergebnis?
- Welche Recyclingverfahren sind zukünftig quotenwirksam, z.B. im Hinblick auf die Kunststoffsteuer?
- Wie nachhaltig ist Recycling?
- Gibt es ausreichende Standards und Normen im Recyclingbereich?
- Wo liegen die derzeitigen Bottlenecks?
- Was sind massenbilanzierte Rezyklate oder massenbilanzierte Biokunststoffe?
- Kann man ein Recycling oder biobasierten Feedstock nachweisen?

## Beruflicher Werdegang

**IKK**  
Institut für Kunststoff-  
und Kreislauftechnik



© Christian Wyrwa

RUHR  
UNIVERSITÄT  
BOCHUM **RUB**



**thyssenkrupp**

**1991** **1995**  
Dipl.-Ing. Dr.-Ing.

**1991 - 1999**  
Bereichsleiter

**H** HOCHSCHULE  
HANNOVER  
UNIVERSITY OF  
APPLIED SCIENCES  
AND ARTS  
Fakultät II  
Maschinenbau und  
Biosystemtechnik



**IfBB**  
Institute for Bioplastics  
and Biocomposites



**Fraunhofer**  
HOFZET WKI



**IKK**  
Institut für Kunststoff-  
und Kreislauftechnik  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres

**1999**  
Professor

**2011**  
Institutsleiter

**2013**  
Abteilungsleiter

**2019**  
Institutsleiter

© Leibniz University of Hannover, Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres  
Seite 3 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy



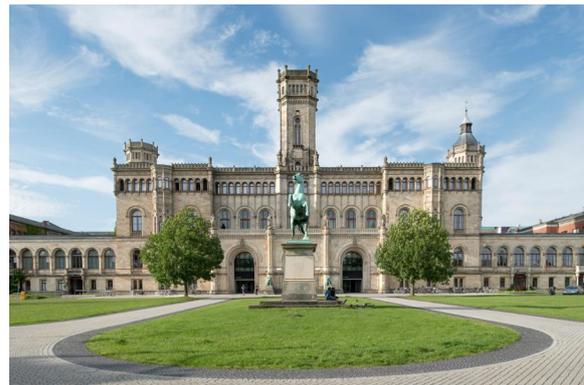
## Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (LUH)

**IKK**  
Institut für Kunststoff-  
und Kreislauftechnik

### Fakten und Statistiken

#### Gründung

- 1831
- TU9 Universität
- **Gesamtbudget (2019)**
  - 266,7 Mio. EUR
- **Studierende (WiSe 2019/20)**
  - 30.196
- **Studiengänge**
  - 84 Studiengänge
  - 9 Fakultäten
- **Mitarbeiter**
  - 5.138 Mitarbeiter
    - 3.320 Forschungsmitarbeiter und Lehrkräfte einschl. 348 Professoren
    - 1.744 technische und Verwaltungsmitarbeiter
    - 74 Auszubildende
- **Gebäude**
  - Grundfläche von 325.720 m<sup>2</sup>
  - 167 Gebäude



© Daniel Vogl, LUH

Hauptgebäude der Leibniz Universität Hannover

© Leibniz University of Hannover, Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres  
Seite 4 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy



## Fakultät für Maschinenbau Fakten und Statistiken



- 20 Institute
- 900 Mitarbeiter
- Finanzierung der Forschung: 75 Mio. Euro p.a.
- 75 Dissertationen p.a.
- 5.000 Studenten



Das Produktionstechnische Zentrum Hannover (PZH) wurde 2014



Campus Maschinenbau der Leibniz Universität Hannover (2020)



Fakultät für Maschinenbau

© Leibniz University of Hannover, Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres  
Seite 5 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy



## Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik IKK



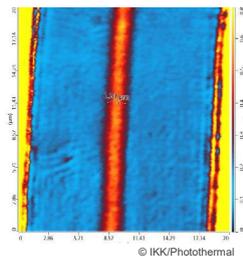
© Nico Niemeyer



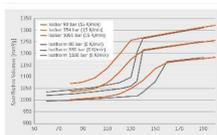
Color batch for thermoplastics



© Nico Niemeyer



© IKK/Photothermal



© Göttfert

Plastics Technology and Recycling

Plastics Analytics

IKK

Sustainability Assessment

Material Testing



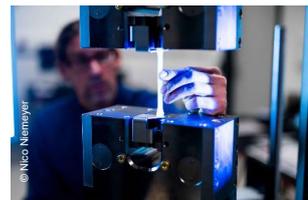
© IKK



© Nico Niemeyer



© Florian Bittner, IKK

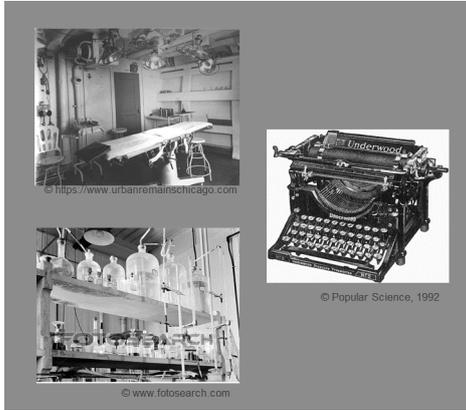


© Nico Niemeyer

© Leibniz University of Hannover, Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres  
Seite 6 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy



## Kunststoffe - außergewöhnliche, innovative und einzigartige Materialien



## Kunststoffe – Fluch oder Segen?



Quelle: www.unsplash.com

**Kosten – Leistung – Nachhaltigkeit**

**IKK**  
Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

**Kosten** ← - - - → **Leistung**

➔

**Nachhaltigkeit**

**Kosten**                      **Leistung**

© IKK

© Leibniz University of Hannover, Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres  
Seite 9 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy

**Strategien der Kunststoffindustrie, um CO<sub>2</sub>-neutral zu werden**

**IKK**  
Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

**I**

*Biodegradable & compostable plastic products*

**Organisches Recycling**

© European Bioplastics, geändert

**II**

*plastic products*

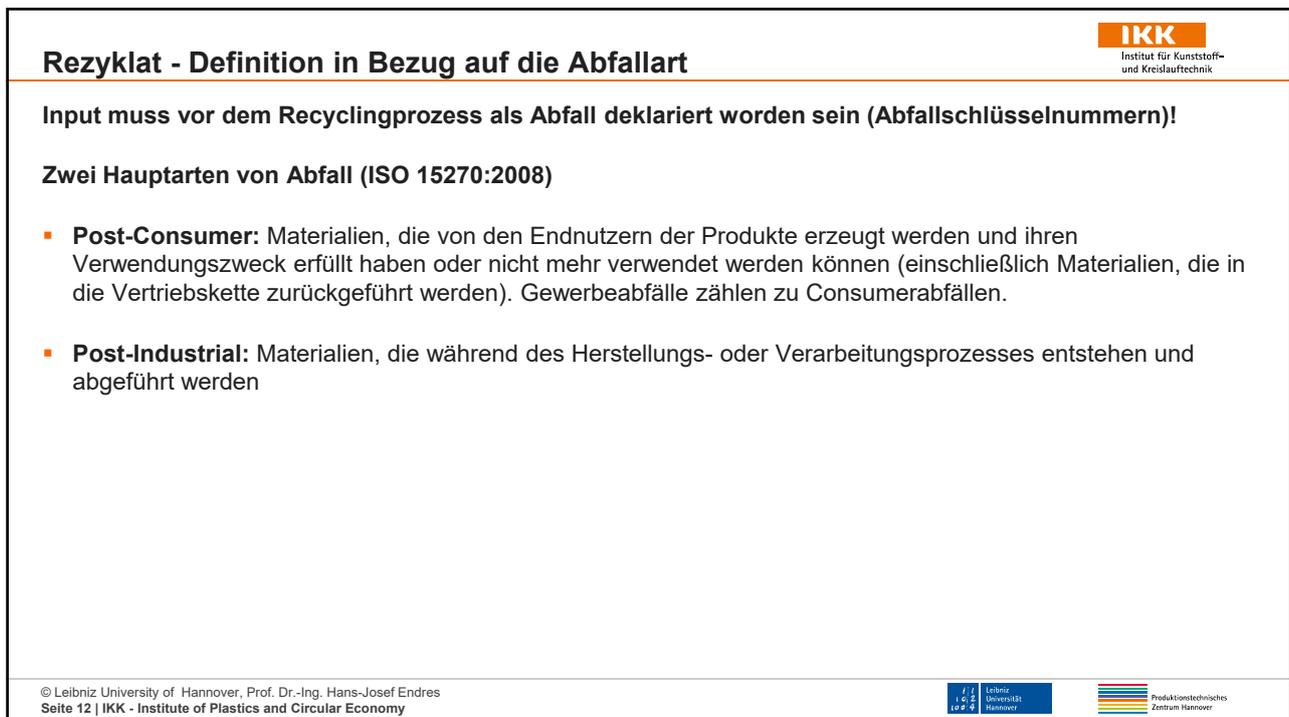
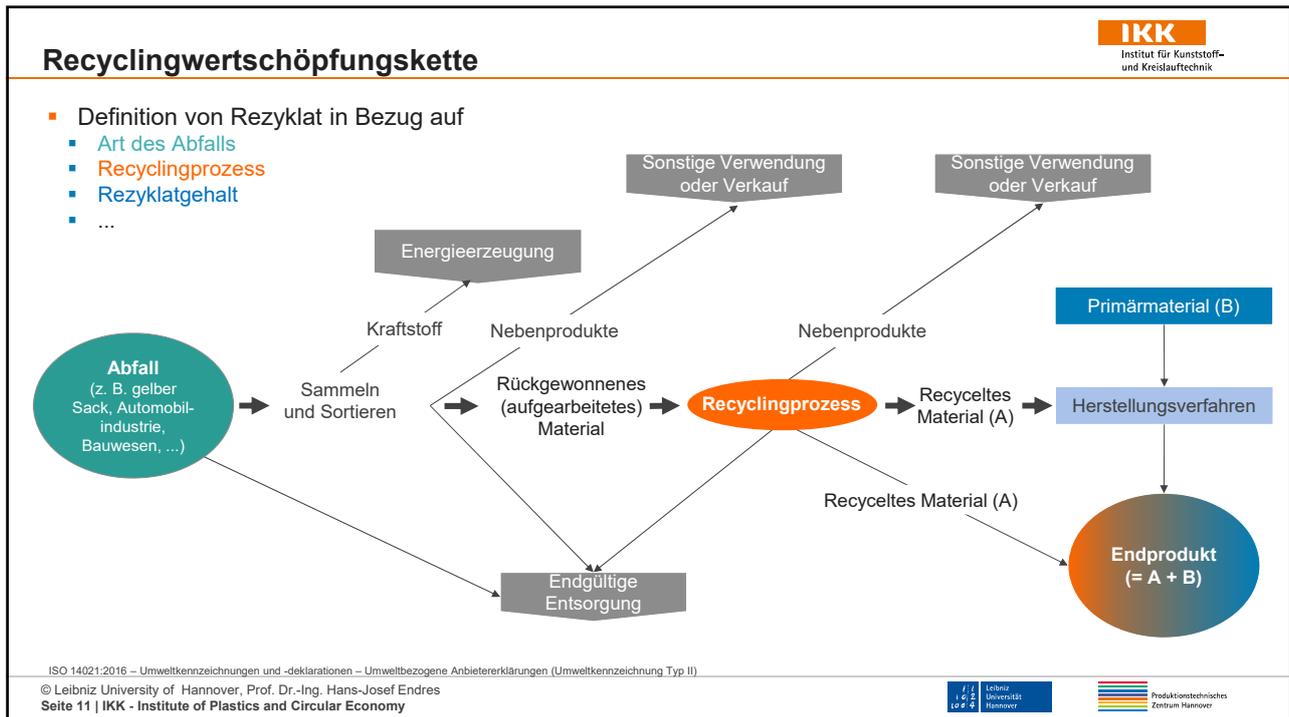
**Kunststoff-Recycling**

**III**

**Gewinnung und Nutzung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre**

**Carbon Capture & Storage**

© Leibniz University of Hannover, Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres  
Seite 10 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy



## Rezyklat - Definition in Bezug auf die Abfallart

### ■ Postindustrielle Materialien

Nebenprodukte aus der **Produktion**

- beim **Kunststoffproduzenten** (z. B. Maschinenumbau / Rezepturwechsel, Start-, Stopp- und Umstellungsvorgänge etc.) beim **Kunststoffverarbeiter** (z. B. Stanzgitter / Butzen / Angussabfälle / Folienrandstreifen, Material aus Produktionsumstellungen)

Material aus **fehlerhafter Produktion**

- beim **Kunststoffhersteller** (z. B. Off-Spec-Ware, NT-Ware)  
beim **Kunststoffverarbeiter** (z. B. Off-Spec-Ware, NT-Ware)

Material aus **Fertigung beim Kunststoffverarbeiter** (z. B. Verschnitt / Reststücke / Retoure)

Material aus **Fertigung bei Unternehmen der Lieferkette** (z. B. ext. Konfektionierer / kein Endverbraucher)

### ■ Post-Consumer-Materialien

Material aus der **Lieferkette** (z. B. Kundenreklamationen oder vom Handel unverkäufliche Bestände)

Material aus gebrauchten **Industrie- oder Transportverpackungen** (z. B. Fässer oder IBCs aus der chemischen Industrie, Stretchfolien aus dem Handel)

Inputmaterial aus **gebrauchten Verpackungen (z. B. Gelber Sack)**

Inputmaterial aus gebrauchten **Kunststoffprodukten von Verbrauchern**

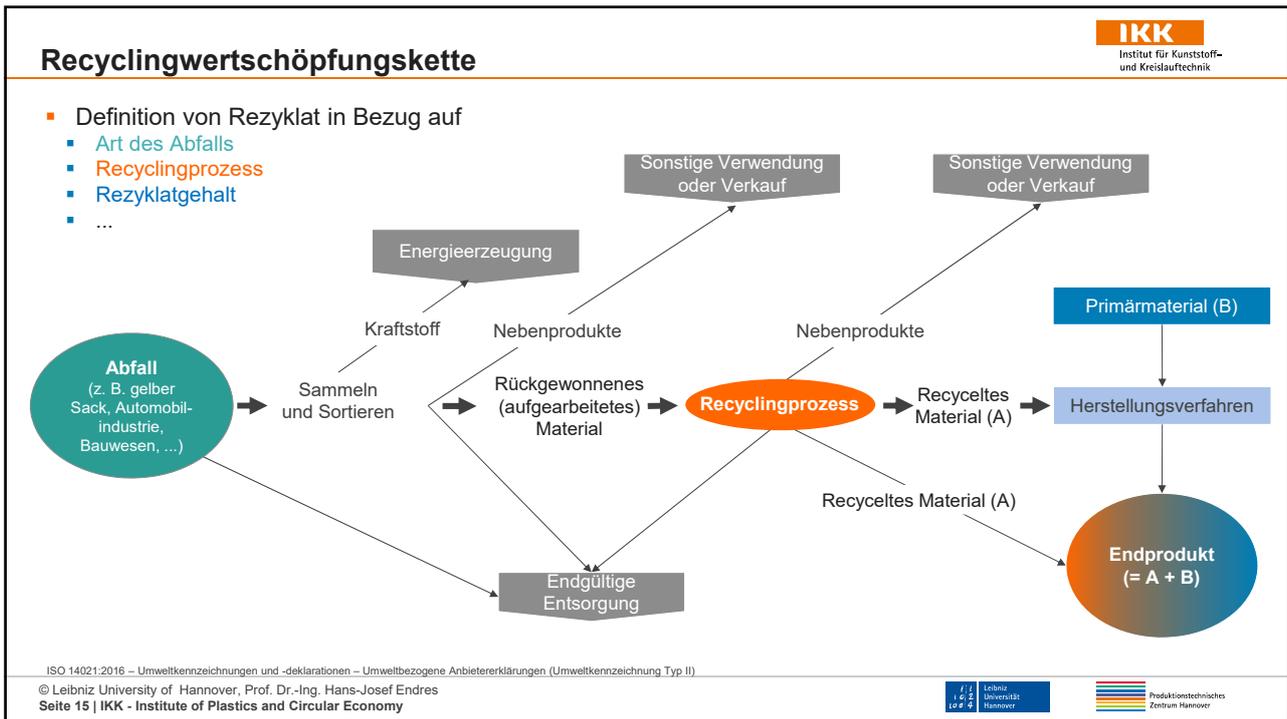
## Rezyklat - Definition in Bezug auf die Abfallart

**Input muss vor dem Recyclingprozess als Abfall deklariert worden sein (Abfallschlüsselnummern!)**

**Zwei Hauptarten von Abfall (ISO 15270:2008)**

- **Post-Consumer:** Materialien, die von den Endnutzern der Produkte erzeugt werden und ihren Verwendungszweck erfüllt haben oder nicht mehr verwendet werden können (einschließlich Materialien, die in die Vertriebskette zurückgeführt werden). Gewerbeabfälle zählen zu Consumerabfällen.
- **Post-Industrial:** Materialien, die während des Herstellungs- oder Verarbeitungsprozesses entstehen und abgeführt werden.
  - ANMERKUNG 1 Dieser Begriff **schließt** wiederverwendete Materialien **aus**, wie z. B. Nacharbeit, Mahlgut oder Schrott, die in einem bestimmten Prozess entstanden sind und innerhalb desselben Prozesses wiederverwendet werden
  - ANMERKUNG 2 Der Begriff „**Pre-Consumer**“ wird manchmal synonym verwendet

- Was ist „derselbe Prozess“?  
Dieselbe Fertigungslinie, dasselbe Produkt, dasselbe Unternehmen?
- Welche Materialien können für die Herstellung von Post-Consumer-Rezyklat (PCR) und Post-Industrial-Rezyklat (PIR) verwendet werden?
- Welche Materialien können nicht für die Herstellung von Rezyklat verwendet werden?



## Recyclingprozesse

Recyclingansätze	Prozess/Verfahrensablauf	Fördermenge
Enzymatisch	Gezielter Abbau von polymeren Stoffen	z. B. Polyester, das aus Mischgeweben durch enzymatischen Abbau von Baumwolle oder PUR gewonnen wird
Biologisch/organisch	Biologischer Polymer-Abbau	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, Methan, Biomasse
Energetisch	Verbrennung mit Energienutzung/Rückgewinnung	Energie (CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, Asche)
Mechanisch 95%	Mechanische Zerkleinerung	Mahlgut (Zusammensetzung als Eingabestrom)
	Vorbehandlung des Eingabestroms mit anschließender Extrusion/Granulierung	Granulat: Regranulat
Lösemittelbasiert 3%	Vorbehandlung des Eingabestroms mit anschließender Extrusion/Granulierung und mit Zugabe weiterer Materialkomponenten	Granulat: Recompound/Regenerat
	Selektive Auflösung und Rückgewinnung einzelner Polymerarten, d. h. Änderung des physikalischen Zustands ohne Änderung der Struktur	Polymere einer Polymerart (z. B. PE-Auflösung mit Hexan oder Decalin, PS in Toluol)
Chemisch 2%	Pyrolyse	Pyrolyseöl, Synthesegas, karbonisierte Kohle
	Vergasung	Synthesegas und Kohle mit hohem Brennwert
	Thermolyse Flüssiggas-Hydrierung	Hoch-gesättigte flüssige Kohlenwasserstoffe
	Methanolyse	PET: Dimethylterephthalat
Solvolyse/ Chemolyse	Glykolyse	PET: Glykolsat Bis(hydroxyethyl)terephthalat, diverse Säuren, Ester, Polyole
	Hydrolyse	PET: Terephthalsäure
	Ammonolyse, Aminolyse	Amide, Ethylenglykol

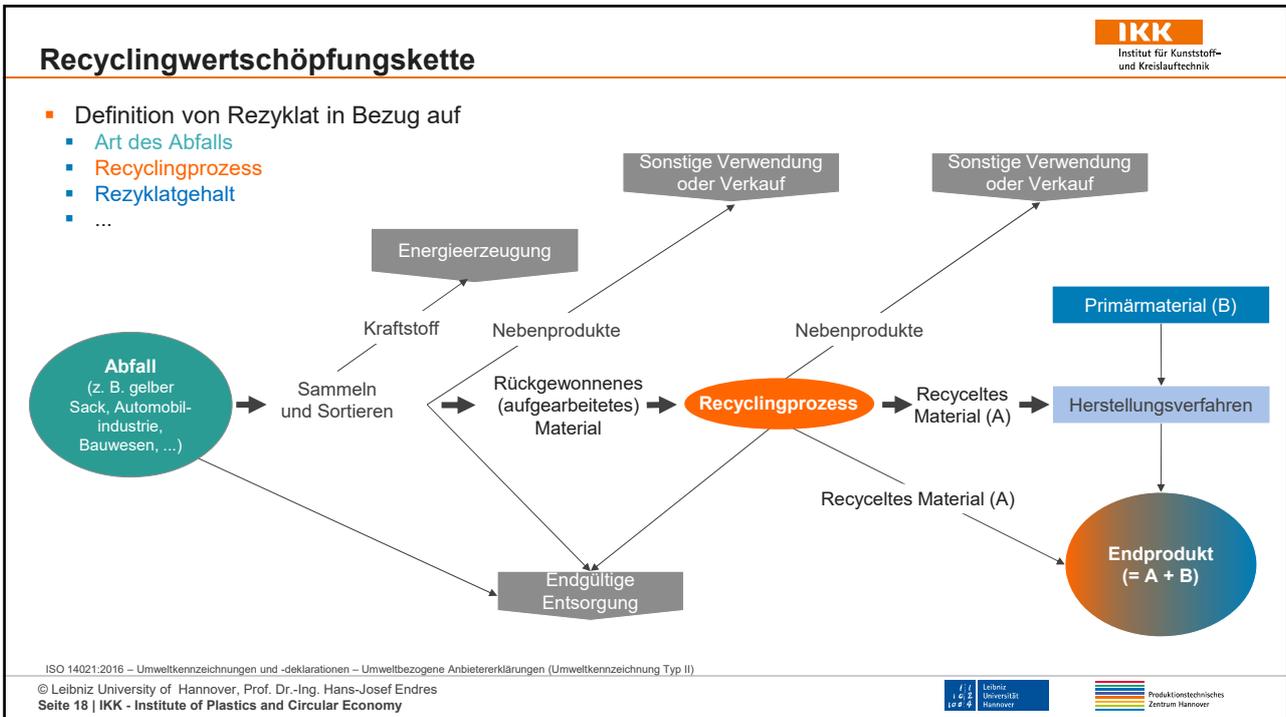
Quelle: H.-J. Endres et. al: Recycling und Kreislaufwirtschaft sind nicht immer dasselbe, Polyproblem-Report 2/2020, Röchling Stiftung, modifiziert

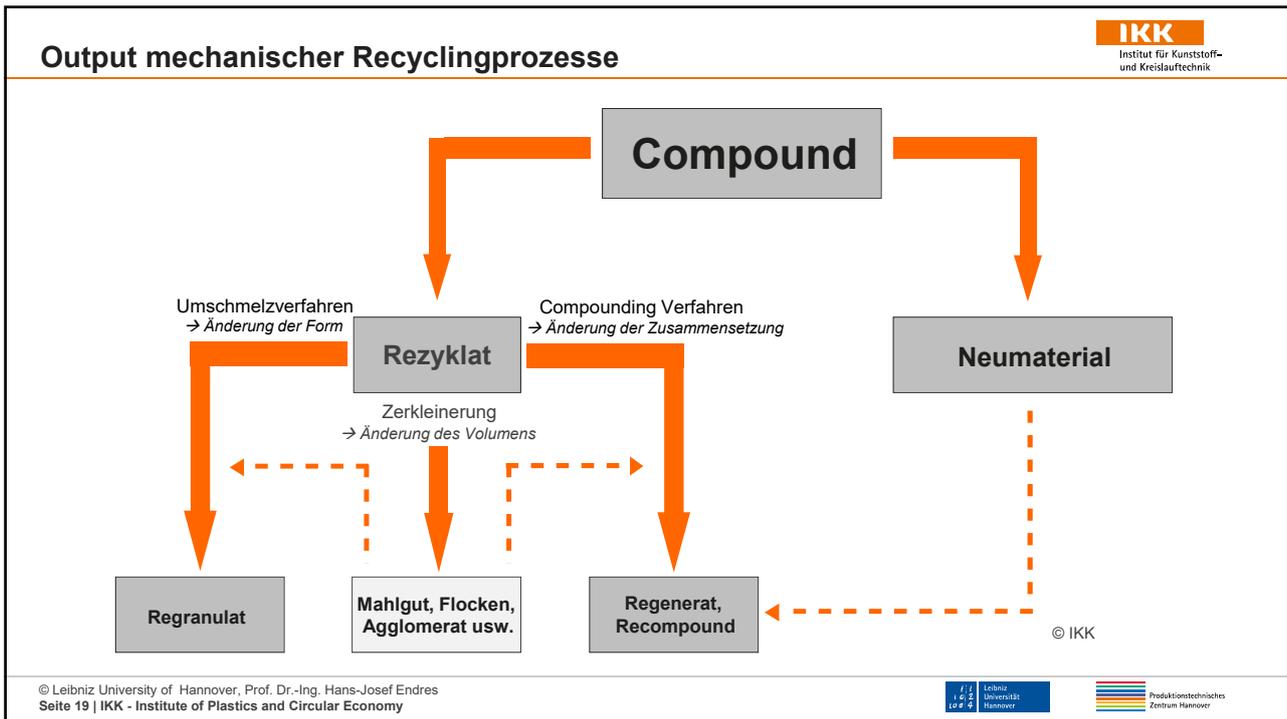
© Leibniz University of Hannover, Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres  
Seite 16 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy

Bewertung der Verfahren – mechanisches vs. chemisches Recycling		
	Mechanisches Recycling	Chemisches Recycling
Technische Anforderungen an die Infrastruktur / Prozesse	+ (niedrig)	- (hoch)
Möglichkeit der dezentralen Weiterverarbeitung	+ (möglich)	- (derzeit technisch aufwändig und unwirtschaftlich)
Anforderung an die Qualität des Eingabestroms	- (mittel bis hoch)	0 (niedrig bis mittel)
Qualität des Outputmaterials	0/- (proportional zur Qualität des Fördermaterials; moderate Qualitätsverbesserung durch Prozessparameter und Zusatzstoffe möglich, verhält sich umgekehrt proportional zum technischen Aufwand)	+ (sehr hoch)
Lebensmittelrechtliche Zulassung des Rezyklats	0 (in besonderen Fällen PE (und HDPE) möglich)	+ (hoch)
Möglichkeit des mehrfachen Recyclings	0 (eingeschränkt)	+ (hoch)
Industrieller Reifegrad	+ (hoch)	0 (je nach Verfahren, nicht vollständig ausgereift)
Kosten	+ (niedrig)	- (hoch)
Nachhaltigkeit / Datenverfügbarkeit	+ 0/+ (LCA-Datenlücken)	0 / - (fast keine Daten verfügbar)

Quelle: H.-J. Endres: Recycling und Kreislaufwirtschaft sind nicht immer dasselbe, Polyproblem-Report 2/2020, Röchling Stiftung, modifiziert

© Leibniz University of Hannover, Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres  
Seite 17 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy





### Rezyklat Definition in Bezug auf Inhalt/Charakterisierung

#### Allgemeines

- Es gibt keine Vorschriften über den Mindestgehalt an recyceltem Material in Kunststoffmischungen
  - Kunststoffmischungen, die aus neuem und recyceltem Kunststoff bestehen, können ebenfalls als Rezyklat bezeichnet werden
- Es gibt keine Vorschriften für das Recyclingverfahren, z. B.
  - Mechanisches Recycling vs. chemisches Recycling

#### Polymerspezifische Normen für Charakterisierung von Rezyklat

- Rezyklatgehalt
- Andere Polymere
- Füllstoff
- Additive

**EN 15345, DIN SPEC 91446**

$$\text{Recycelter Inhalt in Produkt (X \%)} = \frac{\text{Masse Rezyklat in Produkt}}{\text{Gesamtmasse Produkt}} * 100$$

**aber EN 17615 (fprEN)**

$$\text{Recycelter Inhalt in Produkt (X \%)} = \frac{\text{Masse rezyklierter Kunststoff in Produkt}}{\text{Gesamtmasse Produkt}} * 100$$

#### Charakterisierung von Polypropylen (PP)-Rezyklaten DIN EN 15345

Eigenschaft	Uni	Prüfverfahren
<b>Erforderliche Daten</b>		
Farbe		Sichtprüfung
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	EN ISO 1183-1
Schlagfestigkeit	kJ/m <sup>2</sup>	EN ISO 179-1,-2 oder EN ISO 180
Schmelze-Massefließrate	g/10 min	EN ISO 1133
Form		Sichtprüfung
<b>Optionale Daten</b>		
Aschegehalt	%	EN ISO 3451-1
Schüttdichte	kg/m <sup>3</sup>	Anhang A
Andere Polymere	%	Thermische Analyse/IR
Biegeeigenschaften	MPa	EN ISO 178
Filtrationsgrad	µm	Maschenweite
Recyceltes Material	%	EN 15345
Streckspannung	%	EN ISO 527-1/-2
Bruchdehnung	%	EN ISO 527-1/-2
Gehalt an flüchtigen Stoffen	5	EN 12099 usw.

© Leibniz University of Hannover, Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres  
 Seite 20 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy



## DIN SPEC 91446 – Datenqualitätsebenen für Rezyklate

Information	Example	DQL 1	DQL 2	DQL 3	DQL 4
Material type	PE, PP, PET, ...	X	X	X	X
Recycled content according to Clause 6	X %	X	X	X	X
Packaging	Octabins, bagged goods, bale goods, silo	X	X	X	X
Filler content	Mineral X %, glass fibres X %		X	X	X
Color (without measurement)	Black, natural, white		X	X	X
Recycling method	Information about a mechanical recycling process, solvent-based process, etc.		X	X	X
Condition	Agglomerate, flake, regrind, regenerate, regrunulate		X	X	X
Lot number	Given on the packaging or certificate of analysis		X	X	X
Certificate of analysis	DIN EN 10204, 3.1		X	X	X
Source	Post-consumer, post-industrial		X	X	X
Content of other plastics	Data from the sorting process, FTIR, DSC (DIN EN ISO 11357-1, DIN EN ISO 11357-2, DIN EN ISO 11357-3)			X	X
Trade name of the compound or product	(not necessarily a registered trade mark)			X	X
DIN EN ISO 9001 certification of the supplier	or other standards, that include DIN EN ISO 9001				X
Original use of the material	bottles or trays, blow molding or injection molding, description of waste, mixed waste				X

Property	Examples for standards	DQL 1	DQL 2	DQL 3	DQL 4
Viscosity (MVR/MFR, IV, VN)	DIN EN ISO 1133 series, DIN EN ISO 307, (DIN EN) ISO 1628 series		X	X	X
Ash content	(DIN EN) ISO 3451 series, DIN EN ISO 1172		X	X	X
Residual humidity	DIN EN ISO 15512, DIN EN 13267, calibrated IR scale		X	X	X
Density	DIN EN ISO 1183 series			X	X
Bulk density	DIN EN ISO 60			X	X
Heat deflection temperature or Vicat softening temperature	DIN EN ISO 75 series, DIN EN ISO 306				X
Particle size distribution	DIN 53477 or average grain size and shape of the granulate				X
Material identification (FTIR or DSC)	IR (data base comparison), DSC (DIN EN ISO 11357-1, DIN EN ISO 11357-2, DIN EN ISO 11357-3)				X

... + verschiedene optionale Merkmale

## DIN SPEC 91446 – Datenqualitätsebenen für Rezyklate

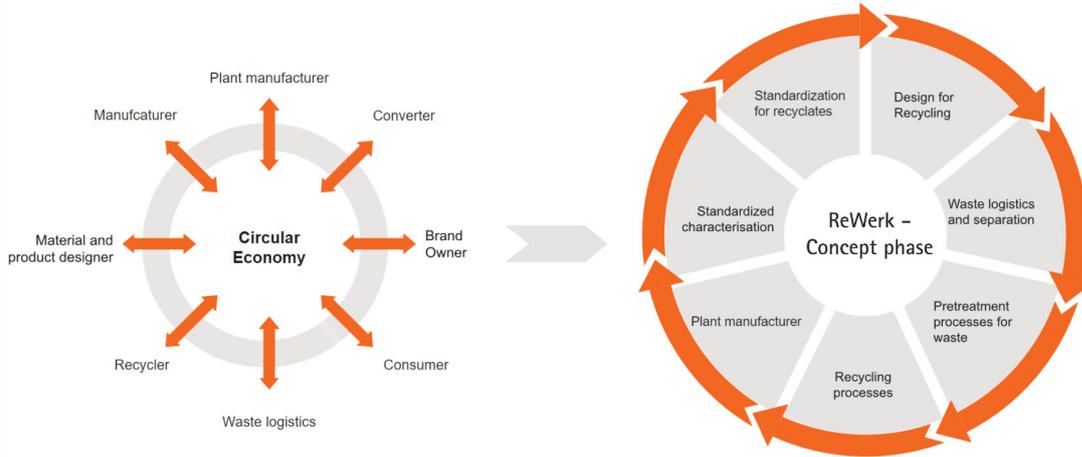
... + verschiedene optionale Charakteristika

Optional characteristic	Example (standards)	Property	Information
Hardness	DIN EN ISO 868, DIN ISO 48-4, DIN EN ISO 2039-1, DIN EN ISO 2039-2	X	
Color (measurement)	DIN EN ISO 3668, DIN 53236	X	
Tensile properties	DIN EN ISO 527-1, DIN EN ISO 527-2	X	
Bending properties	DIN EN ISO 178	X	
(notched) impact resistance	DIN EN ISO 179-1, DIN EN ISO 180	X	
Flammability	UL 94, DIN 75200	X	
Odor or emission measurements	VDA 270, VDA 277, VDA 278	X	
Chemical resistance	DIN EN ISO 22088 series	X	
Shear curve	ISO 11443	X	
Content of contaminants in the plastic waste feedstock for recycling	Information from the specification of plastic waste as feedstock for recycling		X
Melt filtration	Mesh size, kind of filter		X
Details of the washing process of the recycling process	Cold/hot wash		X

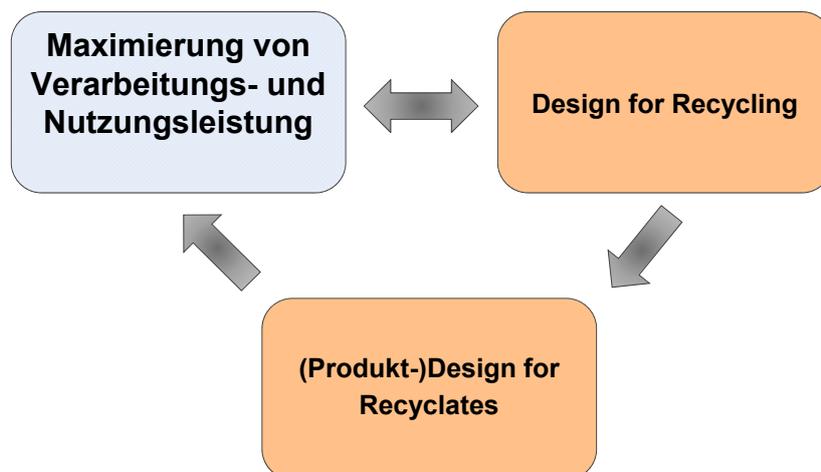
Optional characteristic	Example (standards)	Property	Information
Further details about the recycling process	drying, density separation, dedusting		X
Known additives	Stabilizers, plasticizers, flame retardants		X
Details of the colorant	Influence on the recyclability (e.g. carbon black)		X
Content of contaminants in the compound	Metals, minerals, paper DIN CEN/TS 17627		X
Intended or non-intended use of the material	Intended use: injection moulding, blow film Non-intended use: extrusion		X
Intended market	Food packaging, automotive, IEEE		X
CO <sub>2</sub> equivalents	DIN EN ISO 14067		X
Recyclability			X
Traceability	Digital code, sorting aid/anorganic and organic tracers		X
Lot size	X tons		X

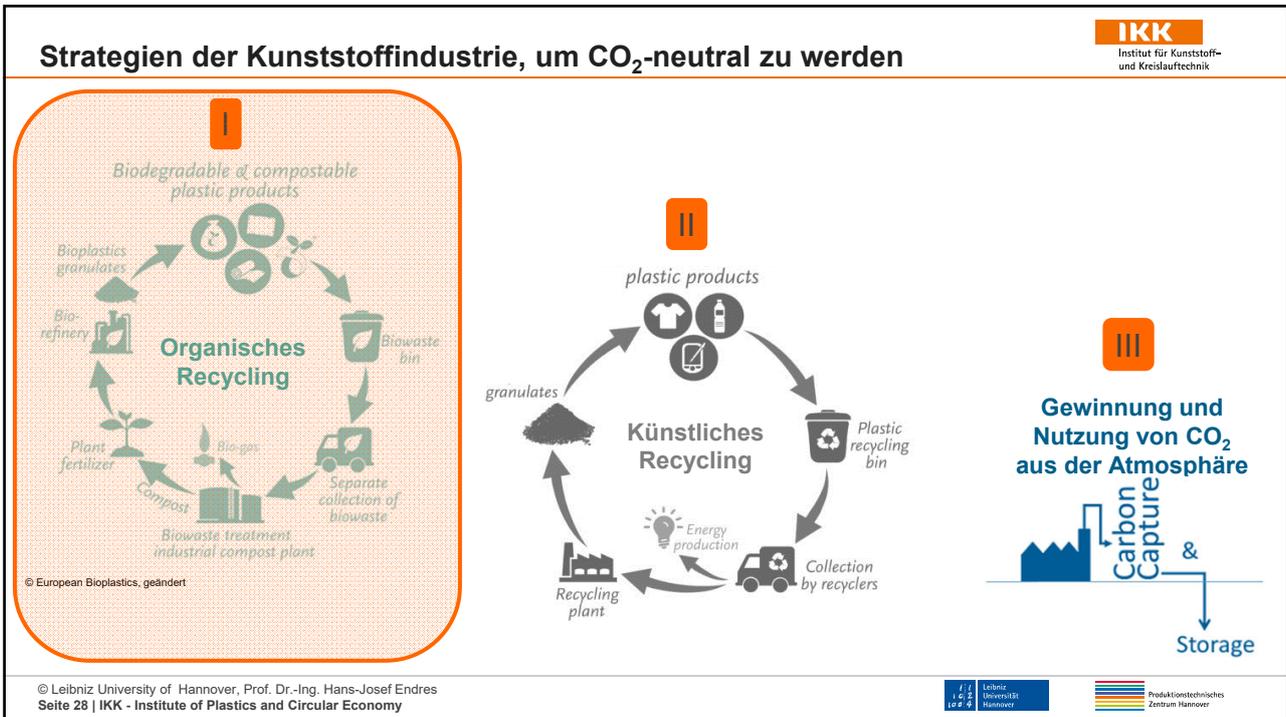
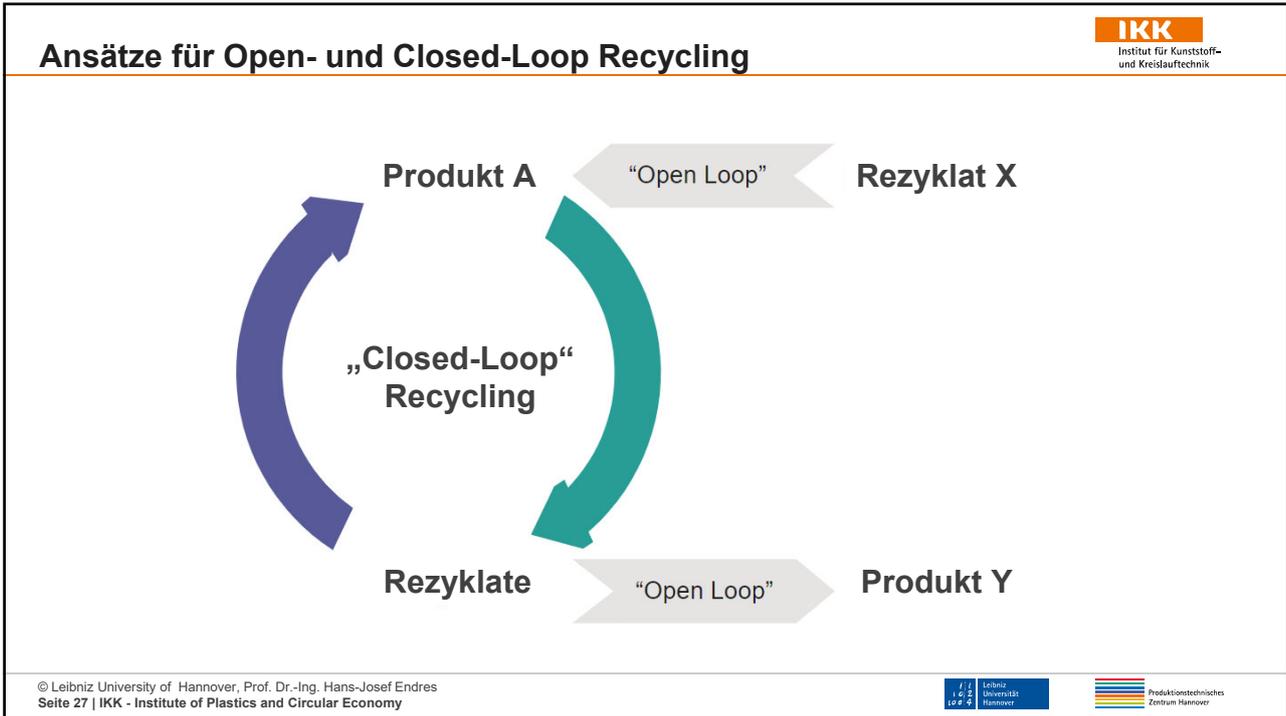
## Alle Beteiligten werden gebraucht, um eine Kreislaufwirtschaft zu etablieren

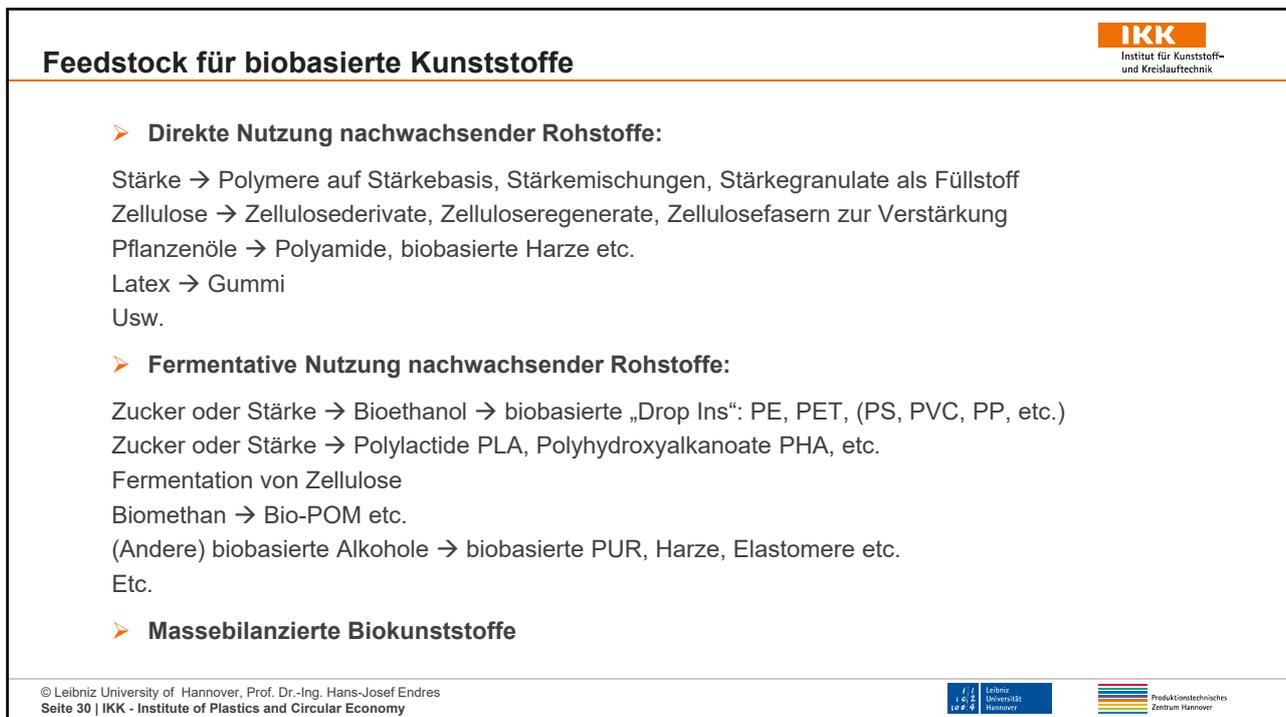
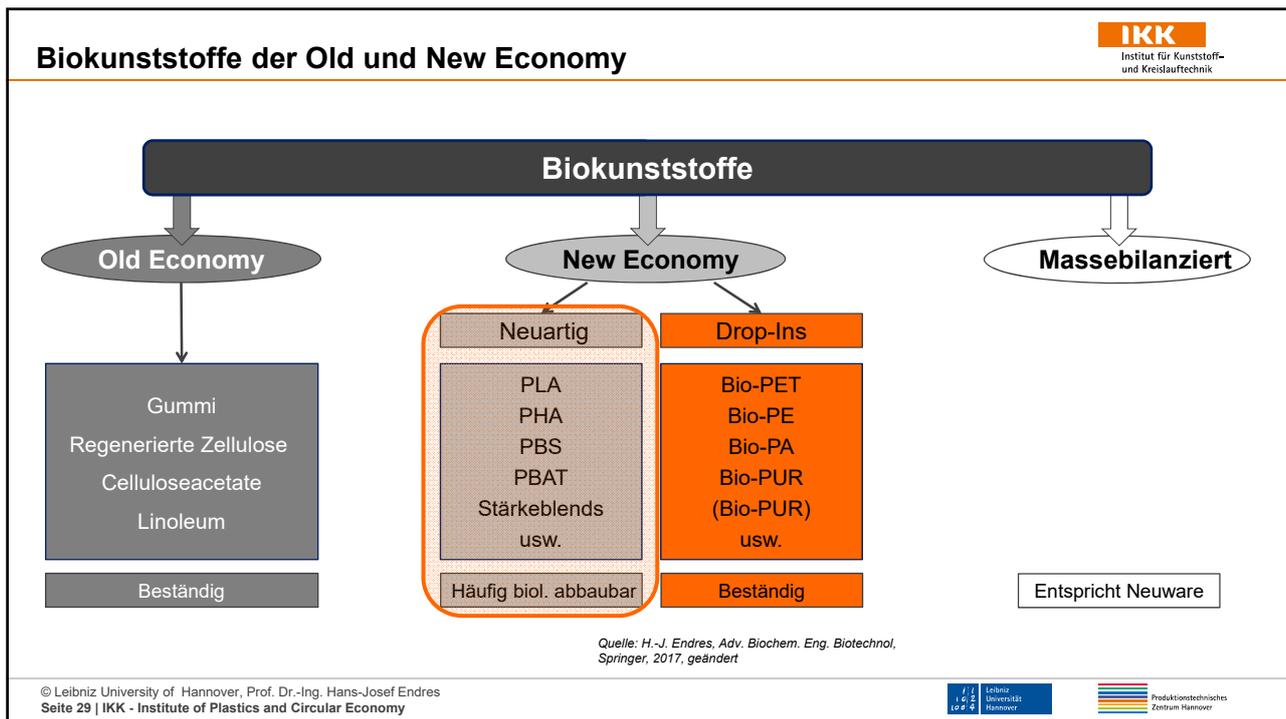
- Statt Einzelaktivitäten braucht es neue Partnerschaften entlang der gesamten „Wertschöpfungskette Recycling“, um eine Kreislaufwirtschaft zu etablieren



## Design for Recycling

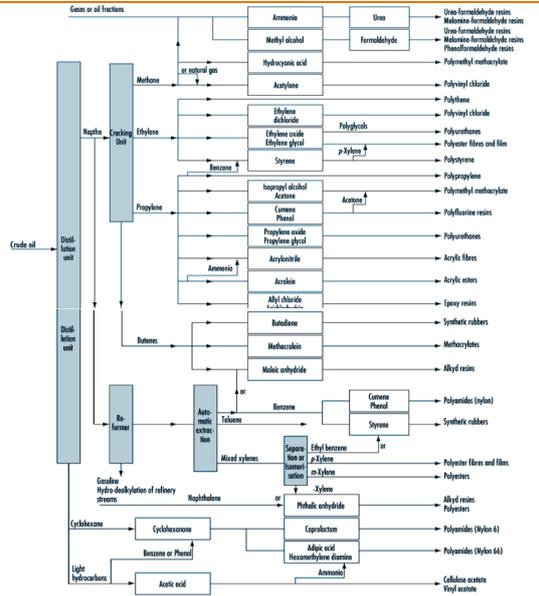




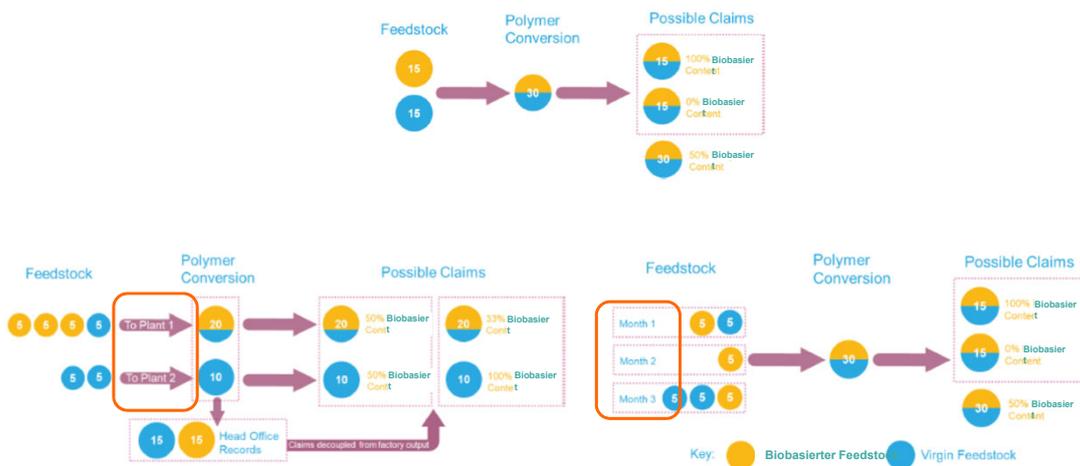


## Neuer Feedstock für die Chemieindustrie

- Naphtha-Cracker (hauptsächlich EU)
  - Feedstock: 100 % Rohöl (→ C3 – C6)
  - **Feedstock: Tallöl, UCO oder HVO → Bio-Naphtha (C3 – C12/C16)**
- Gas-Cracker (USA)
  - Ethan, Propan, + X-Gemisch
  - Schiefergas (Ethan-Cracker)
  - **Biogas/Biomethan**



## Massenbilanz-Ansatz

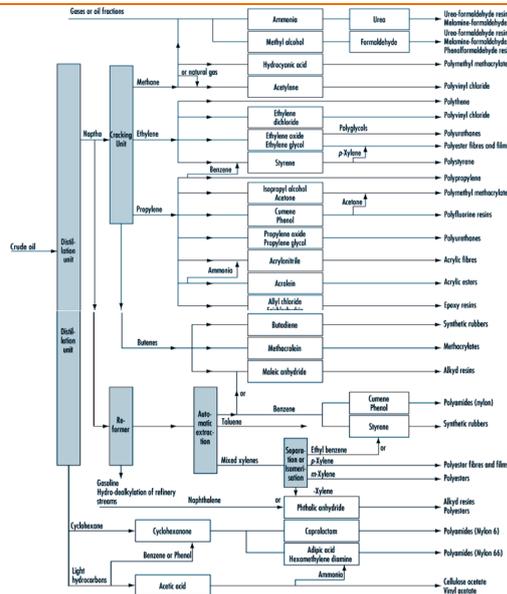


(Quelle: Eunomia Research Consulting Ltd., 2020, geändert)

## Neuer Feedstock für die Chemieindustrie



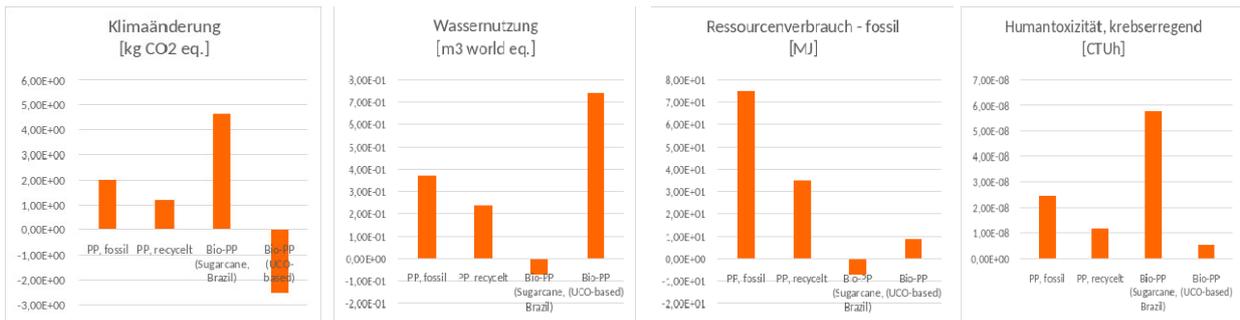
- Naphtha-Cracker (hauptsächlich EU)
  - Feedstock: 100 % Rohöl (→ C3 – C6)
  - Feedstock: Tallöl, UCO oder HVO  
→ Bio-Naphtha (C3 – C12/C16)
  - Feedstock: **Polymer (Polyolefine)**  
→ **Pyrolyseöle** → **Erneuerbares Naphtha**
- Gas-Cracker (USA)
  - Ethan, Propan, + X-Gemisch
  - Schiefergas (Ethan-Cracker)
  - Biogas/Biomethan
  - **Pyrolysegase**



© Leibniz University of Hannover, Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres  
Seite 33 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy



## Ökologische Auswirkungen von PP, Bio-PP und r-PP (mechanisch recycelt) auf Grundlage von 1 kg – Cradle-to-Gate



Quelle: Compilation of Nessie et. al. (2020) and Moretti et al. (2020)

### Zusammenfassung

- Das Recycling von Kunststoff ist ungefähr 50 % besser als die Herstellung von Neumaterialien in allen verschiedenen Kategorien
- Biobasierte Kunststoffe schneiden in den verschiedenen Kategorien teils besser, teils schlechter ab als petrobasierte Kunststoffe, abhängig vom Prozess und den betrachteten LCA-Parametern

© Leibniz University of Hannover, Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres  
Seite 34 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy

