

**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



**1999**  
Professor



**IfBB**  
Institute for Bioplastics  
and Biocomposites

**2011**  
Institutsleiter



**Fraunhofer**  
HOFZET      WKI

**2013**  
Abteilungsleiter



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

**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



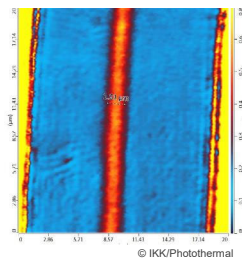
© Nico Niemeyer



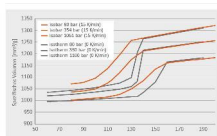
Color batch for thermoplastics



© Nico Niemeyer



© IKK/Photothermal



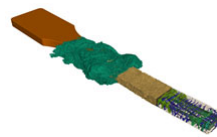
© Göttfert



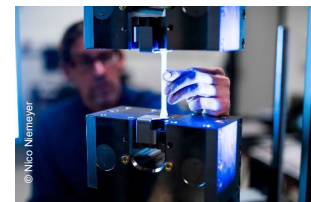
© IKK



© Nico Niemeyer



© Florian Bittner, IKK

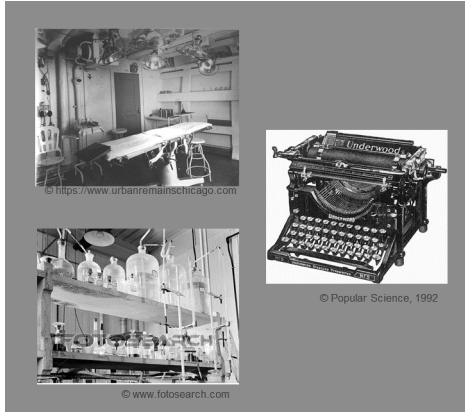


© Nico Niemeyer

© 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?



**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

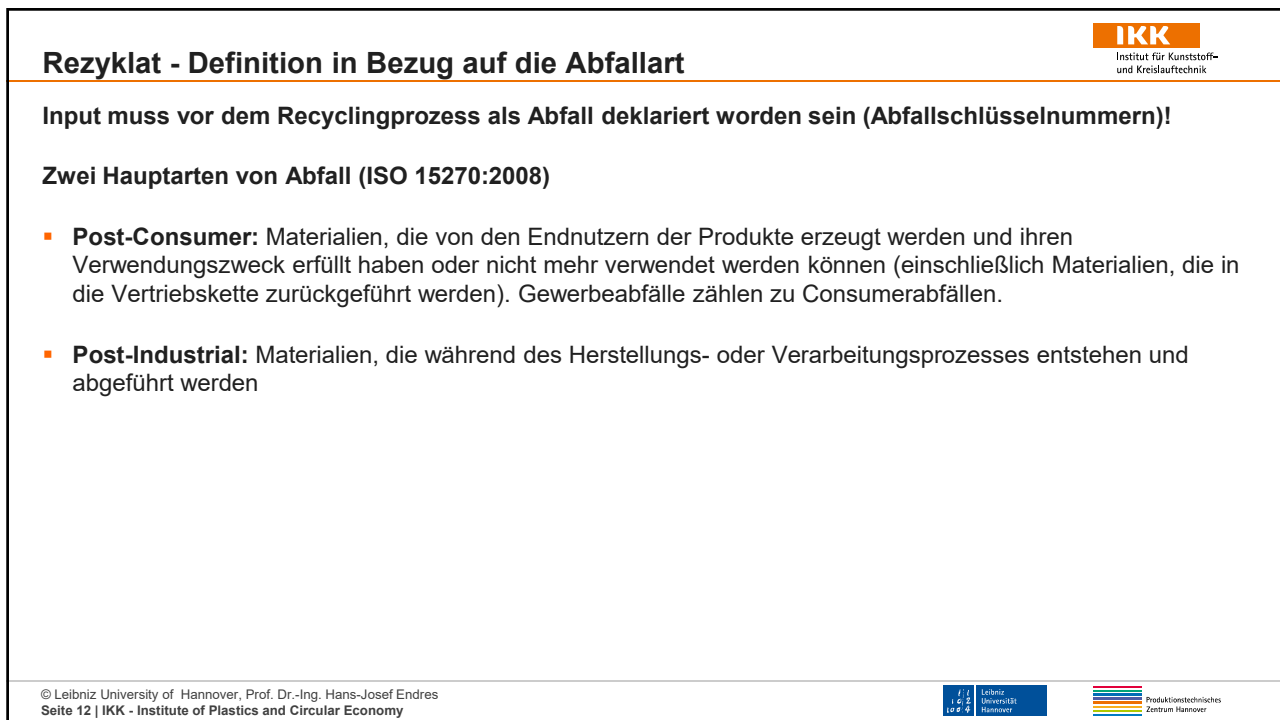
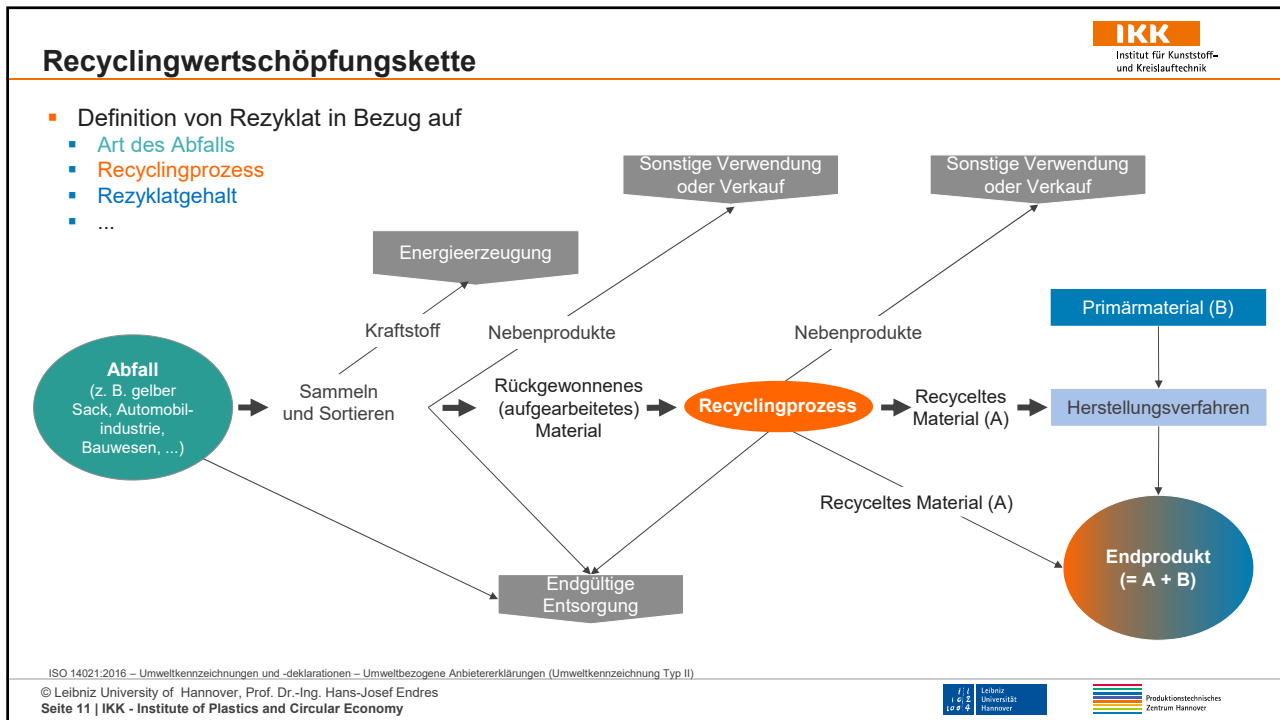
Kunststoff-Recycling

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**

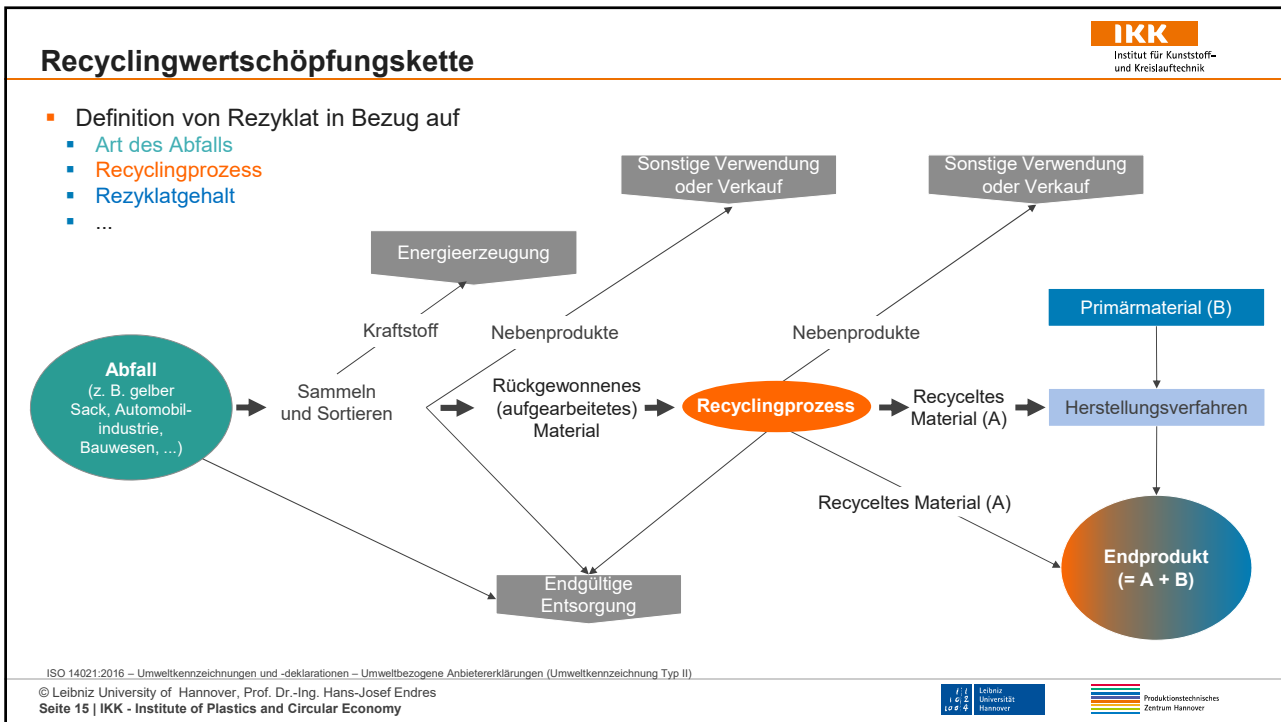
## Rezyklat - Definition in Bezug auf die Abfallart

**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)  |
| <b>Mechanisch 95%</b>       | Mechanische Zerkleinerung   | Mahlgut (Zusammensetzung als Eingabestrom)   |
|                             | Vorbereitung des Eingabestroms mit anschließender Extrusion/Granulierung  | Granulat: Regranulat   |
| <b>Lösemittelbasiert 3%</b> | Vorbereitung 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)                  |
| <b>Chemisch 2%</b>          | Pyrolyse  | Pyrolyseöl, Synthesegas, karbonisierte Kohle   |
|                             | Vergasung   | Synthesegas und Kohle mit hohem Brennwert  |
|                             | Thermolyse<br>Flüssiggas-Hydrierung   | Hoch-gesättigte flüssige Kohlenwasserstoffe  |
|                             | Methanolyse   | PET: Dimethylterephthalat  |
| Solvolyse/<br>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

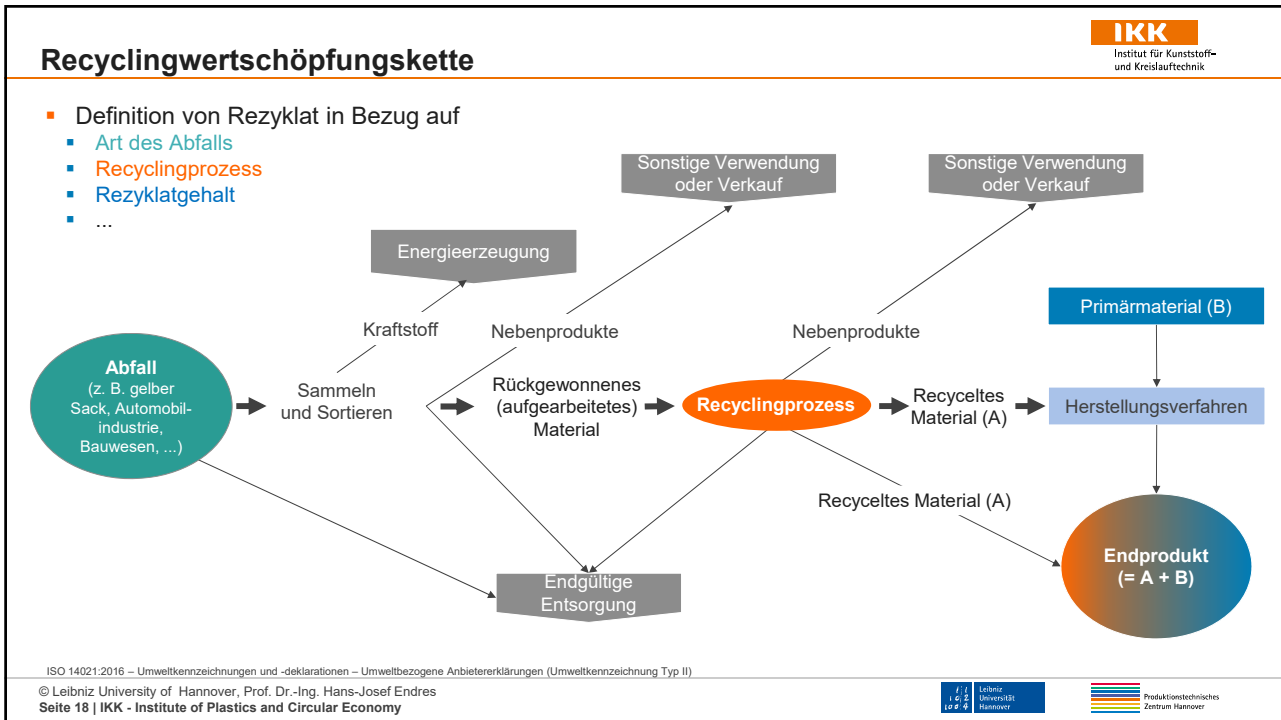
© Leibniz University of Hannover, Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres  
Seite 16 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy

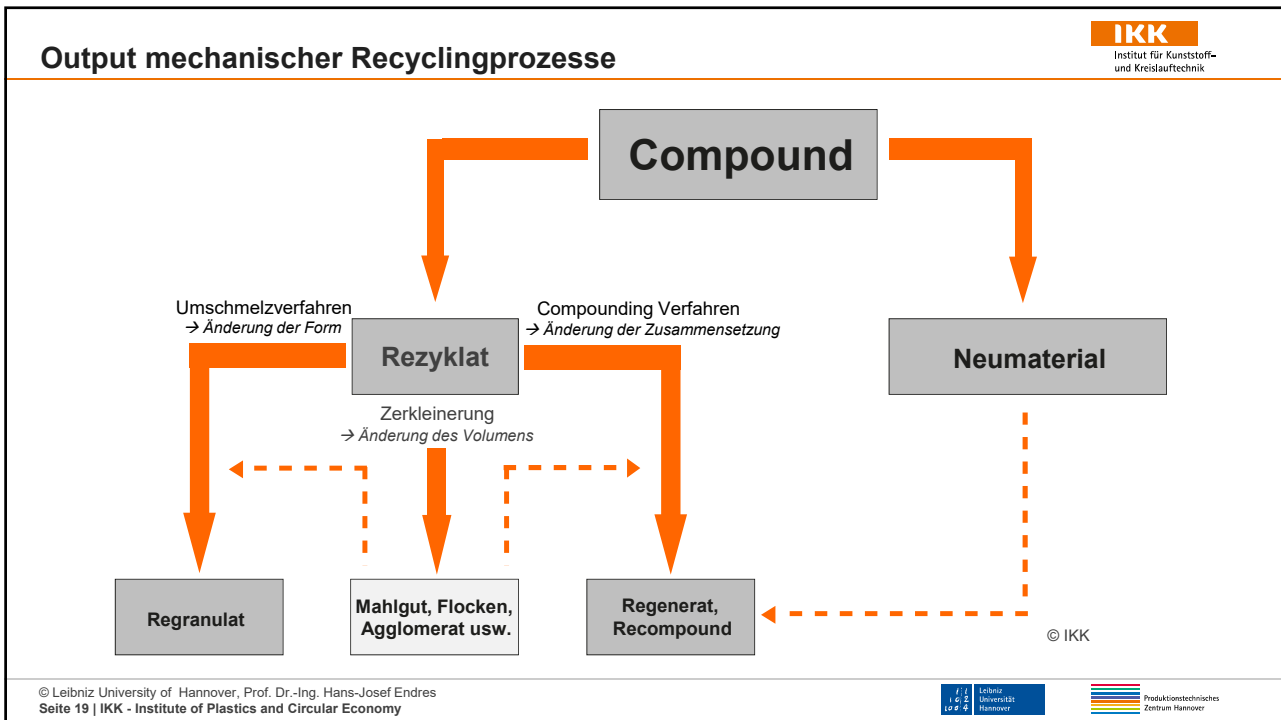


| Bewertung der Verfahren – mechanisches vs. chemisches Recycling |  |  |
|---|--|--|
|   | Mechanisches Recycling   | Chemisches Recycling                                 |
| Technische Anforderungen an die Infrastruktur / Prozesse        | + (niedrig)  | - (hoch)   |
| Möglichkeit der dezentralen Weiterverarbeitung                  | + (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                             | +<br>0/+ (LCA-Datenlücken)   | 0 /<br>- (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





© Leibniz University of Hannover, Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres  
Seite 19 | 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

| Eigentum                     | 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, regranulate  |       | 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

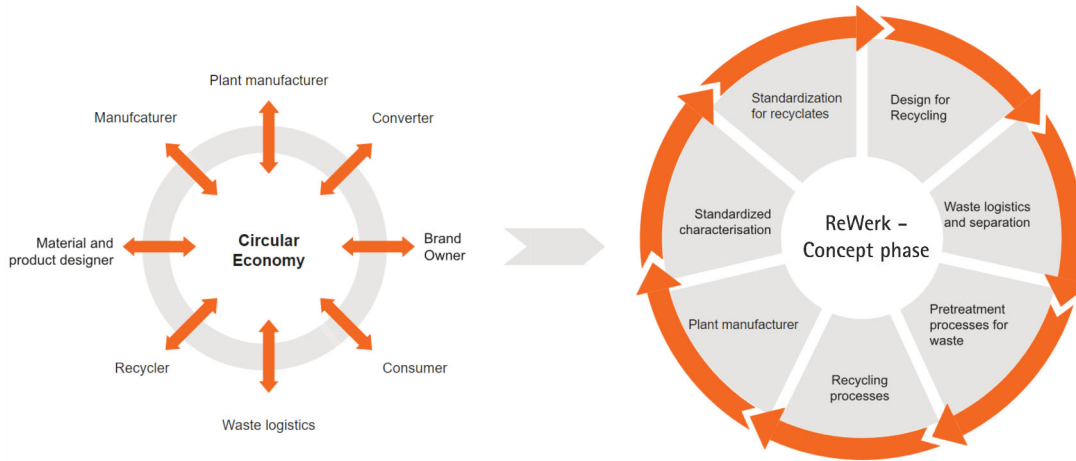
... + verschiedene optionale Charakteristika

| 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           |

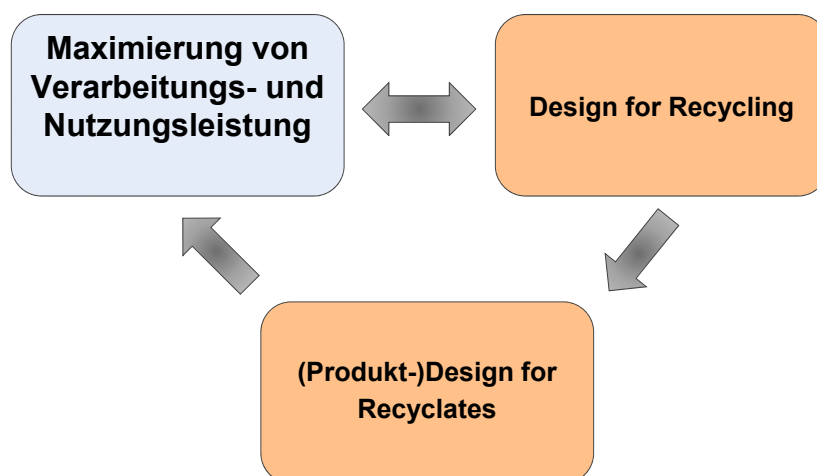
| Optional characteristic                      | Example (standards)  | Property | Information |
|--|--|----------|-------------|
| Further details about the recycling process  | drying, density separation, dedusting                                      |          | X           |
| Known additives                              | 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<br>DIN CEN/TS 17627                                |          | X           |
| Intended or non-intended use of the material | Intended use: injection moulding, blow film<br>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           |

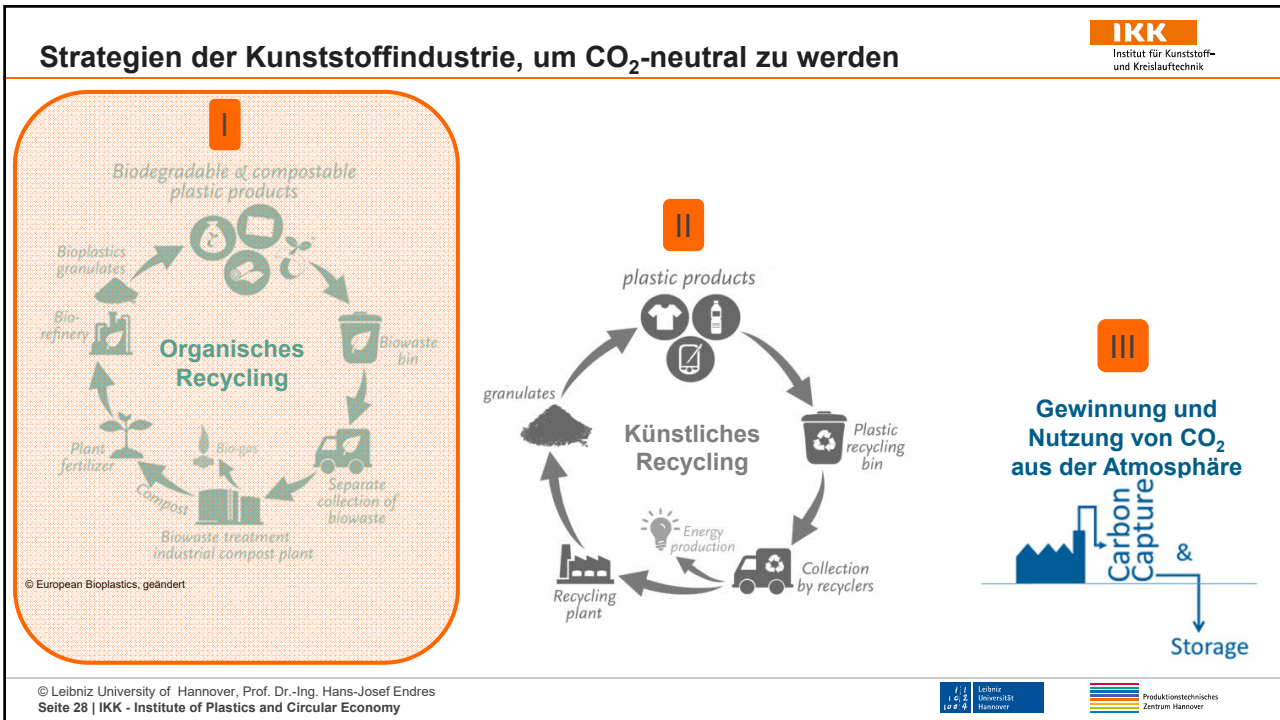
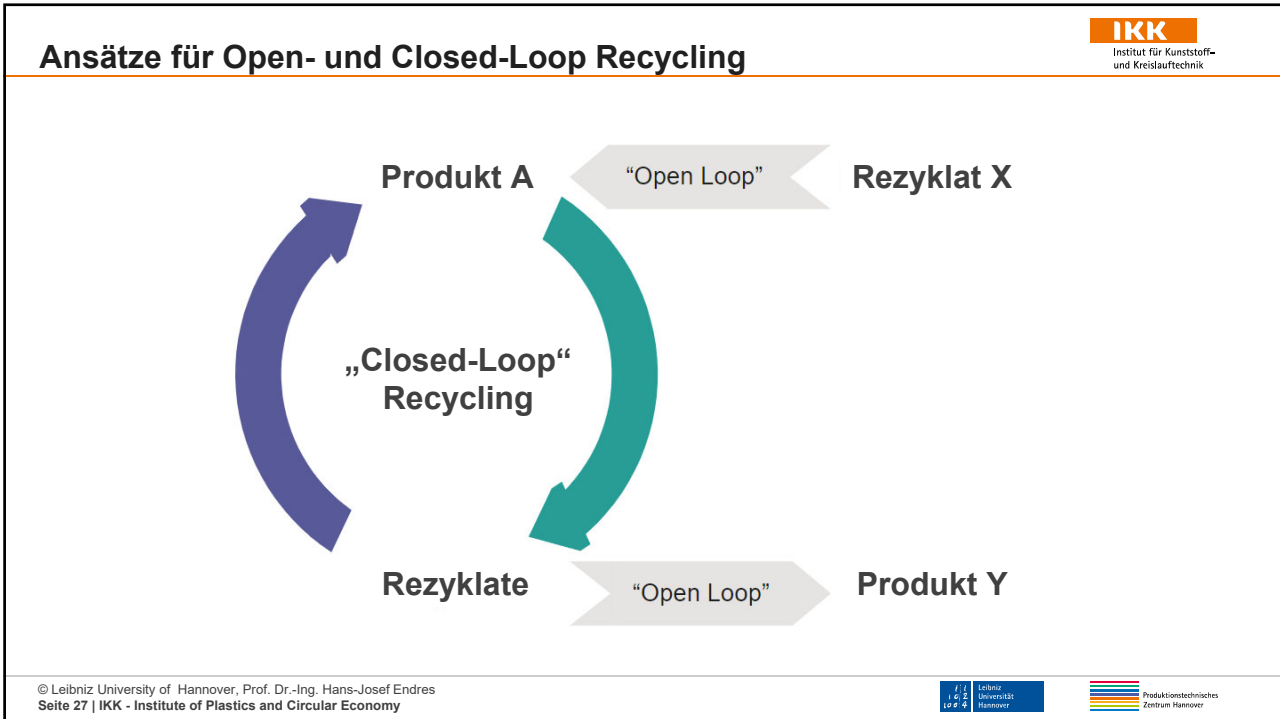
## Alle Beteiligten werden gebraucht, um eine Kreislaufwirtschaft zu etablieren

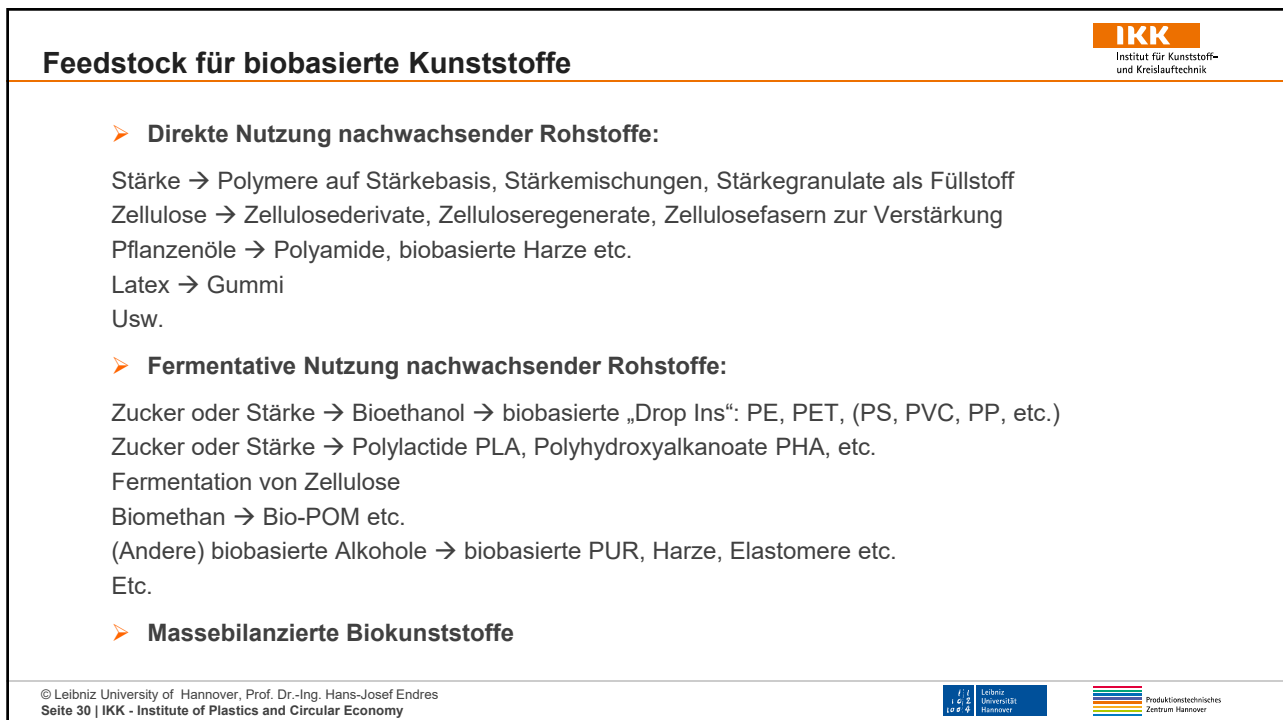
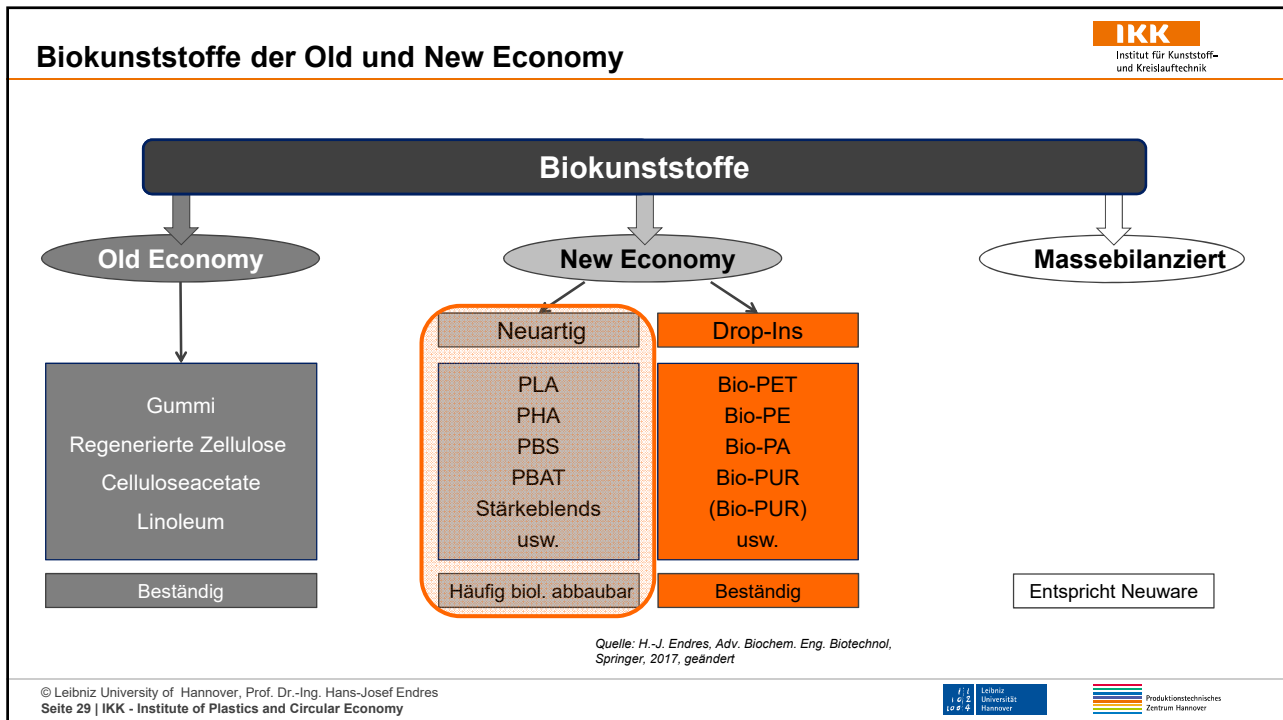
- Statt Einzelaktivitäten braucht es neue Partnerschaften entlang der gesamten „Wertschöpfungskette Recycling“, um eine Kreislaufwirtschaft zu etablieren



## Design for Recycling

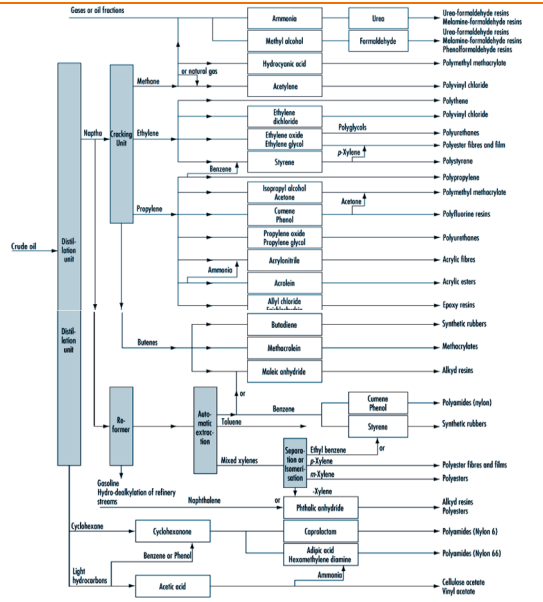




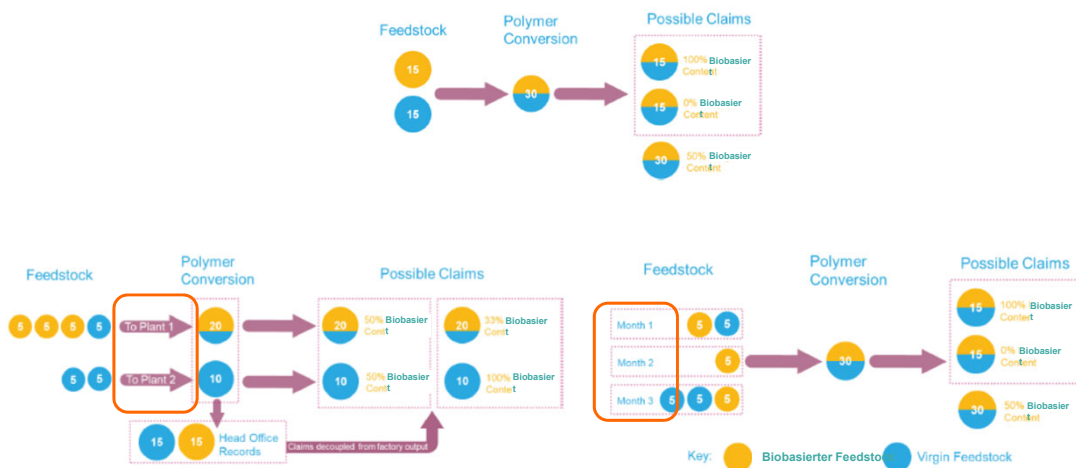


## Neuer Feedstock für die Chemieindustrie

- 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



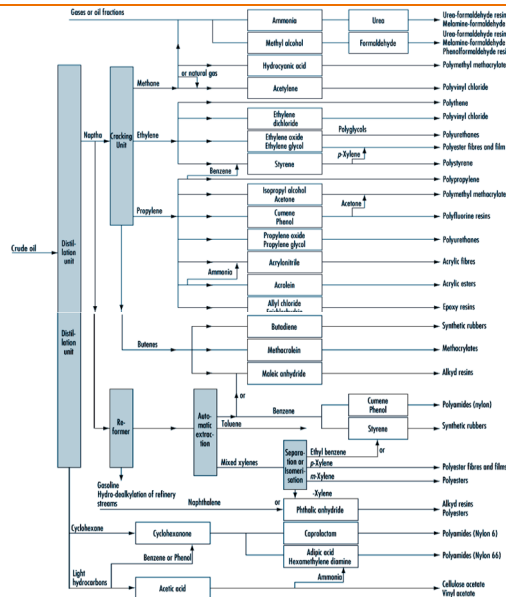
(Quelle: Eunomia Research Consulting Ltd., 2020, geändert)



## Neuer Feedstock für die Chemieindustrie



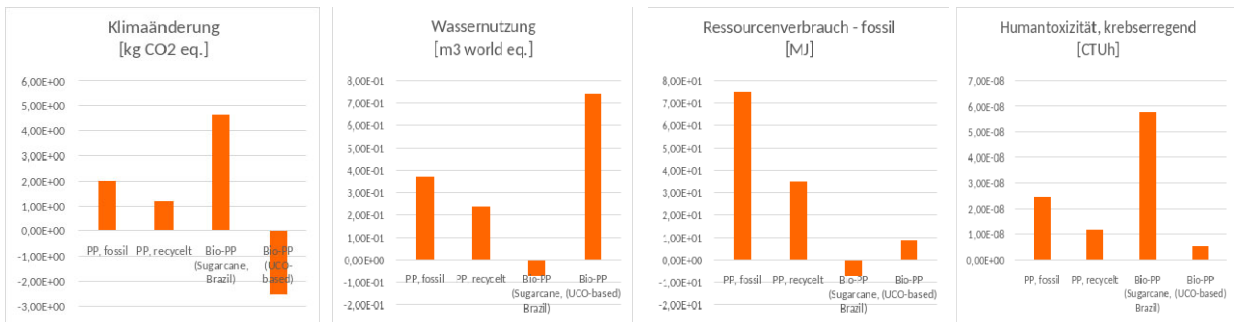
- Naphtha-Cracker (hauptsächlich EU)
  - Feedstock: 100 % Rohöl (→ C3 – C6)
  - Feedstock: Tallöl, UCO oder HVO  
→ Bio-Naphtha (C3 – C12/C16)
  - Feedstock: **Polymer (Polyolefine)**  
→ **Pyrolyseöl** → **Erneuerbares Naphtha**
- Gas-Cracker (USA)
  - Ethan, Propan, + X-Gemisch
  - Schiefergas (Ethan-Cracker)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

