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

Kunststoffrecycling - Perspektiven und Herausforderungen

Hans-Josef Endres
IKK – Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

1st Clausthal Conference on Circular Economy 23.-24. November 2023

Leibniz Universität Hannover
Produktionstechnisches Zentrum Hannover

Professional Career

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

RUHR UNIVERSITÄT BOCHUM RUB

1991 Dipl.-Ing.

1995 Dr.-Ing.

thyssenkrupp

1991 - 1999 Area Manager

HOCHSCHULE HANNOVER UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES AND ARTS, Fakultät II Maschinenbau und Bioverfahrenstechnik

1999 Professor

IfBB Institute for Bioplastics and Biocomposites

2011 Institute Director

Fraunhofer HOFZET WKI

2013 Head of Department

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

2019 Institute Director

Leibniz Universität Hannover
Produktionstechnisches Zentrum Hannover

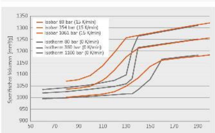
IKK – Institute of Plastics and Circular Economy
Leibniz Universität Hannover

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

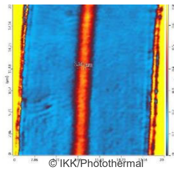
© Guido Marschall

© Nico Niemeyer

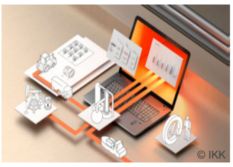
Plastics Technology and Recycling | Plastics Analytics | IKK | Sustainability Assessment | Material Testing



© Göttfert

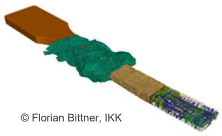


© IKK/Photothermal

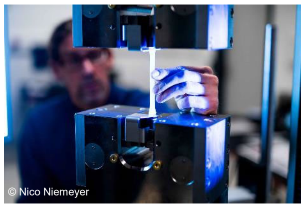


© IKK

© Nico Niemeyer



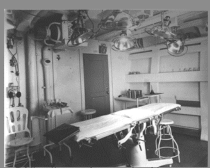
© Florian Bittner, IKK



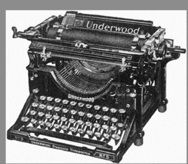
© Nico Niemeyer

Plastics as amazing, innovative, unique Materials

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik



© https://www.urbanremainschicago.com



© Popular Science, 1992

© www.fotosearch.com

»»

©MAQUET

© www.pixabay.com

© www.pixabay.com

© www.pixabay.com

© www.pixabay.com

© www.pixabay.com

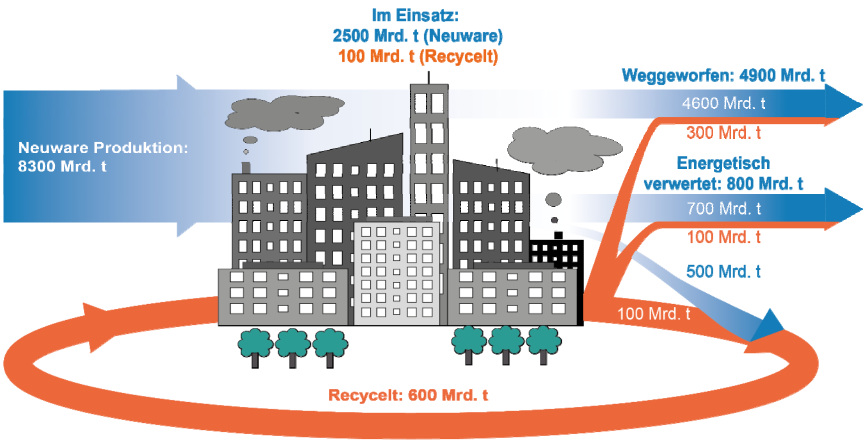
Plastics – good, bad or both?

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

Source: www.uunsplash.com

Weltweite Produktion, Verwendung und Verbleib von Kunststoffen, Kunststofffasern und Additiven (1950 bis 2015)

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

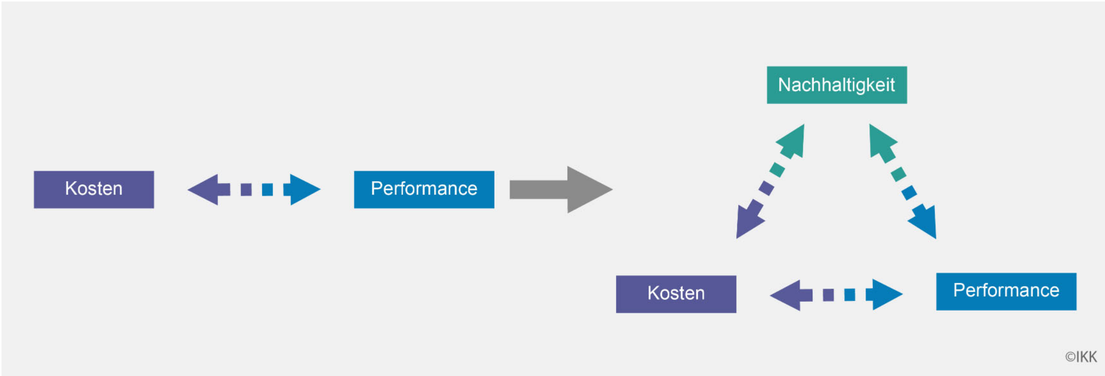


*Eigene Darstellung in Anlehnung an Geyer, R., et. al. (**2017**), Science Advances 3 (7)*

- Kunststoffe werden in reiner Form oder in Kombination verwendet: faserverstärkte Kunststoffe, Materialverbunde, gefüllte Kunststoffe, usw.

Übergeordnete Ziele in der Kunststoffindustrie

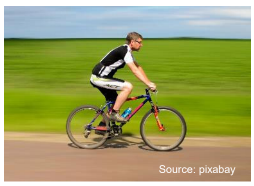
IKK
Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik



Endres, H.-J., Qua vadis Kunststoffrecycling, Kunststofftechnik, 2023

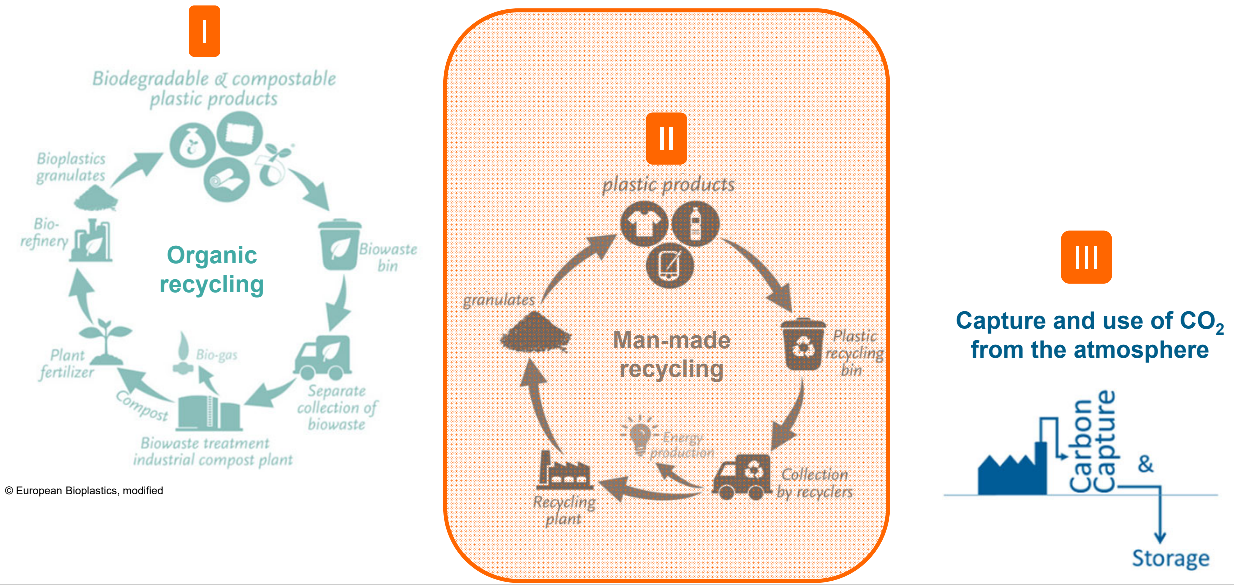
Kann menschliches Handeln nachhaltig sein?

IKK
Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik



Approaches for the plastic industry to become CO_2-neutral

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik



© European Bioplastics, modified

Scope

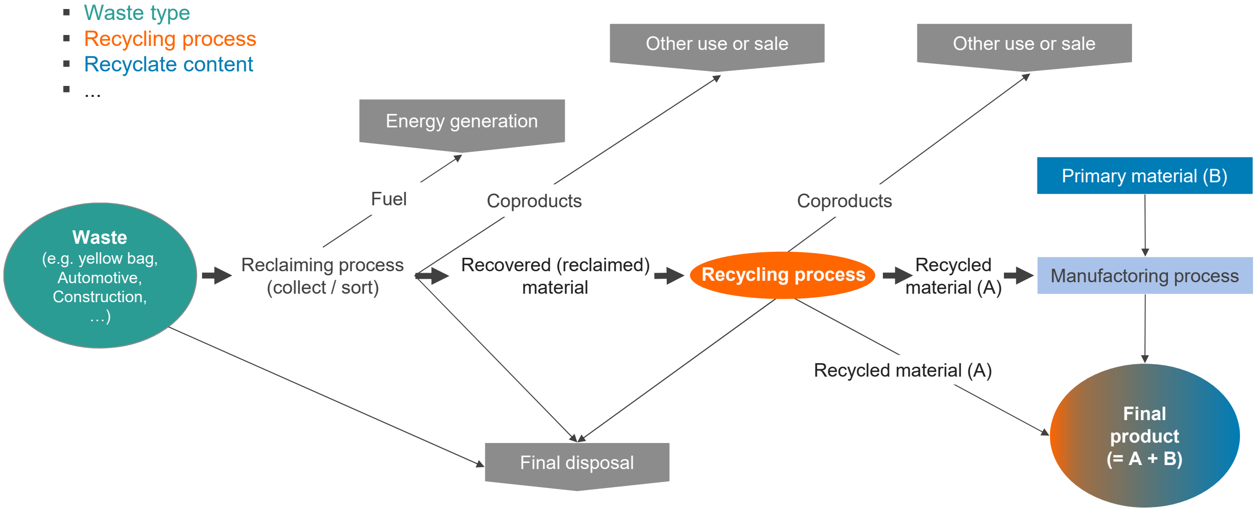
IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

- When is a recyclate a recyclate?
- How much recyclate must be in there, so that a recyclate can also be called as recyclate?
- What are mass-balanced recyclates or mass-balanced bioplastics?
- Which recycling processes will have a quota effect, e.g. for the plastic tax?
- Do all recycling processes lead to the same result?
- How can a recycled or biobased feedstock be proved?
- How can sustainability in plastic recycling be assessed and who “owns” the credit?
- Do we have enough (high quality) recyclates?
- Are there sufficient standards in the recycling sector?
- Who is liable for the quality of the recyclates or who bears the liability risk?

Recycling system – Input

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

- Definition of recyclate with regard to
  - Waste type
  - Recycling process
  - Recyclate content
  - ...



ISO 14021:2016 - Environmental labels and declarations – Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling)

The classification of plastic recyclates as post-consumer recyclate (PCR) and post-industrial recyclate (PIR) depends only on the origin of the waste

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

Only waste as input stream leads to recyclates as output, i.e. input must have been declared as waste prior to recycling according with existing standards and EU guidelines (Directive 2008/98/EC)
The use of by-products does not lead to recyclates, even if primary material can be replaced as a result

Types of waste related to recycling (ISO 15270:2008 and ISO 427:2013)

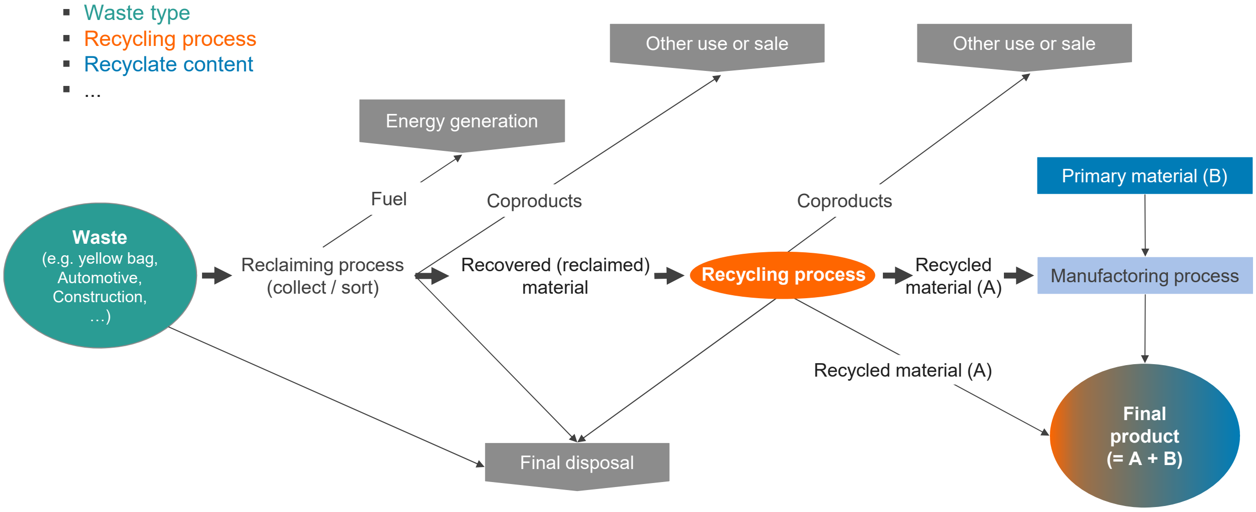
- **Post-consumer**: material, generated by the end-users of products, that has fulfilled its intended purpose or can no longer be used (including material returned from within the distribution chain)
- **Post-Industrial**: material diverted during a manufacturing process
  - NOTE 1 The term "**pre-consumer material**" is sometimes used synonymously
  - NOTE 2 This term **excludes** re-utilized material, such as rework, regrind or scrap that has been generated in a given process and is capable of being reclaimed within **that same process**

not quota effective!

- What is „that same process"? Same production line, same product, same company?
- Which materials can be used for the manufacture of post-consumer recyclates (PCR) and post-industrial recyclates (PIR)?
- Which materials cannot be used for the manufacture of recyclates, i.e.neither PIR or PCR?

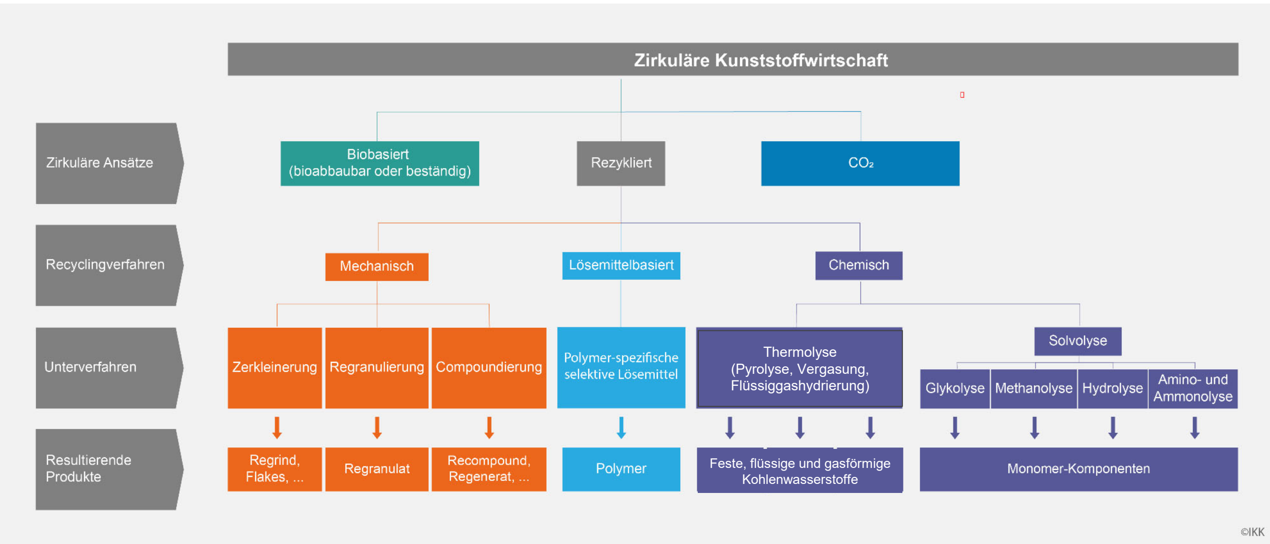
Recycling system – Recycling processes

- Definition of recyclate with regard to
  - Waste type
  - Recycling process
  - Recyclate content
  - ...



ISO 14021:2016 - Environmental labels and declarations – Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling)

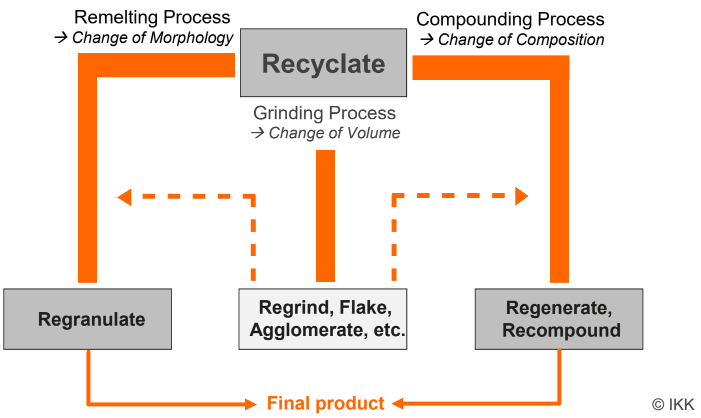
Übersicht Recyclingprozesse



Quelle: Endres, H.-J., Quo vadis Kunststoffrecycling, Kunststofftechnik 2023

Mechanical Recycling Processes

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

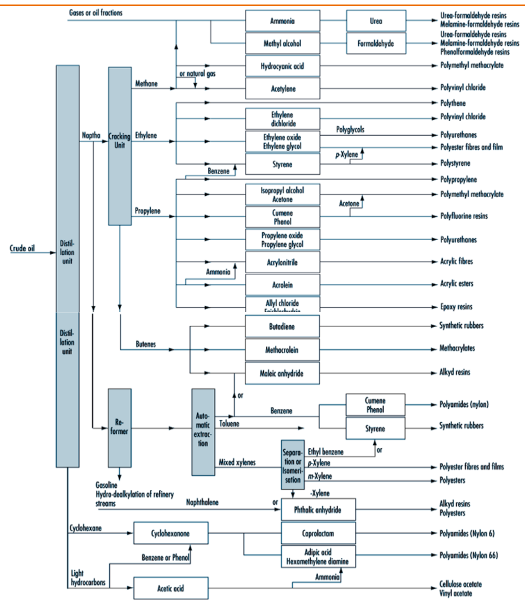


Quelle: Endres, H.-J., Quo vadis Kunststoffrecycling, Kunststofftechnik 2023

New feedstock for chemical industry

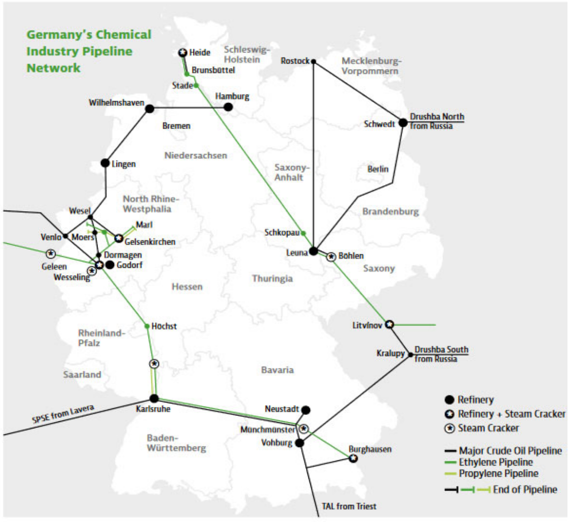
IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

- Naphtha cracker (mainly EU)
  - Feedstock: 100% crude oil (→ C3 – C6)
  - Feedstock: Tall oil, UCO or HVO
    → Bionaphtha (C3 - C12/C16)
  - **Feedstock: Polymers (Polyolefines)**
    → Pyrolysis oils → Renewable naphta
- Gas cracker (USA)
  - Ethane, propane, +X mix,
  - Shale gas (ethane cracker)
  - Biogas / Bio-methane
  - **Pyrolysis gases**



Pipeline network for distribution of biobased and recycled feedstocks

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik




Rotterdam

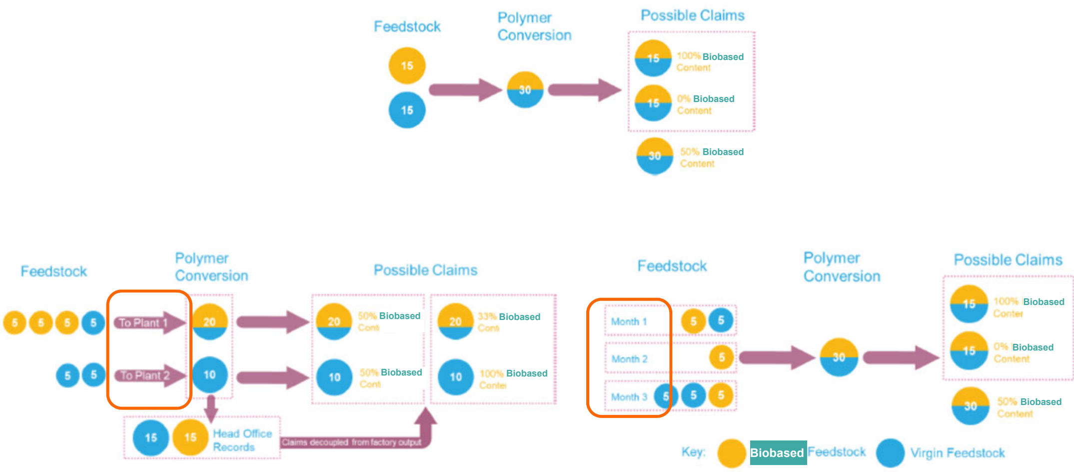

Wesseling (Ruhrgebiet)


BASF Ludwigshafen

Traceability difficult → mass balance certification

Mass Balance Approach

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

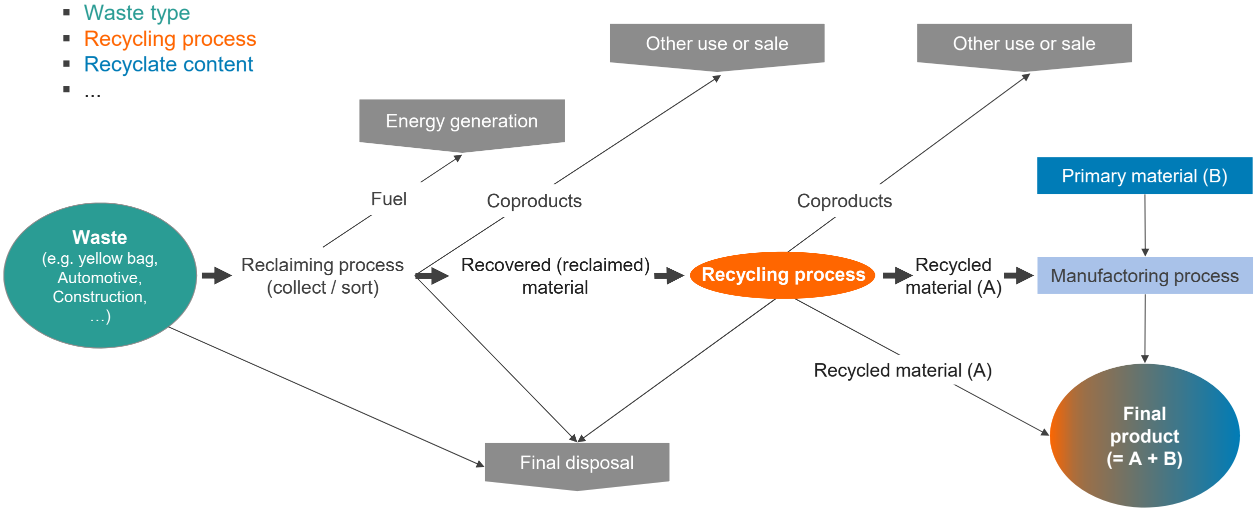


(Source: Eunomia Research Consulting Ltd., 2020, modified)

Recycling system
Simplified diagrammatic representation

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

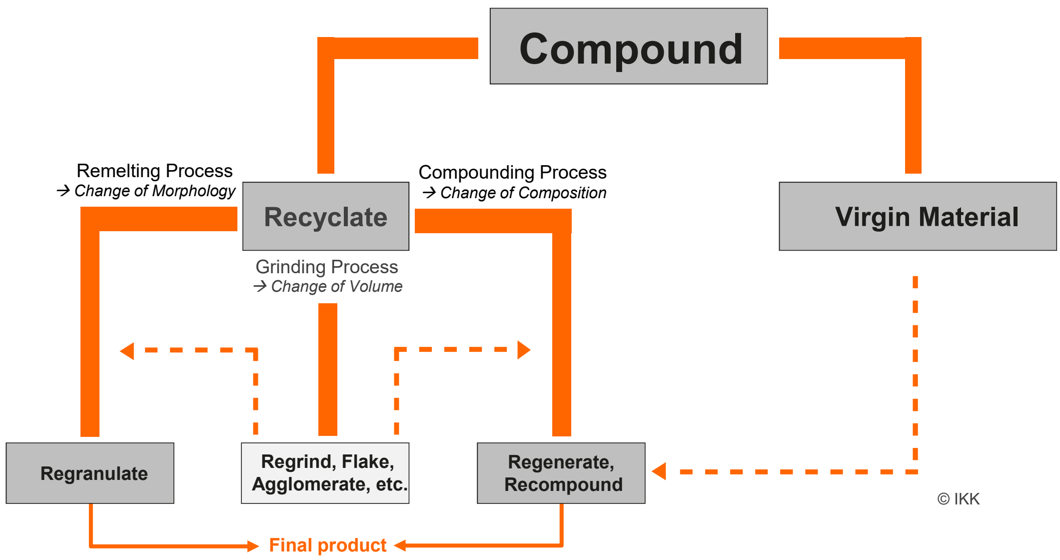
- Definition of recyclate with regard to
  - Waste type
  - Recycling process
  - Recyclate content
  - ...



ISO 14021:2016 - Environmental labels and declarations – Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling)

Mechanical Recycling Processes

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik



Quelle: Endres, H.-J., Quo vadis Kunststoffrecycling, Kunststofftechnik 2023

Assessment of processes - mechanical versus chemical recycling

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

Property	Mechanical Recycling	Chemical and solvent based Recycling
Technical requirements for infrastructure / processes	+ (low)	- (high)
Possibility of decentralized processing	+ (possible)	- (currently technically challenging and uneconomical)
Requirement on quality for input stream	- (medium - high)	0 (low - medium)
Quality of output material	0/- (proportional to the quality of input material. Moderate quality improvement using process parameters and additives is possible and is inversely proportional to the technical expense)	+ (very high)
Food regulatory approval of the output	0 (in special cases PE (and HDPE) possible)	+ (high)
Possibility of multiple recycling	0 (limited)	+ (high)
Industrial maturity	+ (high)	0 (depending on process, not fully mature)
Cost	+ (low)	- (high)
Environmental assessment / Quality of data	+ / LCA data gaps	0 / almost no data

Source: H.-J. Endres: Recycling and circular economy are not always the same, Polyproblem-Report 2 / 2020, Röchling Stiftung, modified

Challenges for plastics recycling

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

Recycling
Definition with regard to content / characterisation

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

General information

- There is no regulation regarding min. recycled content in plastic mixtures
  - Plastic mixtures composing of virgin and recycled plastic may also be called recycling
- There is no regulations regarding recycling process, e.g.
  - Mechanical recycling vs chemical recycling

Polymer-specific standards for recycling characterisation

- Recycled content
- Other polymers
- Fillers
- Additives

EN 15345, DIN SPEC 91446

Recycled content in product (X %) $= \frac{mass\ recyclate\ in\ product}{total\ mass_{product}} * 100$

but DIN EN 17615

Recycled content in product (X %) $= \frac{mass\ recycled\ plastic\ in\ product}{total\ mass_{product}} * 100$

Characterisation of Polypropylene (PP) recyclates DIN EN 15345

Property	Uni	Test method
Required data		
Color		Visual examination
Density	kg/m³	EN ISO 1183-1
Impact strength	kJ/m²	EN ISO 179-1,-2 or EN ISO 180
Melt mass flow rate	g/10 min	EN ISO 1133
Form		Visual examination
Optional data		
Ash content	%	EN ISO 3451-1
Bulk density	kg/m³	Annex A
Other polymers	%	Thermal analysis / IR
Bending properties	MPa	EN ISO 178
Filtration grade	µm	Mesh size
Recycled content	%	EN 15343
Yield stress	%	EN ISO 527-1,-2
Elongation at break	%	EN ISO 527-1,-2
Content of volatiles	5	EN 12099, etc.

Leibniz Universität Hannover — Produktionstechnisches Zentrum Hannover

Recycling
Definition in relation to content - Polymer-specific standards

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

Legend: M – mandatory (gefordert), O - optional

Property	Definition process	DIN EN 15342 PS	DIN EN15344 PE	DIN EN 15345 PP	DIN EN 15346 PVC	DIN 15348 PET
Original use	To be definded by supplier	O				
Form	Visual examination	M	M	M	M	M
Recycled Content	EN 15343			O		
Color	Visual examination	M	M	M	M	M: Visual examination O: EN ISO 11664-4
Teilchengröße	ISO 22498	M: Verfahren entsprechend der Teilchenart und dem Korngrößenbereich	M			
Korngrößenverteilung	Normspezifisches Verfahren				M: Anhang D und E	M: max. Korngröße
Schüttdichte	Normspezifisches Verfahren	O: Anhang A	M: Anhang: B	O: Anhang A	M: Anhang B	
Dichte	EN ISO 1183	O: EN ISO 1183-1 oder Verfahren A	O	M: EN ISO 1183-1 oder Verfahren A	O: EN ISO 1183-1 oder Verfahren A	
Feinkornanteil	Normspezifisches Verfahren					M Anhang A
Filtrationsgrad	Maschenweite	O	O	O		
Filtrierfähigkeit	Normspezifisches Verfahren					O: Anhang E
Schmelze-Massenfließrate	EN ISO 1133	M: EN ISO 1133, Bedingung H	M	M: EN ISO 1133, Bedingung M		O: ISO 1133-2
Grenzviskosität (IV)	ISO 1628-5					O
Trockenfließrate	EN ISO 6186				O	
Vicat-Erweichungstemperatur	EN ISO 306	M: EN ISO 306, Verfahren A			O: EN ISO 306, Verfahren B50	
Wärmebeständigkeit	ISO 182-1, EN ISO 182-2, -3, -4				O	
Schlagfestigkeit	EN ISO 179-1, -2, EN ISO 180	M	O	M		
Streckspannung	EN ISO 527-1 oder -2	O	O	O	O	
Bruchdehnung	EN ISO 527-1 oder -2	O	O	O	O	
Biegeeigenschaften	EN ISO 178	O		O		
Härte	ISO 868				M (bei PVC-P)	
Contamination with other polymers	FT-IR or DSC		M (PP and others)	O		
Vorhandensein modifizierter Zusätze	Vom Lieferant anzugeben	O				
Fremdstoffe/Verunreinigungen	Normspezifisches Verfahren		O: Verfahren A, B, C oder D		M: Anhang C	
Gehalt an flüchtigen Bestandteilen	Normspezifische Vorgabe	O: Massenverlust bei 200 °C		O: EN 12099 oder eine andere	O: EN ISO 1269	
Restfeuchte/Wassergehalt	EN 12099	O	O		O	M: Anhang B oder EN ISO 15512
Aschegehalt	EN ISO 3451	O	O	O	M: EN ISO 3451-5 oder Verfahren A	
PVC-Gehalt	Normspezifisches Verfahren					M: Anhang C
Polyolefin-Gehalt	Normspezifisches Verfahren					M: Anhang C
Sonstiger Restgehalt						O: Analyse anhand eines geeigneten Verfahrens: FT-IR, DSC, XRF,...
Alkalität	Normspezifisches Verfahren					O: Anhang D
Verarbeitungstauglichkeit von PVC-Rezyklaten durch Kalandern / ...	Normspezifisches Verfahren				O: Anhang F / Anhang G	

Source: H.-J. Endres, M. Shamsuyeva (2020): Kreislaufwirtschaft braucht bessere Standards - Standards und Qualität von Kunststoff-Rezyklaten – eine Bestandsaufnahme, Plastverarbeiter 6, modified)

Leibniz Universität Hannover — Produktionstechnisches Zentrum Hannover

DIN SPEC 91446 „Classification of recycled plastics by Data Quality Levels for use and (digital) trading"

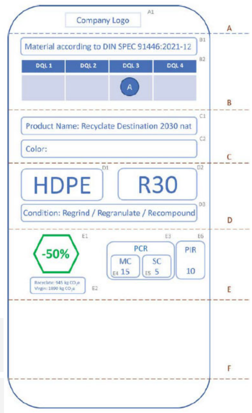
IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

Waste characterisation → Classification of recycled plastics by DQL → Product data sheet and label

©pixabay

	Data Quality Levels			
	1	2	3	4
Information	3	11	12	14
Property	0	3	5	10
Optional characteristics	22			

Increasing information →



* Initiator
** Consortium leader

Zu 2: Normgerechte Charakterisierung und Klassifizierung der Rezyklate nach vier unterschiedlichen Daten-Qualitäts-Leveln (DQL)

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

Verbindliche allgemeine Angaben (=Information)		DQL1	DQL2	DQL3	DQL4
Materialtyp	PE, PP, PET, …	X	X	X	X
Rezyklatgehalt gem. der DIN SPEC Berechnung	X %	X	X	X	X
Verpackung	Oktabins, Sackware, Ballenware, Silo, …	X	X	X	X
Füllstoffgehalt	Mineral X %, Glasfaser X %		X	X	X
Recyclingtechnologie	Mechanisches Recyclingverfahren, lösungsmittelbasiertes Verfahren, …		X	X	X
Zustand	Agglomerat, Flakes, Mahlgut, Regenerat, Regranulat		X	X	X
Chargennummer	Angaben auf der Verpackung oder dem Analysenzertifikat		X	X	X
Ursprung	Konsumer- oder Industrieabfall		X	X	X
Gehalt an anderen Kunststoffen	Daten aus dem Sortierprozess, normierte FTIR, DSC-Messungen			X	X
Zertifizierung des Lieferanten	DIN EN ISO 9001, …				X
Ursprüngliche Verwendung des Materials	Flaschen oder Schalen, Blasformen oder Spritzgießen, gemischte Abfälle, …				X
usw.	…		…	…	…
Summe		**3**	**11**	**12**	**14**
Verbindliche materialtechnische Eigenschaften (= Property)		**DQL1**	**DQL2**	**DQL3**	**DQL 4**
Viskosität	Charakterisierung von Rezyklaten nach DIN EN ISO Standards: thermische, rheologische, chemische und physikalische Eigenschaften		X	X	X
Aschegehalt			X	X	X
Restliche Feuchtigkeit			X	X	X
Dichte				X	X
Schüttdichte				X	X
Chemische Zusammensetzung					X
usw.					…
Summe		**0**	**3**	**5**	**10**
Optionale branchen-, anwendungs-, produkt- und/oder materialspezifische Informationen oder Eigenschaften		**DQL1**	**DQL2**	**DQL3**	**DQL 4**
Härte	Charakterisierung von Rezyklaten nach DIN EN ISO Normen, Standards VDA-, UL-Richtlinien, EFSA, FDA, …	Optionale Angabe bei allen DQL möglich			
Brennbarkeit					
Geruchs- oder Emissionsmessungen					
Lebensmittelkontakt erlaubt					
usw.					
Summe		**22**			

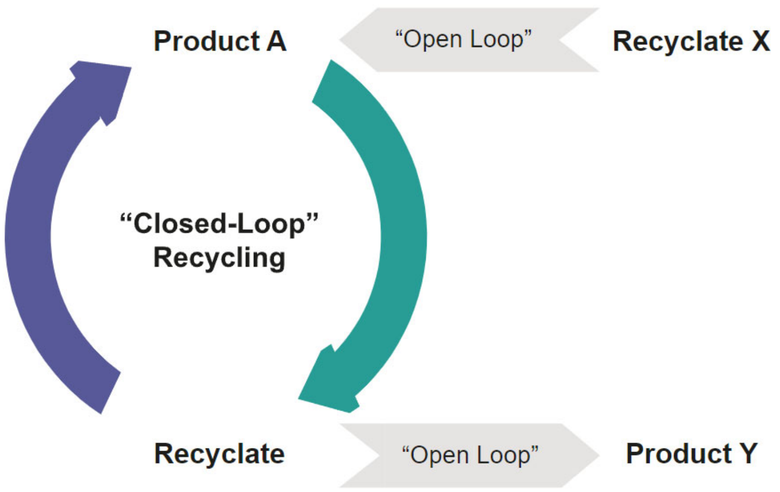
DIN SPEC 91481 „Classification of recycled Polyamides for use and (digital) trading"

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

https://www.din.de/de/forschung-und-innovation/din-spec/alle-geschaeftsplaene/wdc-beuth:din21:358469913

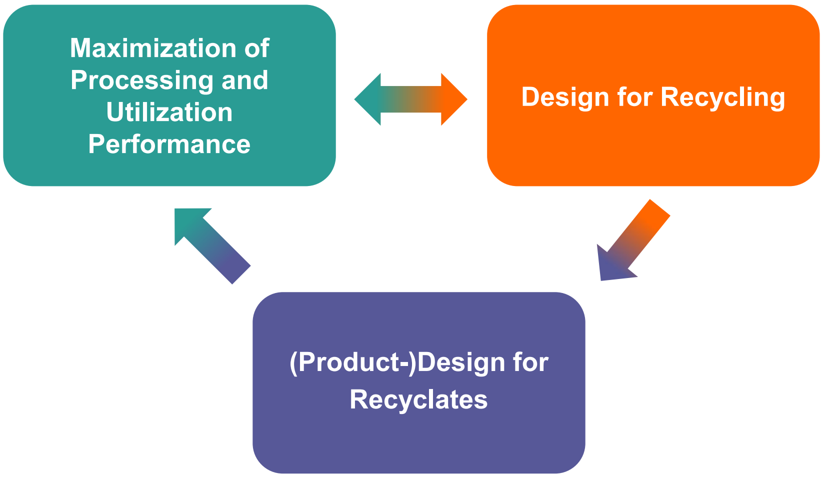
Open and Closed Loop Recycling Approaches

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik



Design for Recycling

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik



Leibniz Universität Hannover · Produktionstechnisches Zentrum Hannover

REKON

Windenergie
End of Life-Rotorblätter

Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur · Demontage & Recycling GmbH AUFWIND · IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

- Materialtechnischer Schwerpunkt: GFK
- Aktueller Stand:
  - Begleitung der Demontage, Zerlegung und Abfallaufbereitung
  - Charakterisierung von Inputströmen

Demontage einer Windenergieanlage durch die Firma *Aufwind Demontage und Recycling GmbH*.

Die Zerkleinerung für das mechanische Recycling

Die Struktur eines Rotorblattes weist eine Vielzahl von Materialien auf

- Vorhandene Dokumentation ist für das Recycling nicht ausreichend
  - Sehr heterogene Zusammensetzung
  - Unterschiedliche Hersteller / Modelle
- Hohe Materialvariation innerhalb eines Rotorblatts (konstruktionstechnisch)
- Weitere und aktuelle Informationen auf der Projektseite verfügbar: https://rekon-recycling.de/

IKK · Leibniz Universität Hannover · Produktionstechnisches Zentrum Hannover

Composites Recycling - State of the Art

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

Januar 2023

IKK - Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V.

Studie ist im Januar 2023 beim AVK erschienen

Die englische Version erscheint Anfang 2024

Die Inhaltsangabe der Studie

Autoren:
H.-J. Endres
M. Shamsuyeva

Leibniz Universität Hannover · Produktionstechnisches Zentrum Hannover

Opportunities for plastics recycling

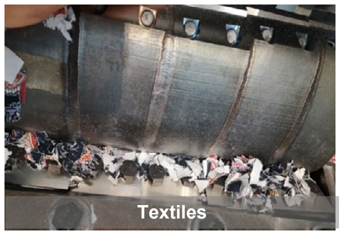
IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

Leibniz Universität Hannover · Produktionstechnisches Zentrum Hannover

Broadening of input streams for recycling

ELECTRO CYCLING · WWF · SARTORIUS · SIEMENS · GERRY WEBER · IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

© IKK, Celik

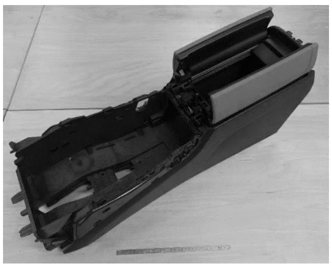


© IKK, Shamsuyeva

© IKK, Celik

Input-adapted disassembly strategies

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

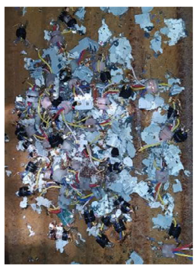


?

or

?

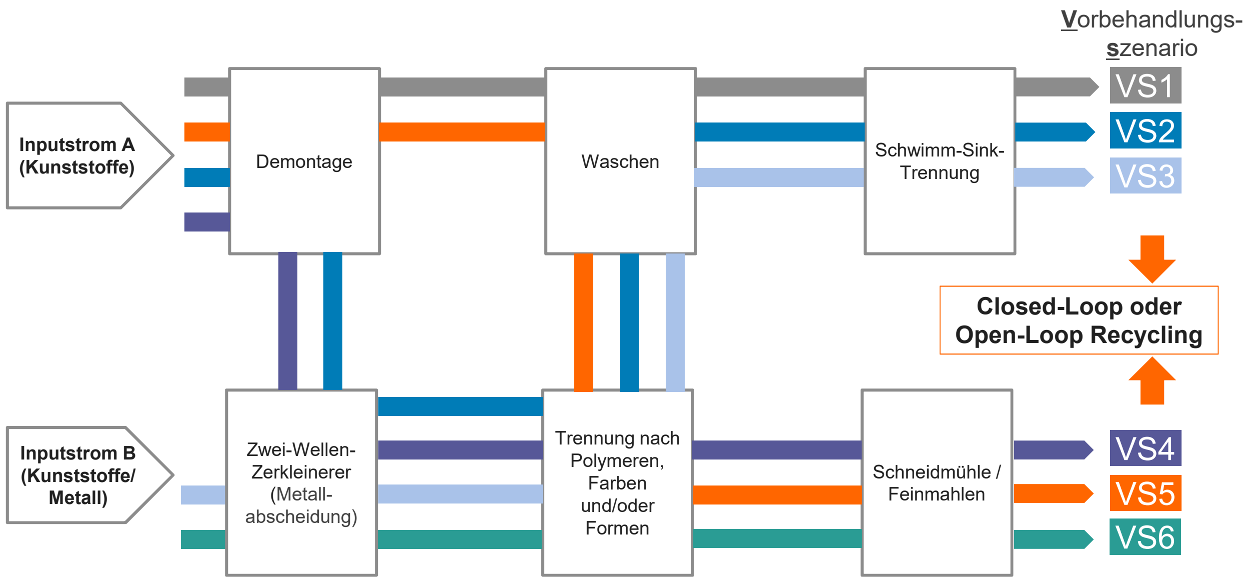
or



Inputspezifische Vorbehandlungsstrategien für effektives, höherwertiges mechanisches Recycling technischer Bauteile

Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik



Inline control of recyclate quality

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

KraussMaffei Extrusion: Tandem Recycling line

© G. Marschall

Erema: Interema 906 TE

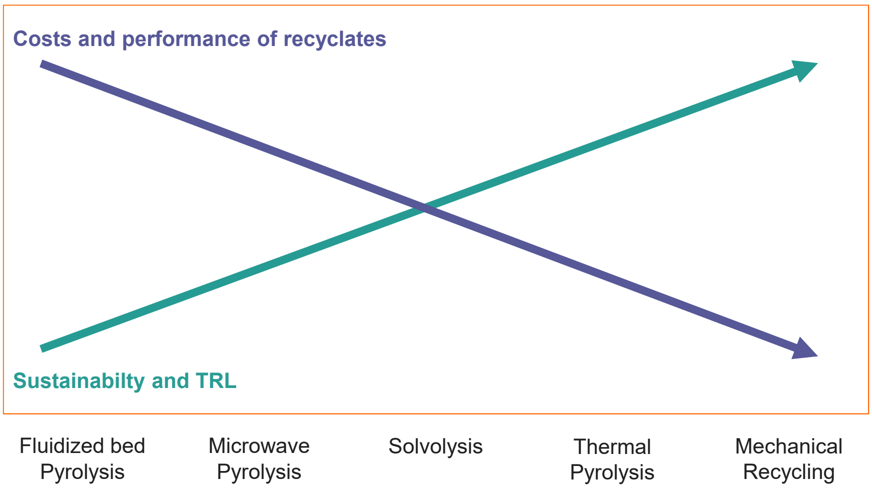
© Nuse Lack, IKK

Additional features for inline control of recyclate quality during the recycling process

- Integrated control of color (feeding of liquid color)
- Inline process analytic of the melt composition
- Inline viscosity control through blending or controlled addition of peroxides
- Improved melt filtration cascades
- Purge gas-injection with nitrogen or carbon dioxide in order to
  - reduce odor or VOC content
  - optimize the process parameters
  - monitor chemical composition to minimize the risk

Comparison of different recycling technologies

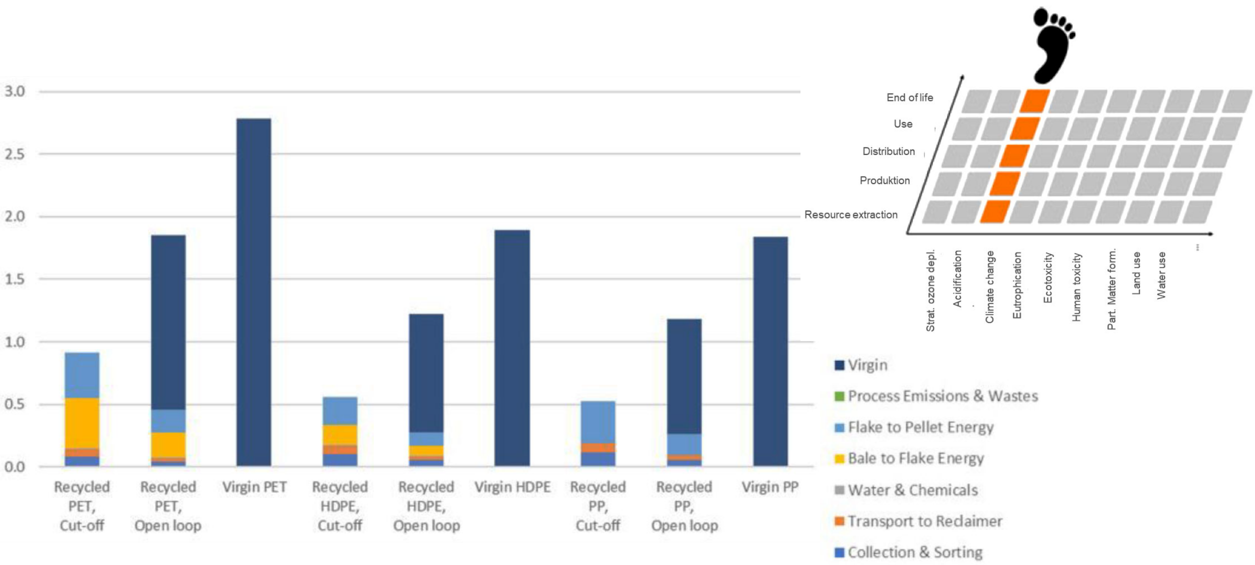
IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik



Slide 37 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy

Example – Mech. recyclates versus virgin materials (Global warming potential kg CO_2-eq./kg)

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

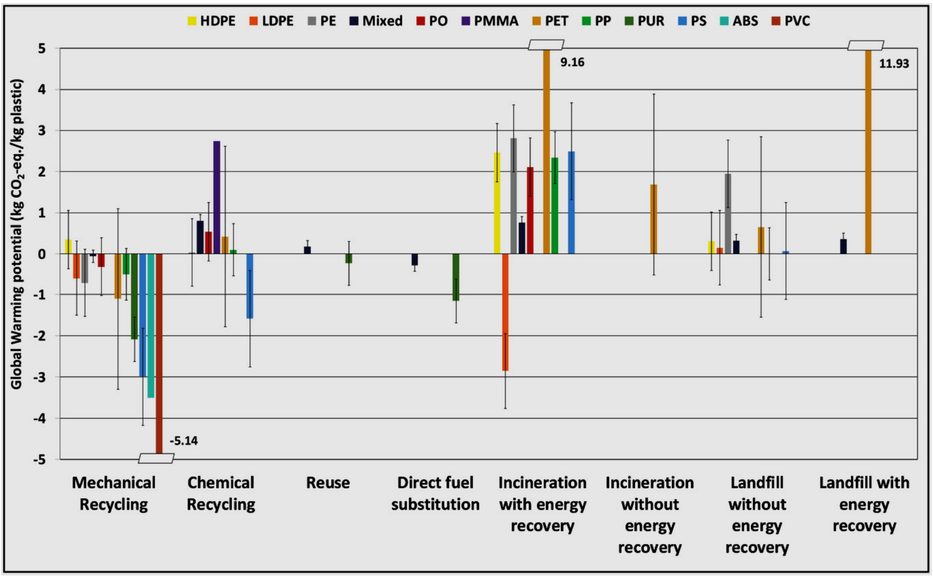


Source: Franklin Associates. 2018

Slide 38 | IKK - Institute of Plastics and Circular Economy

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

Design for Recycling Strategies for Plastics



Source: V. Venkatachalam, H.-J. Endres et al.: Design for Recycling Strategies Based on Life Cycle Assessment and End of Life Options of Plastics in a Circular Economy, Macromolecular Chemistry and Physics, 2022

Leibniz Universität Hannover | Produktionstechnisches Zentrum Hannover

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

Multifunctionality End-of-Life - 11 formulas

Table 1 Overview of the 11 analysed EoL formulas

Formula	Name	Formula
1a	0:100, no credit	$EF = E_V + R_2 \times E_{recycling,EoL} + (1-R_2) \times E_D$
1b	0:100, credit for avoided virgin production[a]	$EF = E_V + R_2 \times \left(E_{recycling,EoL} - E^*_V \times \frac{Q_s}{Q_P}\right) + (1-R_2) \times E_D$
2	100:0, no credit	$EF = (1-R_1) \times E_V + R_1 \times E_{recycled} + (1-R_2) \times E_D$
3a	100:100, no credit	$EF = (1-R_1) \times E_V + R_1 \times E_{recycled} + R_2 \times E_{recycling,EoL} + (1-R_2) \times E_D$
3b	100:100, credit for avoided virgin production[a]	$EF = (1-R_1) \times E_V + R_1 \times E_{recycled} + R_2 \times \left(E_{recycling,EoL} - E^*_V \times \frac{Q_s}{Q_P}\right) + (1-R_2) \times E_D$
3c	100:100, credit for avoided production of mix at input side[b]	$EF = (1-R_1) \times E_V + R_1 \times E_{recycled} + R_2 \times \left(E_{recycling,EoL} - E^*_V \times \frac{Q_s}{Q_P}\right) + (1-R_2) \times E_D$
3d	100:100: crediting for avoided virgin production a ratio of $\min(R_2, \lvert R_2-R_1 \rvert)$[a]	$EF = (1-R_1) \times E_V + R_1 \times E_{recycled} + R_2 \times E_{recycling,EoL} - \min(\mathrm{abs}(R_2-R_1), R_2) \times E^*_V \times \frac{Q_s}{Q_P} + (1-R_2) \times E_D$
4a	50:50, no credit	$EF = (1-R_1) \times E_V + \frac{R_1}{2} \times E_{recycled} + \frac{R_2}{2} \times E_{recycling,EoL} + (1-R_2) \times E_D$
4b	50:50, credit for avoided virgin production a ratio of $R_2/2$[a]	$EF = (1-R_1) \times E_V + \frac{R_1}{2} \times E_{recycled} + \frac{R_2}{2} \times \left(E_{recycling,EoL} - E^*_V \times \frac{Q_s}{Q_P}\right) + (1-R_2) \times E_D$
5	BPX 50/50_adapted[a, c]	$EF = \left(1-\frac{R_1}{2}\right) \times E_V + \frac{R_1}{2} \times E_{recycled} + \frac{R_2}{2} \times \left(E_{recycling,EoL} - E^*_V \times \frac{Q_s}{Q_P}\right) + \left(1-\frac{R_1}{2}-\frac{R_2}{2}\right) \times E_D$
6	Degressive, linearly	For all except $R_1 = R_2 = 1$: $EF = (1-R_1) \times \left(\frac{(2 \times n-1)}{n^2} \times E_V + \frac{E_D}{n^2}\right) + (1-R_2) \times \left(\frac{E_V}{n^2} + \frac{(2 \times n-1)}{n^2} \times E_D\right) + \frac{R_1}{2} \times E_{recycled} + \frac{R_2}{2} \times E_{recycling,EoL}$ For $R_1 = R_2 = 1$: $EF = \left(\frac{E_V}{n} + \frac{E_D}{n}\right) + 0.5 \times E_{recycled} + 0.5 \times E_{recycling,EoL}$

[a] With $E_V = E_V$ (closed-loop assumed)

[b] With $E_V = (1-R_1) \times E_V + R_1 \times E_{recycled}$ (closed-loop assumed)

[c] The BPX 50/50 approach was slightly adapted to enable differentiating between $E_{recycled}$ and $E_{recycling,EoL}$ and to enable including changes in inherent material properties, i.e. by including Q_s/Q_P

Source: Allacker et al. 2017

Leibniz Universität Hannover | Produktionstechnisches Zentrum Hannover

Europäische Rahmenbedingungen

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

Ziel: Schutz von Ökosystemen

- Abwasser-Richtlinien
- Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie
  - EU Plastic Pact
- Abfallverbringungs-Verordnung
- Abfallrahmen-Richtlinie
  - Bioabfall
  - PCR/PIR
  - EoW
- …

Ziel: Reduzierung von Schadstoffen

- REACH
  - PFAS
  - BPA
  - PVC
  - …
- RoHS
- GHS/CLP
- …

Ziel: Klimaneutraler Kontinent bis 2050

- Energieeffizienz-Richtlinie
- Emission-Richtlinien
  - Fahrzeuge
  - Lärm
  - Industrie-anlagen
  - …
- Digitaler Produktpass
- Life Cycle Analyse
- CO2-Reduktionsziele
  - Lastenteilungs-verordnung
- …

Ziel: 10 Millionen Tonnen p.a. an Rezyklaten bis 2025

- Verpackungs- und Verpackungsabfall Verordnung
- Altfahrzeug Verordnung
- Elektro(nik)abfall Verordnung
- Bauprodukte Verordnung
- Ökodesign Verordnung
  - Textilien & Schuhe
  - Möbel
  - Reifen
  - Matratzen
  - Farben & Lacke
  - Spielzeug
  - Fischernetze & Fanggeräte
  - Chemikalien
  - Kunststoffe & Polymere
  - …
- …

Quelle: TecPart

Vielen Dank

IKK Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik

Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres

IKK - Institut für Kunststoff- und Kreislauftechnik
Leibniz Universität Hannover (LUH)
Fakultät für Maschinenbau
An der Universität 2
D-30823 Garbsen

Tel.: +49 511 762 13302
Mobil: +49 170 4006109
endres@ikk.uni-hannover.de

www.ikk.uni-hannover.de