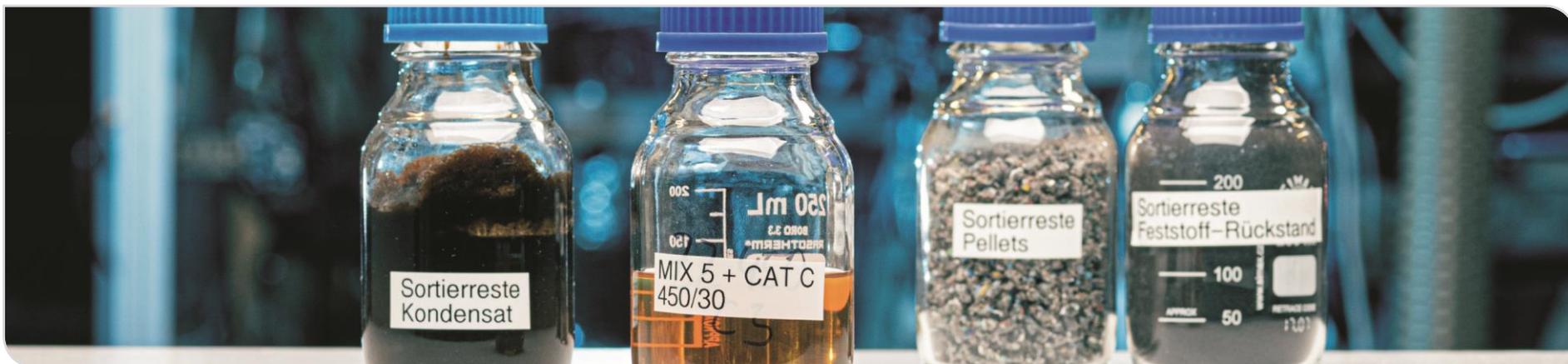


# Techno-ökonomische und ökologische Analyse von Kunststoff-Recyclingtechnologien – eine deutsche Fallstudie

*DVI Online-Seminar Chemisches Recycling: Ausweg oder Irrweg?*

Dr. Rebekka Volk, M.Sc. Christoph Stallkamp

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)



# Vorstellung des Instituts und der Forschungsgruppe

## Projekt- und Ressourcenmanagement in der bebauten Umwelt



### Forschung

- **Techno-ökonomische und ökologische Bewertung von urbanen und industriellen Systemen**, Ressourcenmanagement, Ressourcen-/Energieeffizienz, **Kreislaufwirtschaft**, erneuerbare Energien, Treibhausgasbilanzierung
- Bilderkennung und 3D-Modellierung von Gebäuden, Building Information Modeling (BIM), Urban Mining, Rückbauplanung/-optimierung, Verwertung und Recycling von Bauabfällen, Digitalisierung und Supply-Chain-Optimierung
- Projektmanagement unter Unsicherheit, Scheduling, Operations Research, Entscheidungsunterstützung
- Strategien des nachhaltigen Bauens, der nachhaltigen Stadtentwicklung und des kommunalen Ressourcen-/Flächenmanagements

### Team

Dr.-Ing. Rebekka Volk (Gruppenleiterin)  
M.Sc. Marco Gehring  
M.Sc. Justus Steins  
M.Sc. Mihir Rambhia  
M.Sc. Elias Naber  
M.Sc. Christoph Stallkamp  
M.Sc. Zoe Mayer  
M.Sc. Simon Steffl  
M.Sc. Niklas Braun  
M.Sc. Elena Vollmer  
B.Sc. Susannah König  
B.Sc. Nick Tunder

# Agenda

---

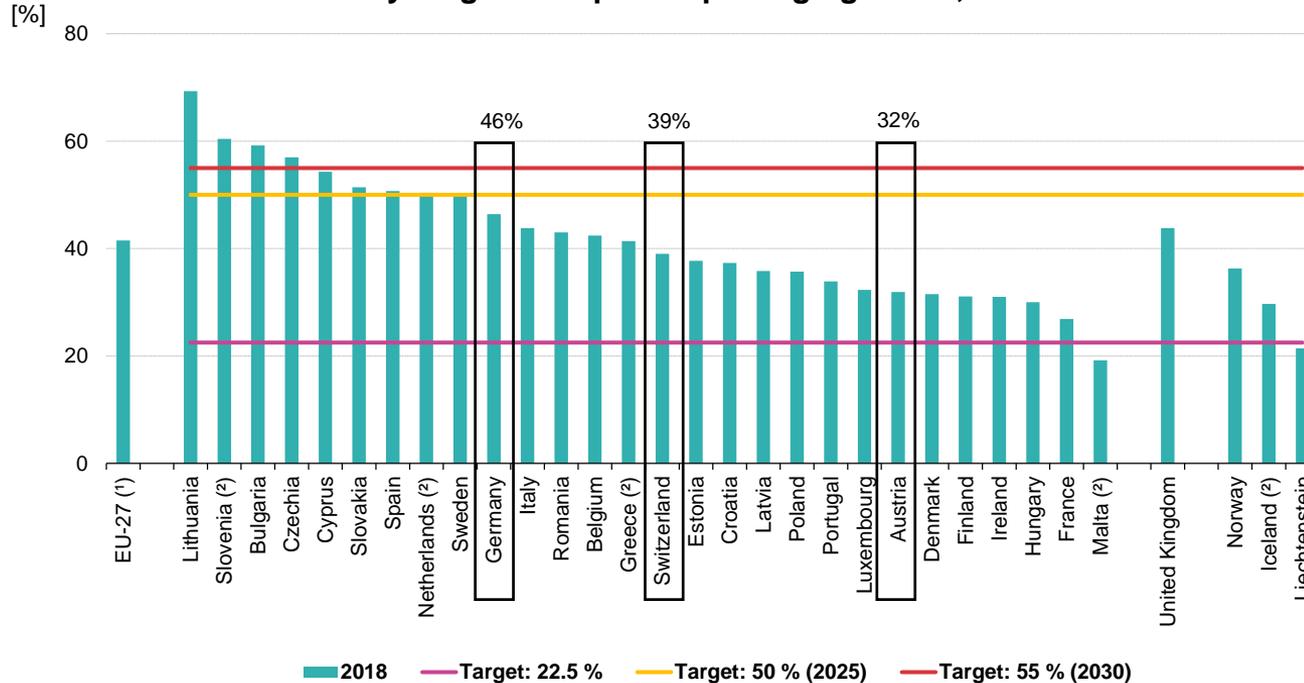
- 1 Motivation
- 2 Studiendesign
- 3 Studienergebnisse und Diskussion
- 4 Schlussfolgerung

Techno-ökonomische und ökologische Analyse von Kunststoff-Recyclingtechnologien – eine deutsche Fallstudie

# MOTIVATION

# Motivation

## Recycling rate of plastic packaging waste, 2018



(1) Eurostat estimates. (2) 2017 data instead of 2018. Source: Eurostat (2020), PlasticsEurope (2020)

Steigender Druck das Potenzial verschiedener Technologien für das Kunststoffrecyclings voll auszuschöpfen.

# Verschiedene Recyclingtechnologien unterstützen eine Kreislaufwirtschaft für Kunststoffverpackungen

## Mechanisches Recycling

- Kombination von konventionelle Sortiertechnologien und sensorgestützte Sortierung
- Separieren der Leichtverpackungsabfälle in homogene Materialströme
- Homogene Kunststoffströme sind Input für Regranulierungsschritte
- Keine Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Kunststoffe
- Qualität des Regranulats hängt von dem Sortiererfolg ab; Verunreinigungen der Materialströme können zum Downcycling führen

## Chemisches Recycling

Solvolyse

Vergasung

Pyrolyse

Thermo-chemische  
Verfahren

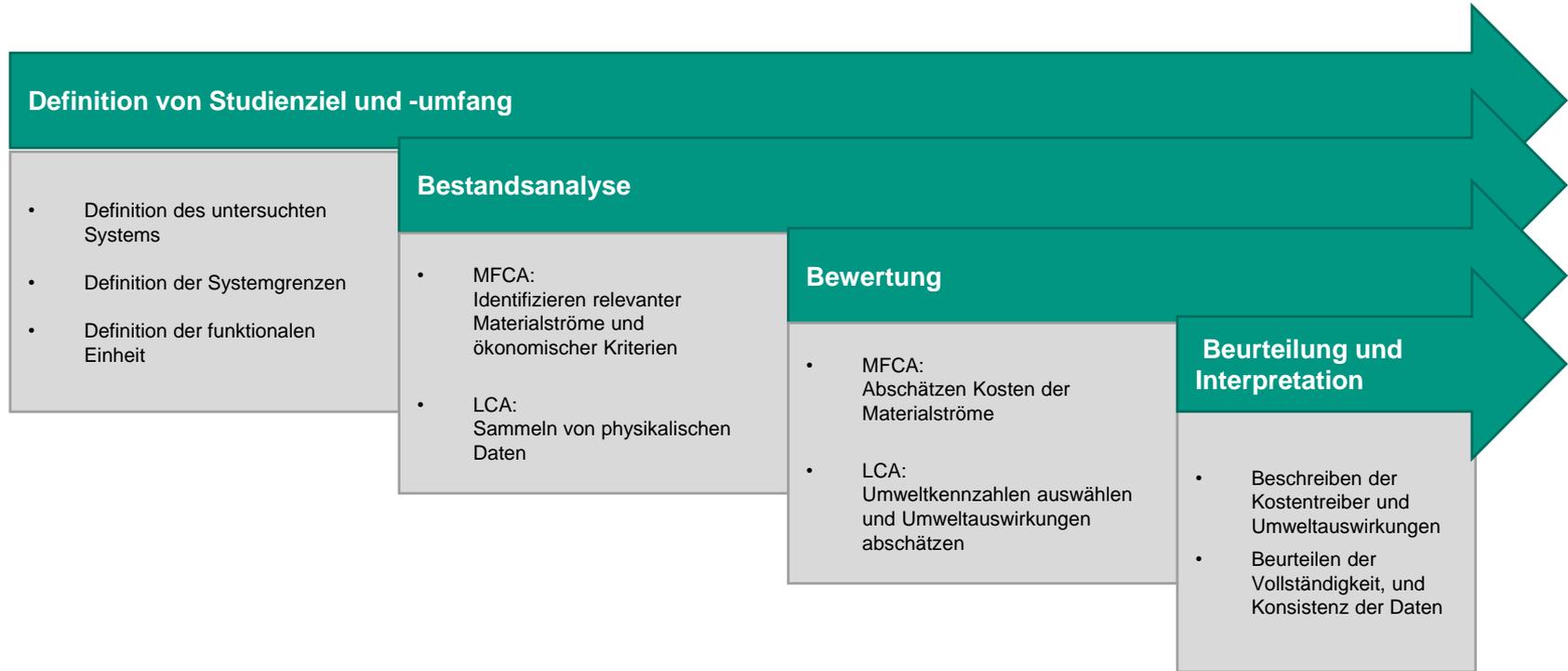
- Thermo-chemisches Recycling kann genutzt werden um Monomere oder Einsatzstoffe für Raffinerien herzustellen
- Über weitere Prozessschritte können erneut Kunststoffe hergestellt werden
- Hergestellte Kunststoffe haben die Spezifikation von Primärmaterial

Die verschiedenen Recyclingtechnologien müssen miteinander vergleichbar gemacht werden.

Techno-ökonomische und ökologische Analyse von Kunststoff-Recyclingtechnologien – eine deutsche Fallstudie

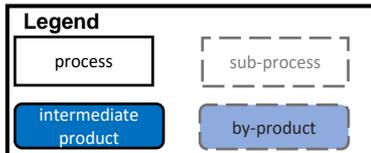
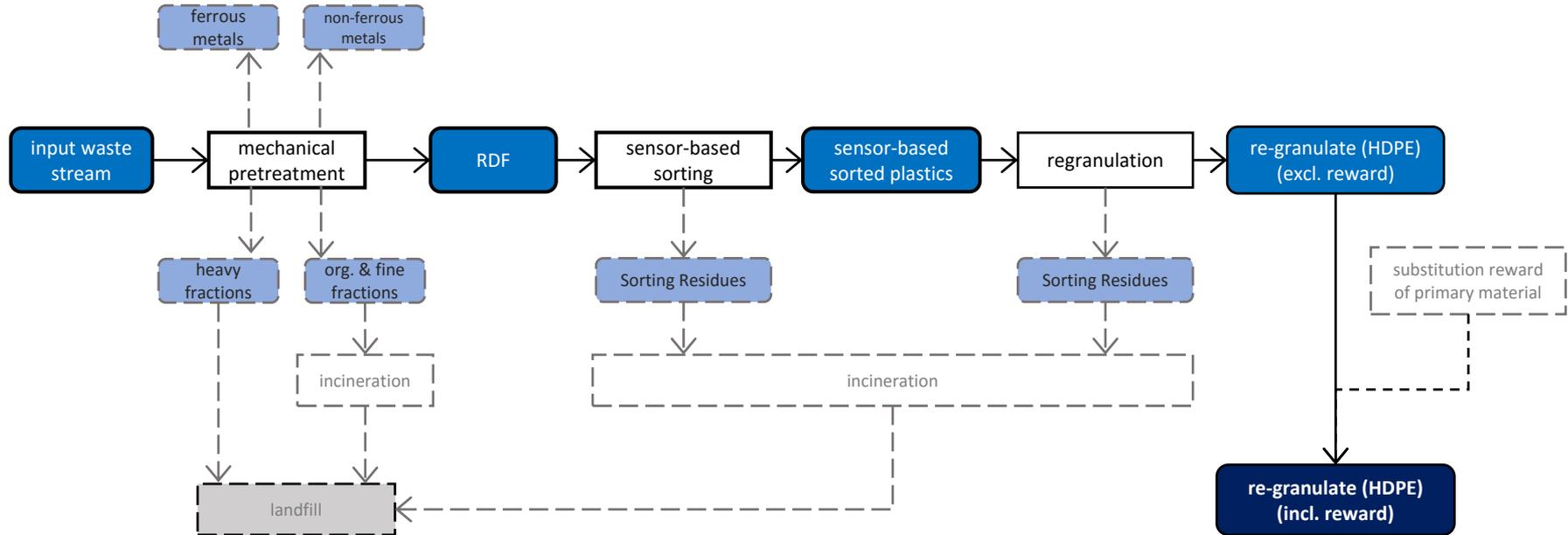
# STUDIENDESIGN

# Integration von LCA und MFCA



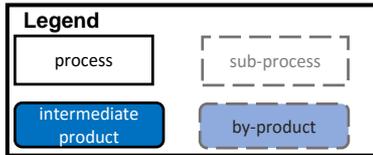
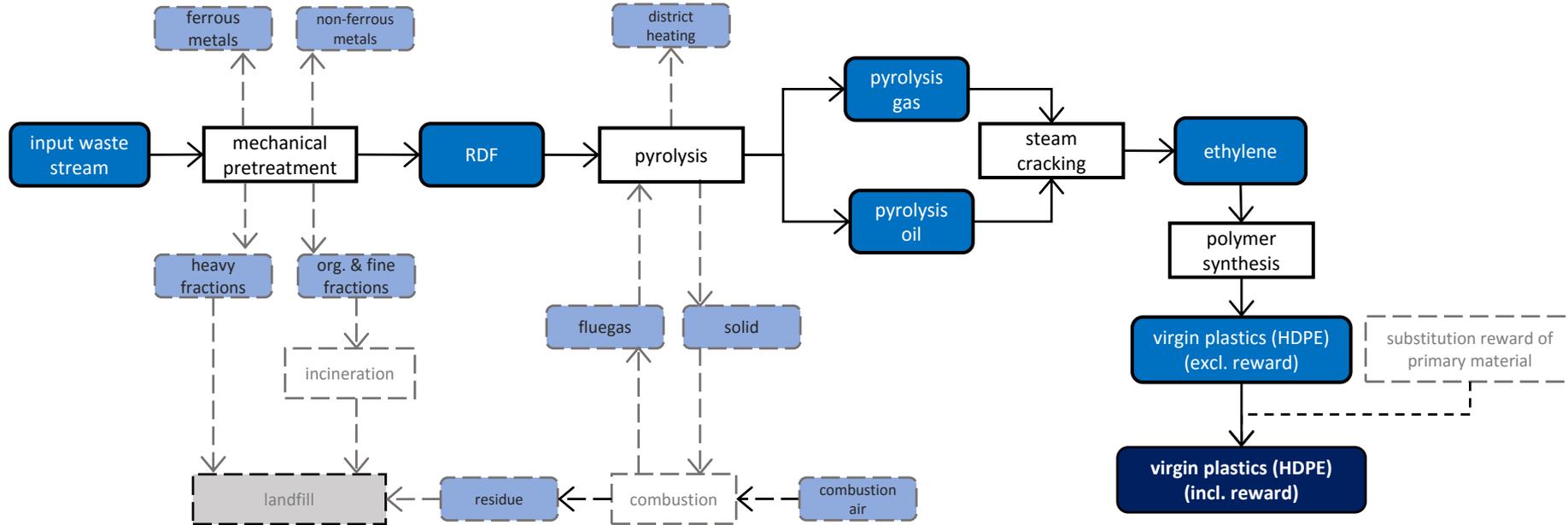
Quelle: Rieckhof and Guenther (2018)

# Untersuchtes System (I): Mechanisches Recycling



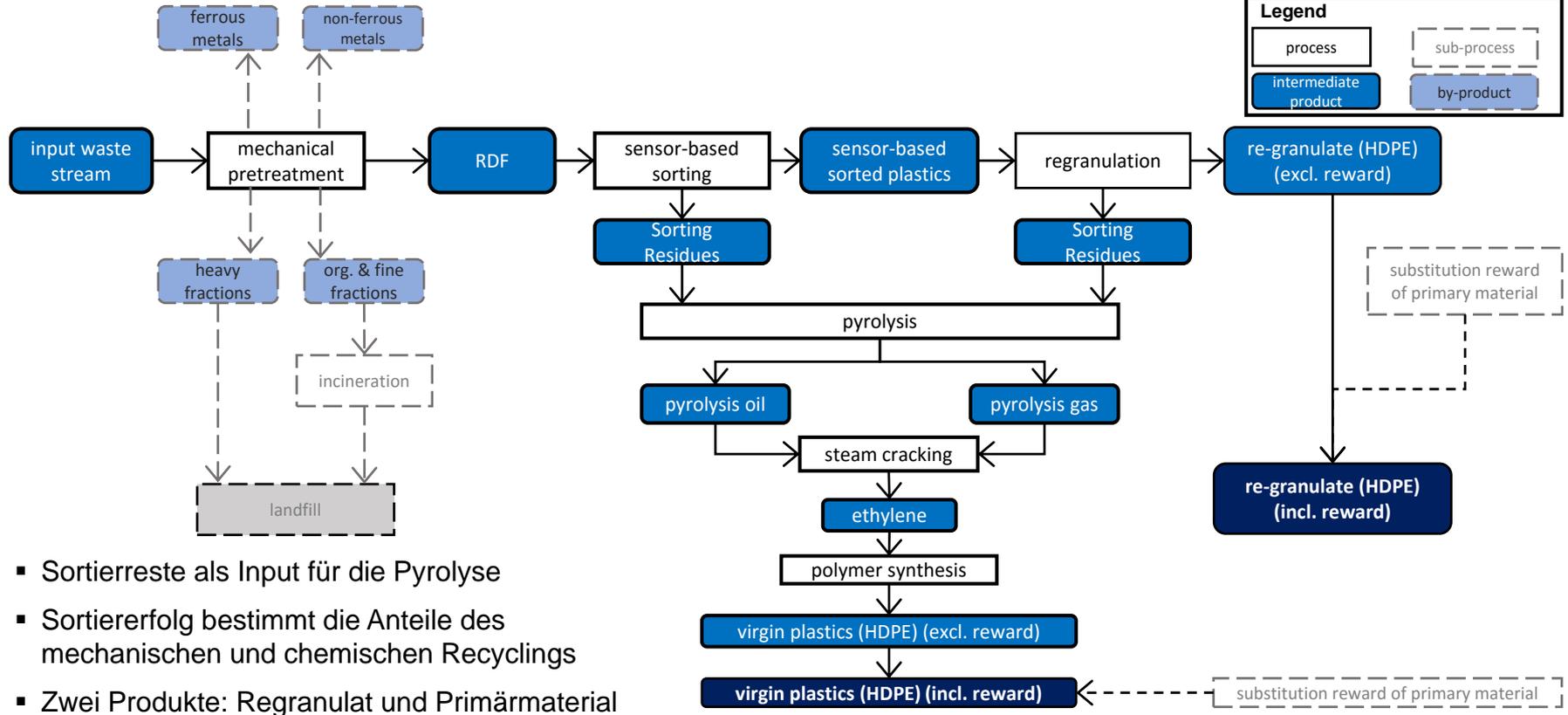
- Kombination von konventioneller Sortierung und sensorbasierter Sortierung
- Gutschriften und Belastungen durch Nebenprozesse werden berücksichtigt
- Sorterrückstände werden verbrannt; Berücksichtigung verschiedener Verbrennungspfade

# Untersuchtes System (II): Chemisches Recycling



- Hergestellter Ersatzbrennstoff (RDF) als Eingangsmaterial für die Pyrolyse
- Gutschriften und Belastungen durch Nebenprozesse werden berücksichtigt
- Produkte der Pyrolyse ersetzen Naphtha im Steam Cracker

# Untersuchtes System (III): Kombiniertes Ansatz



- Sortierreste als Input für die Pyrolyse
- Sortiererfolg bestimmt die Anteile des mechanischen und chemischen Recyclings
- Zwei Produkte: Regranulat und Primärmaterial

# Bewertungskriterien und funktionale Einheit

Bewertungskriterium	Beschreibung
Global Warming Potential (GWP100)	Bewertet wird das GWP100, also das GWP über 100 Jahre, wie im Kyoto-Protokoll definiert (IPCC 2013).
Primärenergiebedarf (CED)	"Gesamtmenge an Primärenergie, die zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes notwendig ist" (VDI 2012).
Kosten	Kosten die mit den Aufbereitungsschritten verbunden sind.
Kohlenstoffeffizienz	Recyclingrate in Form des Verhältnisses der Gesamtkohlenstoffmasse der gewünschten Produkte dividiert durch die Gesamtkohlenstoffmasse der Zufuhr(en). Die Kohlenstoff-Effizienz basiert auf stöchiometrischen Massenbilanzen.

**Funktionale Einheit:** 1kg von Leichtverpackungs-Abfällen (LVP) aus den deutschen dualen Systemen.

Jeder Prozessschritt wird einzeln bewertet. Für einen Recyclingpfad werden alle Prozessschritte entlang des Pfades aufsummiert.

# Übersicht der 9 Bewertungsszenarien

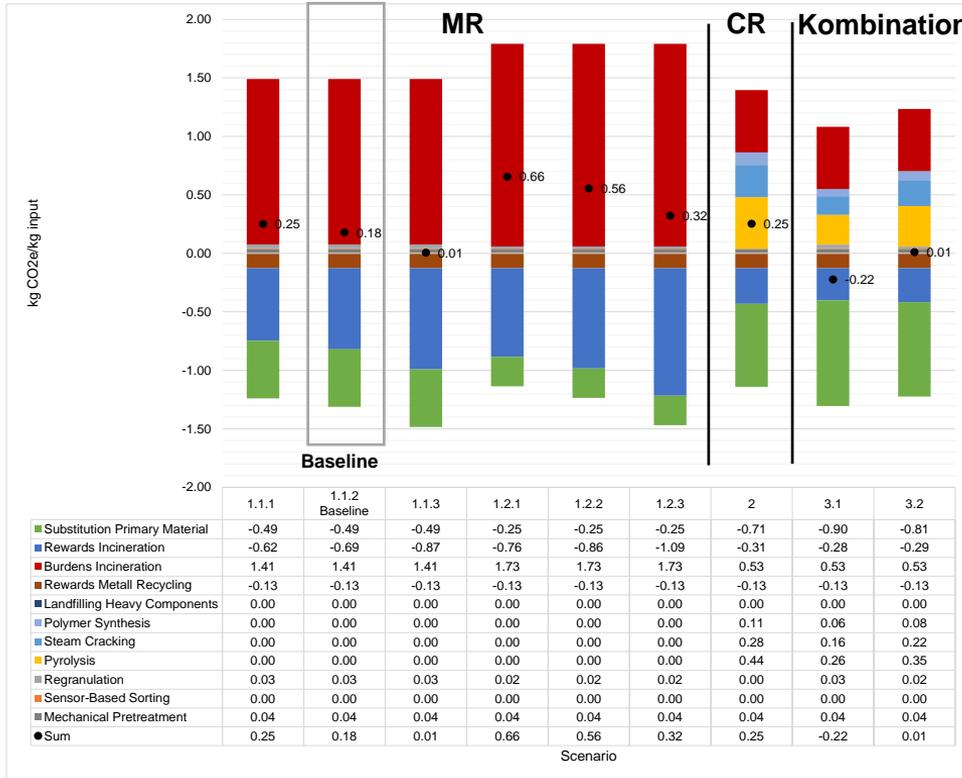
- Mechanisches Recycling:  
Sortiererfolg der sensorbasierten Sortierung und der gewählte Verbrennungspfad beeinflussen die Bewertung stark.
- Chemisches Recycling:  
Berechnung von verschiedenen Szenarien aufgrund der Datenlage nicht möglich.

Szenario	Beschreibung	Sortiererfolg	Verbrennungspfad für die Sortierreste
1.1.1	Mechanisches Recycling	42%	100% MVA
1.1.2	Mechanisches Recycling	42%	25% MVA, 75% EBS Kraftwerk <b>Baseline</b>
1.1.3	Mechanisches Recycling	42%	18% MVA, 58% EBS Kraftwerk, 13% Zementwerk, 11% Kohlekraftwerk
1.2.1	Mechanisches Recycling	22%	100% MVA
1.2.2	Mechanisches Recycling	22%	25% MVA, 75% EBS Kraftwerk
1.2.3	Mechanisches Recycling	22%	18% MVA, 58% EBS Kraftwerk, 13% Zementwerk, 11% Kohlekraftwerk
2	Chemisches Recycling	-	-
3.1	Kombiniertes Recycling	42%	-
3.2	Kombiniertes Recycling	22%	-

Techno-ökonomische und ökologische Analyse von Kunststoff-Recyclingtechnologien – eine deutsche Fallstudie

# STUDIENERGEBNISSE UND DISKUSSION

# Global Warming Potential (GWP)



## Zentrale Erkenntnisse

### Mechanisches Recycling:

- Verbrennung / thermisches Recycling der Sortierreste hat hohen Einfluss auf das GWP

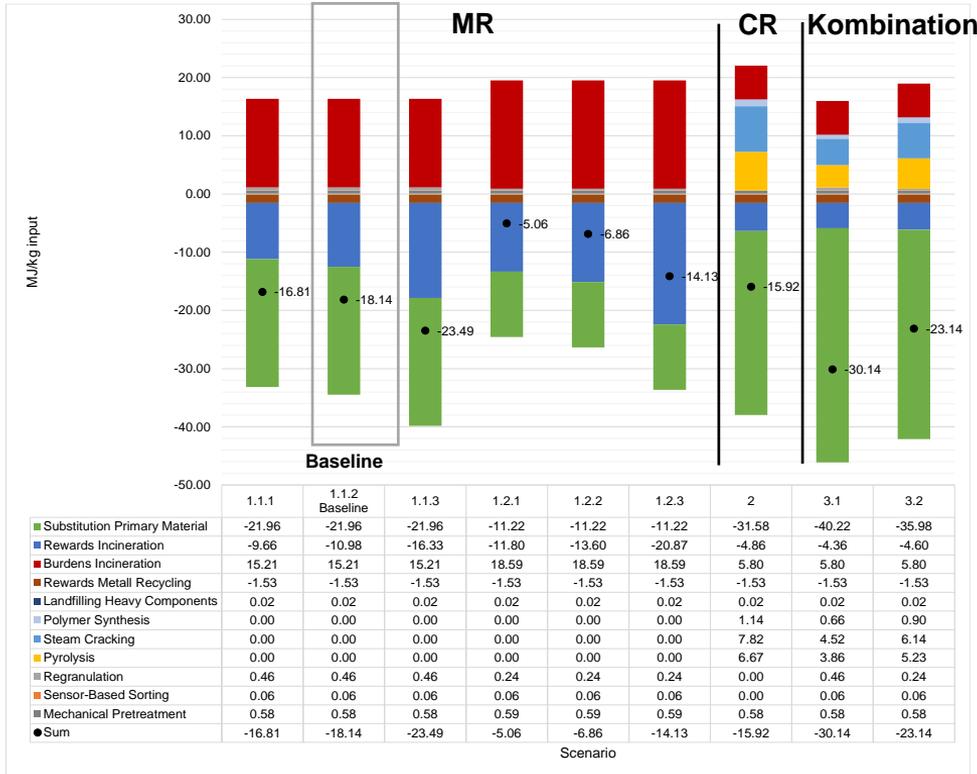
### Chemisches Recycling:

- Verglichen mit dem Baseline-Szenario leicht schlechtere Bewertung für das GWP
- An dieser Stelle werden Qualitätsaspekte noch nicht berücksichtigt

### Kombinierter Ansatz:

- Niedrigste THG Emissionen; auch netto THG-Einsparungen möglich
- Höhere Materialausbeute durch zwei Produkte

# Primärenergiebedarf (CED)



## Zentrale Erkenntnisse

### Mechanisches Recycling

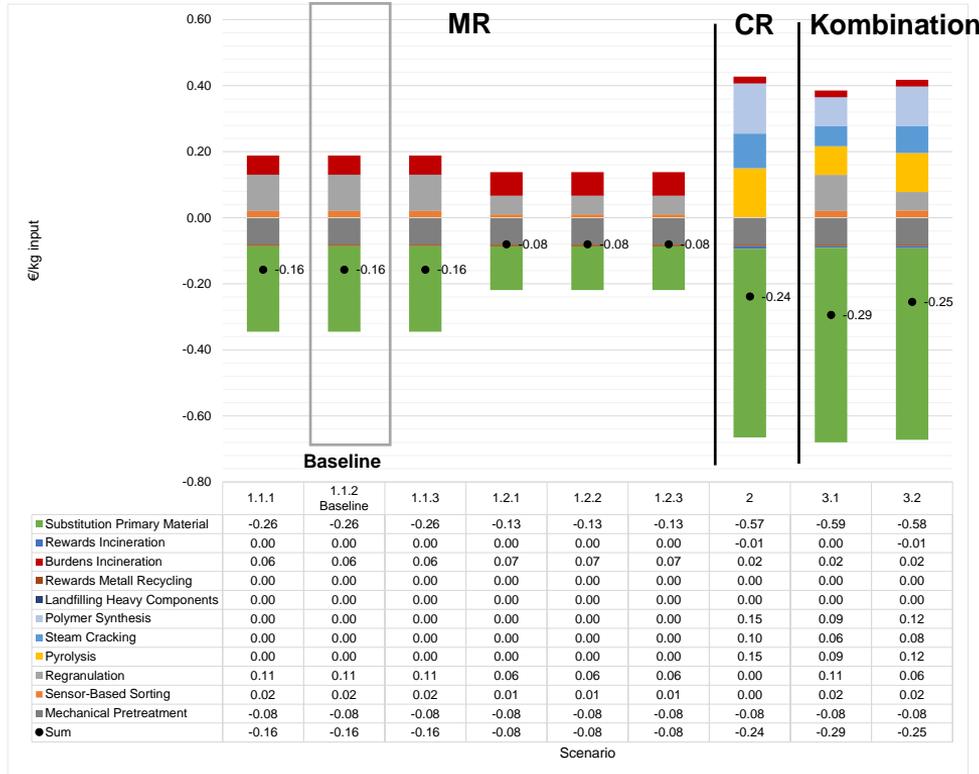
- CED Bewertung wird durch den Verbrennungspfad beeinflusst
- Höhere Materialverluste führen zu höheren ökologischen Auswirkungen

### Chemisches Recycling:

- Bewertung ist mit der des mechanisches Recyclings vergleichbar
- Höherer Energiebedarf wird durch höhere Gutschriften kompensiert

### Kombinierter Ansatz:

- Höchste CED Einsparungen
- Kombination von geringer Belastung durch Verbrennung und hohe Gutschriften für Substitution von Primärmaterial



## Zentrale Erkenntnisse

### Mechanisches Recycling:

- Erträge sinken mit höheren Materialverlusten
- Weniger Regranulat und damit geringerer Substitutionseffekt

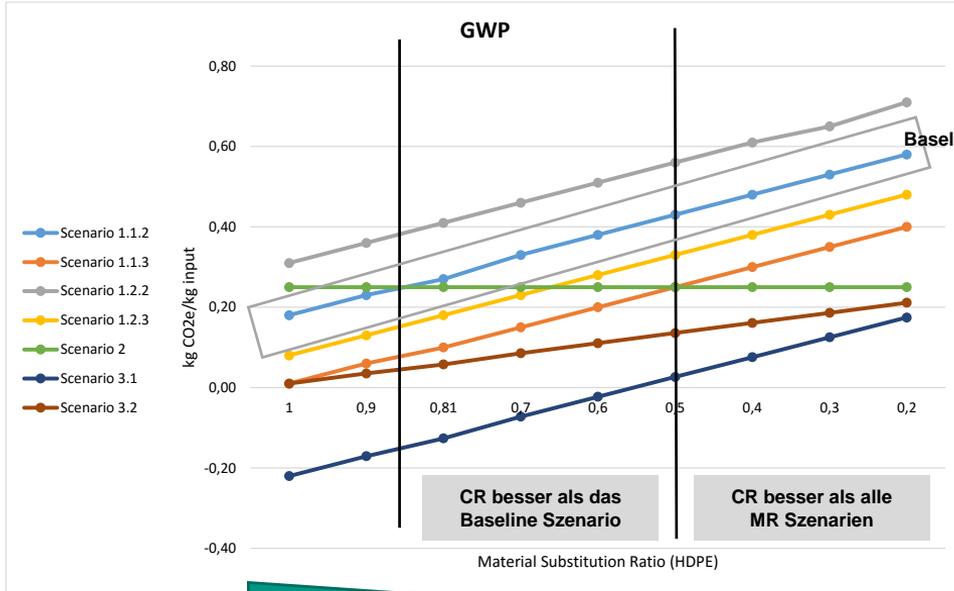
### Chemisches Recycling

- Höhere Erträge im Vergleich zum mechanischen Recycling
- Höhere Kosten werden durch höhere Erträge aufgefangen
- Höherer Materialertrag (Kohlenstoffrecyclingrate)

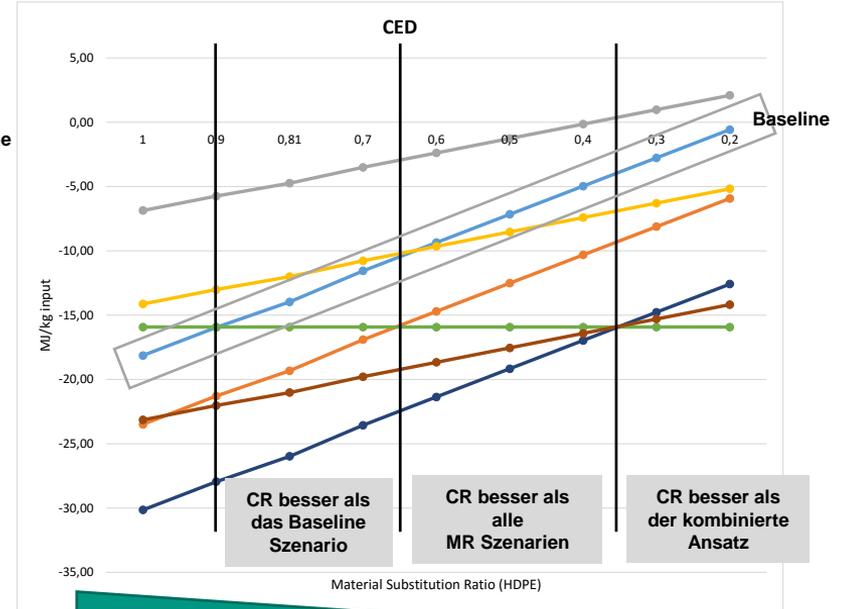
### Kombinierter Ansatz:

- Höchste Erträge durch höchsten Materialertrag (Kohlenstoffrecyclingrate)

# Qualität des Regranulats



Menge an Primärkunststoff, der durch Regranulat ersetzt wird



Menge an Primärkunststoff, der durch Regranulat ersetzt wird

Beim Vergleich von Kunststoffrecyclingtechnologien muss die Qualität des Regranulats beurteilt werden.

# Defizite und Einschränkungen

Kriterium	Beschreibung
(1) <b>Daten und methodische Grenzen</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Zusammensetzung des LVP Abfalls</li><li>• <b>Pyrolyse-Daten</b> nur für eine spezifische Anlage vorhanden; Validierung nötig</li><li>• Keine Szenarioanalyse für das chemische Recycling möglich</li><li>• Keine Berücksichtigung des Technologie-Reifegrads</li><li>• Nur eine Technologie des chemischen Recyclings wurde bewertet</li><li>• Alterung der Kunststoffe und Additive wurden nicht berücksichtigt</li><li>• Aufbereitung des Pyrolyseöls wurde nicht berücksichtigt</li></ul>
(2) <b>Annahmen</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Annahmen führen zu Unsicherheiten</li><li>• Szenarien können diese Unsicherheiten nur teilweise auffangen</li><li>• Kombination der Szenarien wahrscheinlich</li></ul>

Techno-ökonomische und ökologische Analyse von Kunststoff-Recyclingtechnologien – eine deutsche Fallstudie

# SCHLUSSFOLGERUNG

# Schlussfolgerung

- Mechanisches und chemisches Recycling erzielen vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich GWP und CED
  - Die Ergebnisse hängen vom Sortiererfolg, energetischem Recyclingpfad und der Substitutionsrate für das Primärmaterial ab
  - Hinsichtlich Kosten und Kohlenstoffeffizienz schneidet chemisches Recycling besser ab als mechanisches Recycling
  - Mechanisches und chemisches Recycling erzielen in einem kombinierten Ansatz die besten Ergebnisse
  - Die Ergebnisse sind konsistent mit der Literatur  
(Gu et al. (2017), Chen et al. (2011); Perugini et al. (2005), Bergsma (2019), Meys et al. (2020), Russ et al. (2020))
- 
- Die Studienergebnisse hängen stark von nationalen Umständen ab, darunter die Abfallzusammensetzung, Abfallbehandlungsanlagen und die Kohlenstoffintensität des Energiemixes
  - Eine Realisierung der aufgezeigten Vorteile kann durch organisatorische Barrieren oder der Ablehnung von recyceltem Material eingeschränkt werden

# Literatur

Bergsma, G. (2019a): Chemical recycling: Opportunities for climate policies and circular economy? CE Delft, January 2019, presentation slides, <https://cedelft.eu/en/publications/2173/exploratory-study-on-chemical-recycling-update-2019> (last access: 27 July 2020).

Chen, X.; Xi, F.; Geng, Y.; Fujita, T. (2011): The potential environmental gains from recycling waste plastics: Simulation of transferring recycling and recovery technologies to Shenyang, China. Waste Manage. 2011, 31 (1), pp.168–179, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.08.010>

Eurostat (2020): Packaging Waste Statistics. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Packaging\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Packaging_waste_statistics) (last access: 26 January 2021).

Gu, F.; Hall, P.; Miles, M.J. (2016a): Performance evaluation for composites based on recycled polypropylene using principal component analysis and cluster analysis. J. Clean. Prod. 115, pp.343–353, pp. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.062>.

Gu, F.; Hall, P.; Miles, N.J. (2016b): Development of composites based on recycled polypropylene for injection moulding automobile parts using hierarchical clustering analysis and principal component estimate. J. Clean. Prod. 137, pp.632–643, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.028>.

Gu et al. (2017): From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study, Science of the Total Environment 601-602, pp.1192-1207, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.278>

IPCC (Ed.) (2013): Climate change 2013. The physical science basis; summary for policymakers, a report of Working Group I of the IPCC, technical summary, a report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail and frequently asked questions; part of the Working Group I Contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. With assistance of Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, <http://www.ipcc.ch/>

Meys, R.; Frick, F.; Westhues, S.; Sternberg, A.; Klankermeyer, J.; Bardow, A. (2020): Towards a circular economy for plastic packaging wastes – the environmental potential of chemical recycling, Resources, Conservation & Recycling, 162, p.105010ff, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105010>.

Perugini, F.; Mastellone, M. L.; Arena, U. A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes. Environ. Prog. 2005, 24(2), pp.137–154, <https://doi.org/10.1002/ep.10078>.

Rieckhof, R, and Guenther, E. 2018. „Integrating Life Cycle Assessment and Material Flow Cost Accounting to Account for Resource Productivity and Economic-Environmental Performance“. The International Journal of Life Cycle Assessment 23 (7): 1491–1506. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1447-7>.

Russ, M., Gonzales, M., Horlacher, M., Shonfield, P., Deimling, S. (2020): Evaluation of pyrolysis with LCA - 3 Case Studies. BASF SE, Leinfelden-Echterdingen <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/chemcycling/lca-for-chemcycling.html> (last access: 4 Aug 2020)

VDI (2012). VDI 4600 Cumulative energy demand (KEA) - Terms, definitions, methods of calculation.

Volk, R.; Stalkamp, C.; Steins, J.; Yogish, S.P.; Müller, R.C.; Stapf, D; Schultmann, F (2021): Techno-economic Assessment and Comparison of Different Plastic Recycling Pathways – a German Case Study, Journal of Industrial Ecology, <https://doi.org/10.1111/jiec.13145>

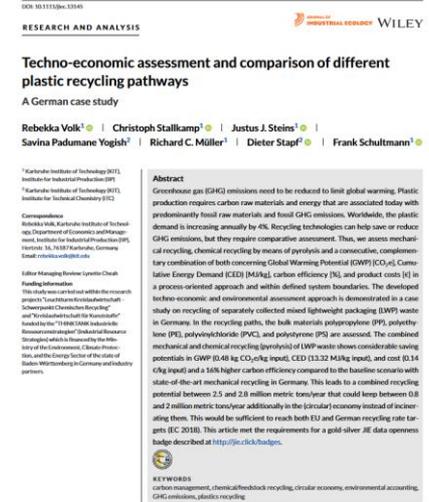
# Kontakt

## Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe - Vergleichende Bewertung von Recyclingoptionen für Abfälle, die Mischkunststoffe enthalten.

**Dr.-Ing. Rebekka Volk**  
KIT - Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)  
Deutsch-Französische Institut für Umweltforschung (DFIU)

Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe  
Phone.: +49 (0) 721 608 - 44469  
Fax: +49 (0) 721 44682  
E-mail: [rebekka.volk@kit.edu](mailto:rebekka.volk@kit.edu)

Web: [https://www.iip.kit.edu/1064\\_4951.php](https://www.iip.kit.edu/1064_4951.php)  
Think Tank Industrielle Ressourcenstrategien: <https://www.thinktank-irs.de/>



This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
© 2021 The Authors. Journal of Industrial Ecology published by Wiley Periodicals, LLC on behalf of John Wiley & Sons, Ltd.  
1318 | [wileyonlinelibrary.com/journal/jiec](https://doi.org/10.1111/jiec.13146) | Journal of Industrial Ecology 2021, 25: 1318–1337

Volk, R., Stallkamp, C.; Steins, J.J.; Yogish, S.P.; Müller, R.C.; Stapf, D.; Schultmann, F. (2021): [Techno-economic assessment and comparison of different plastic recycling pathways: A German case study](https://doi.org/10.1111/jiec.13146). 2021. Journal of industrial ecology. doi:10.1111/jiec.13146