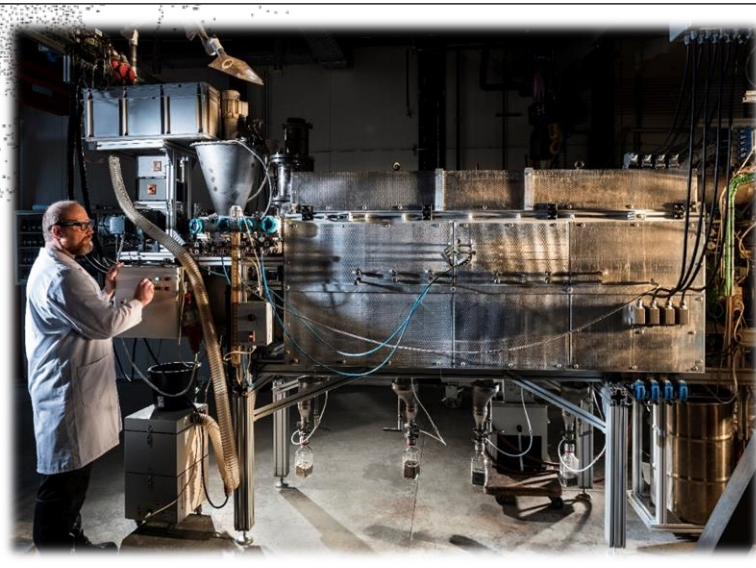



# Chemisches Recycling – Aktuelle Entwicklungen und Nachhaltigkeit

Dieter Stapf

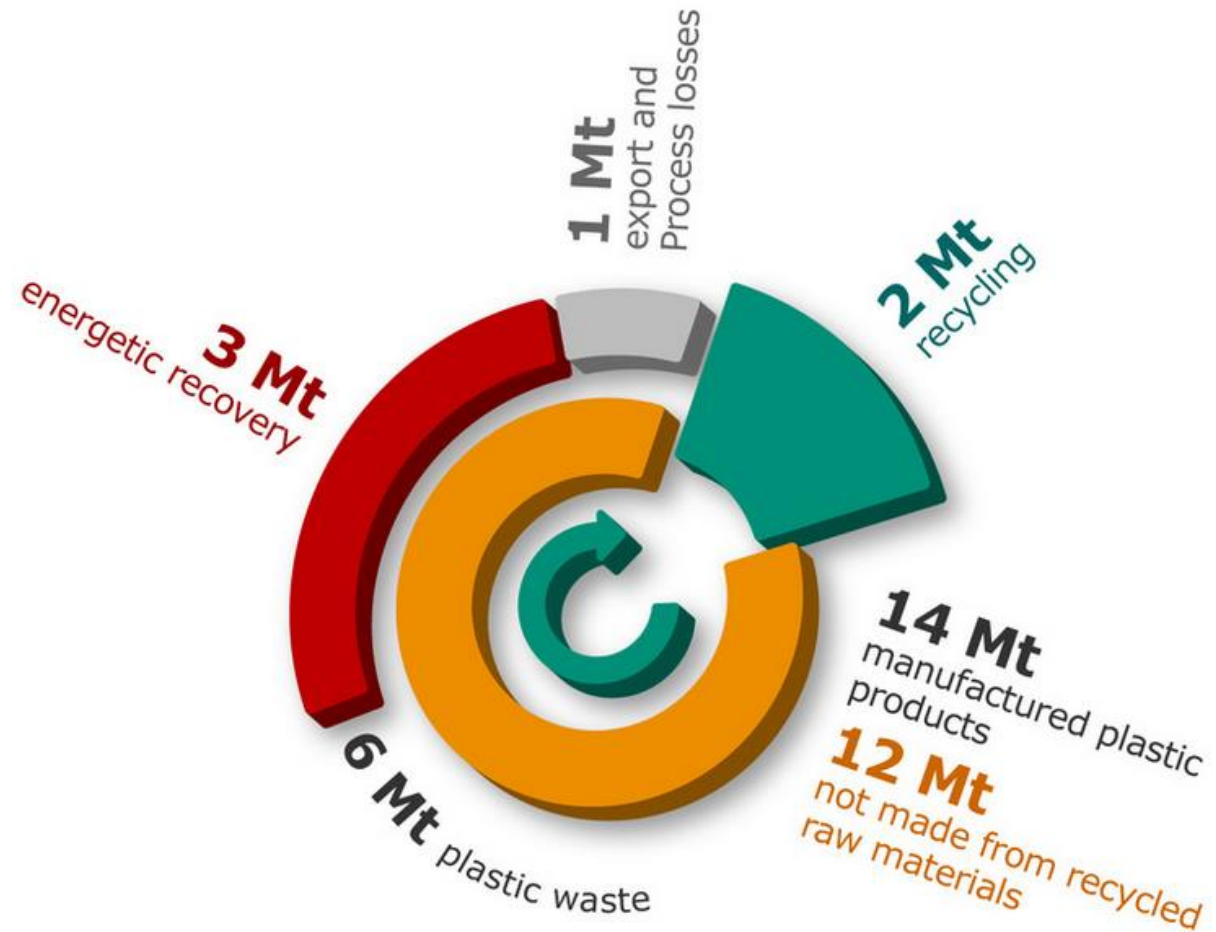
30.1.2024



Chemical structures shown:

- Ethene:  $\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \backslash & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{H} \end{array}$
- Styrene:  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}=\text{CH}_2$
- Propane:  $\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ | & | & | \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\ | & | & | \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$
- Phenol:  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$
- Hydrogen chloride:  $\text{H}-\text{Cl}$

# Kunststoffproduktion und Kunststoffabfälle in Deutschland



Adapted from the abridged version of the Conversio study [www.bkv-gmbh.de](http://www.bkv-gmbh.de)  
Material flow diagram plastics in Germany 2019 published August 2020

# Post - Consumer Mischkunststoffabfälle rezyklierbar machen

Shredderleichtfraktion Altfahrzeug



Sortierreste aus Verpackungssammlung



Bedeutende kunststoffhaltige Abfälle

Elektro- / Elektronikabfälle



Gewerbeabfälle



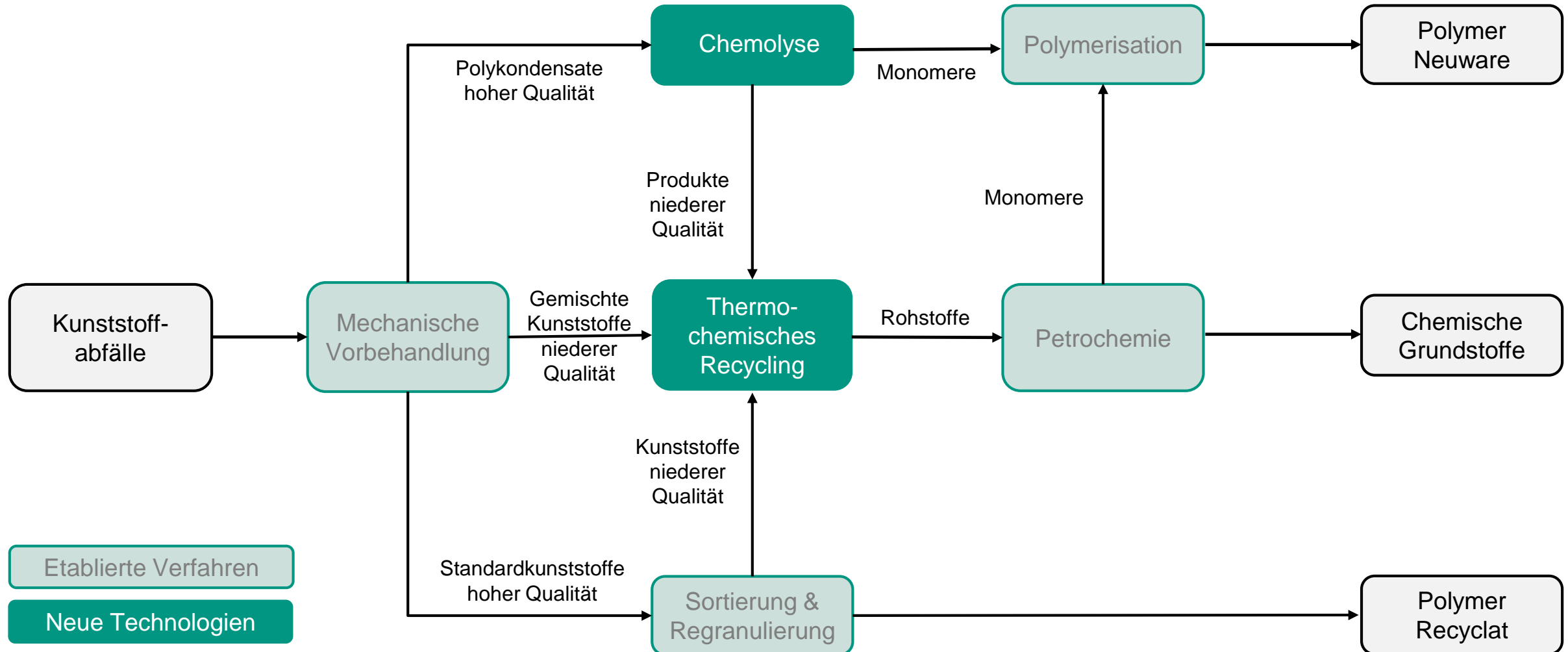
Wärmedämmverbundsysteme



APW = Automotive Plastic Waste

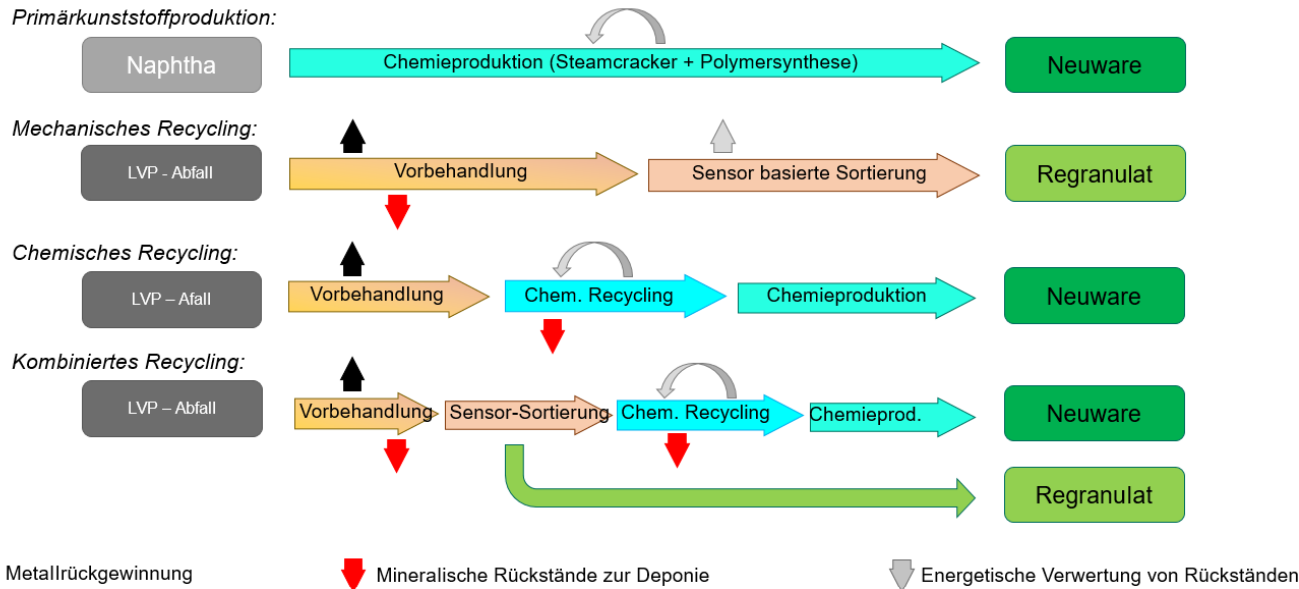
LVP = Leichtverpackungen

# Technologieinfrastruktur einer Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe



# Mechanisches und chemisches Recycling ergänzen sich

## Ökobilanz des chemischen Recyclings



### Recyclingrouten für Leichtverpackungen verglichen mit der Polyethylenherstellung aus fossilen Rohstoffen

Recyclingpfad	Kosten [€/kg <sub>Input</sub> ]	Kumulierter Energiebedarf [MJ/kg <sub>Input</sub> ]	Treibhausgaspotential* [kgCO <sub>2</sub> e/kg <sub>Input</sub> ]	Recyklierter Kohlenstoff
Mechanisch, 22% Ausbeute	-0,08	-6,9	0,6	22%
Chemisches Recycling	-0,24	-15,9	0,3	59%
Kombiniert, mech. + chem.	-0,25	-23,1	0,0	66%

\*) ohne Berücksichtigung der vermiedenen Kunststoffverbrennung

DOI: 10.1111/jiec.13145

RESEARCH AND ANALYSIS



### Techno-economic assessment and comparison of different plastic recycling pathways

A German case study

Rebekka Volk<sup>1</sup> | Christoph Stalkamp<sup>1</sup> | Justus J. Steins<sup>1</sup> | Savina Padumane Yogish<sup>2</sup> | Richard C. Müller<sup>1</sup> | Dieter Stapf<sup>2</sup> | Frank Schultmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Industrial Production (IIP)  
<sup>2</sup> Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Technical Chemistry (ITC)

Correspondence: Rebekka Volk, Karlsruhe Institute of Technology, Department of Economics and Management, Institute for Industrial Production (IIP), Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe, Germany. Email: rebekka.volk@kit.edu

Editor Managing Review: Lynette Cheah  
 Funding Information: This study was carried out within the research projects "Leuchtturm Kreislaufwirtschaft - Schwerpunkt Chemisches Recycling" and "Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe" funded by the "THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien" (Industrial Resource Strategies) which is financed by the Ministry of the Environment, Climate Protection, and the Energy Sector of the state of Baden-Württemberg in Germany and industry partners.

**Abstract**  
 Greenhouse gas (GHG) emissions need to be reduced to limit global warming. Plastic production requires carbon raw materials and energy that are associated today with predominantly fossil raw materials and fossil GHG emissions. Worldwide, the plastic demand is increasing annually by 4%. Recycling technologies can help save or reduce GHG emissions, but they require comparative assessment. Thus, we assess mechanical recycling, chemical recycling by means of pyrolysis and a consecutive, complementary combination of both concerning Global Warming Potential (GWP) [CO<sub>2</sub>e], Cumulative Energy Demand (CED) [MJ/kg], carbon efficiency [%], and product costs [€] in a process-oriented approach and within defined system boundaries. The developed techno-economic and environmental assessment approach is demonstrated in a case study on recycling of separately collected mixed lightweight packaging (LWP) waste in Germany. In the recycling paths, the bulk materials polypropylene (PP), polyethylene (PE), polyvinylchloride (PVC), and polystyrene (PS) are assessed. The combined mechanical and chemical recycling (pyrolysis) of LWP waste shows considerable saving potentials in GWP (0.48 kg CO<sub>2</sub>e/kg input), CED (13.32 MJ/kg input), and cost (0.14 €/kg input) and a 16% higher carbon efficiency compared to the baseline scenario with state-of-the-art mechanical recycling in Germany. This leads to a combined recycling potential between 2.5 and 2.8 million metric tons/year that could keep between 0.8 and 2 million metric tons/year additionally in the (circular) economy instead of incinerating them. This would be sufficient to reach both EU and German recycling rate targets (EC 2018). This article met the requirements for a gold-silver JIE data openness badge described at <http://jie.click/badges>.

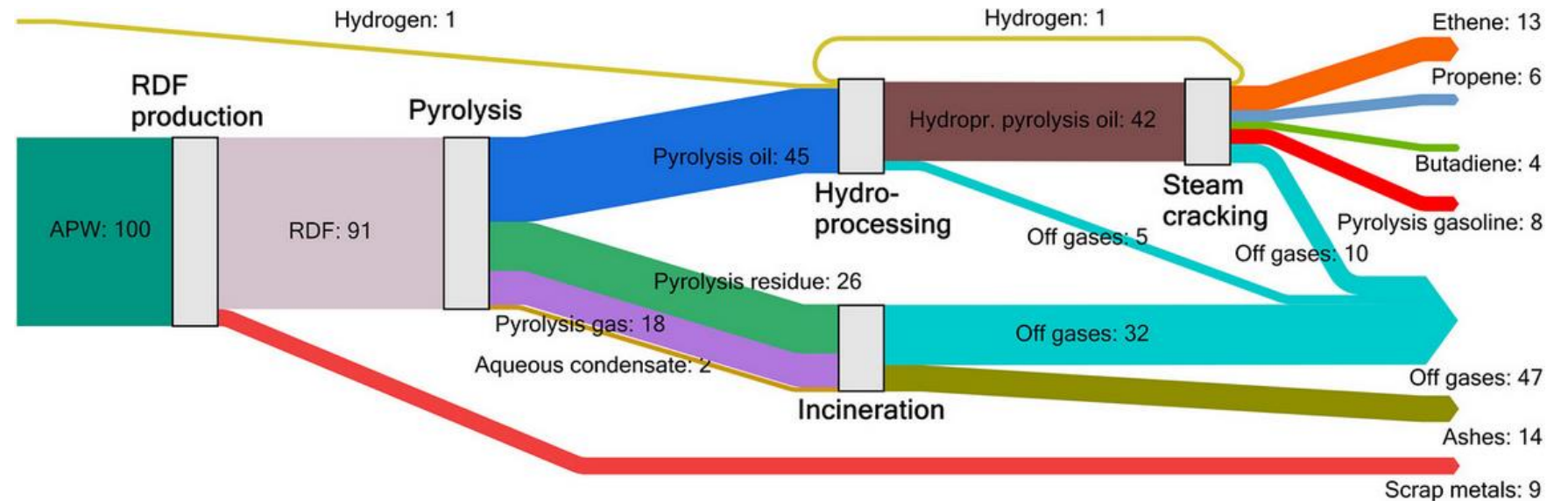
**KEYWORDS**  
 carbon management, chemical/feedstock recycling, circular economy, environmental accounting, GHG emissions, plastics recycling

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 Yale University

Printed by Wiley Online Library on [08/06/2021 11:02:45] - see <http://www.wiley.com/go/terms> at [29/04/2021]



# Rohstoffliches Recycling von Automobilkunststoffen anstelle Verbrennung



Chemisches Recycling: 0.57 kg CO<sub>2</sub>e / kg Abfall  
 Verbrennung: 1.25 kg CO<sub>2</sub>e / kg Abfall



Stallkamp, C., Hennig, M., Volk, R., Richter, F., Bergfeldt, B., Tavakkol, S., Schultmann, F., Stapf, D.: Economic and environmental assessment of automotive plastic waste end-of-life options: Energy recovery versus chemical recycling. Journal of Industrial Ecology 2023. <https://doi.org/10.1111/jiec.13416>

# Pyrolyse von Mischkunststoffabfällen: Energiebedarf und Kohlenstoffrecycling

Einsatzstoff	Energiebedarf für Erwärmen, Schmelzen, Pyrolyse, Verdampfung	Anteil an Einsatzstoff-Kohlenstoff im Pyrolyseöl
	bezogen auf den Einsatzstoffheizwert	bezogen auf den Einsatzstoff-Kohlenstoffgehalt
Sortierreste aus Leichtverpackungen	5,1 %	51,1 %
Gewerbeabfälle	5,2 %	60,0 %
Wärmedämmverbundsysteme	4,9 %	74,6 %
Shredderleichtfraktion	5,4 %	57,5 %
Elektro- / Elektronikabfälle	3,7 %	60,5 %

## Massenbilanz und Energiebilanz

# Chemisches Recycling – Aktuelle Entwicklungen und Nachhaltigkeitsbewertung

Die verschiedenen Technologien des chemischen Recyclings sind Voraussetzung für eine Kreislaufwirtschaft für Mischkunststoffabfälle (derzeit werden in Deutschland 4 Mio t/a verbrannt). Hierzu müssen die Upcycling-Technologien weiterentwickelt und skaliert werden.

- **Kosten:** Wirtschaftlichkeit des mechanischen und des chemischen Recyclings im Großmaßstab
- **Energie:** Chemisches Recycling verringert den Energiebedarf der Industrie deutlich gegenüber der Produktion auf fossiler Rohstoffbasis
- **Treibhausgasemissionen:** Mechanisches und chemisches Recycling vermeiden Treibhausgasemissionen; Recycling vermeidet Verbrennung
- Hohe **Recyclingquoten und damit mehr Unabhängigkeit von Rohstoffimporten** können durch die Kombination von mechanischem und chemischem Recycling erreicht werden.