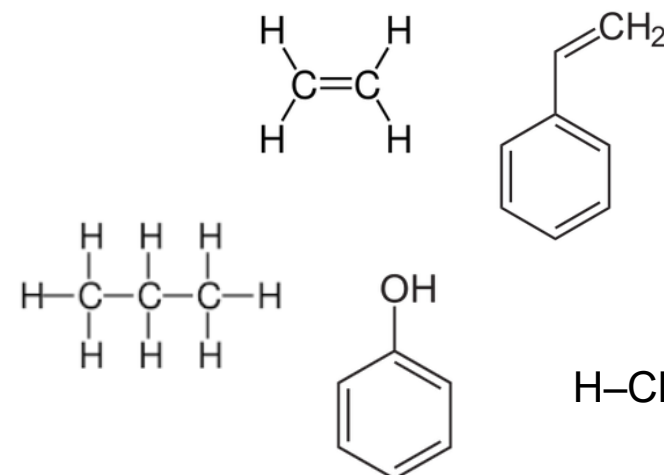
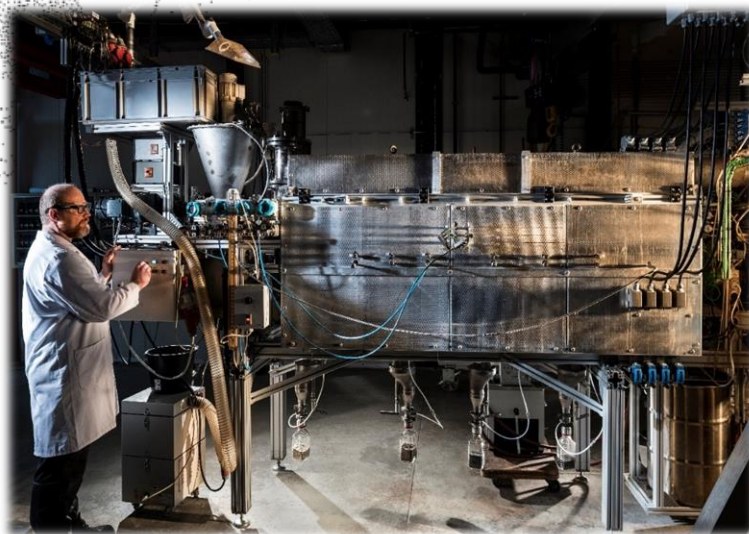


# Chemisches Recycling – Stand und Perspektiven

Dieter Stapf

BKV-Symposium, Berlin, 21. November 2024



# Operative chemische Recyclinganlagen in Deutschland

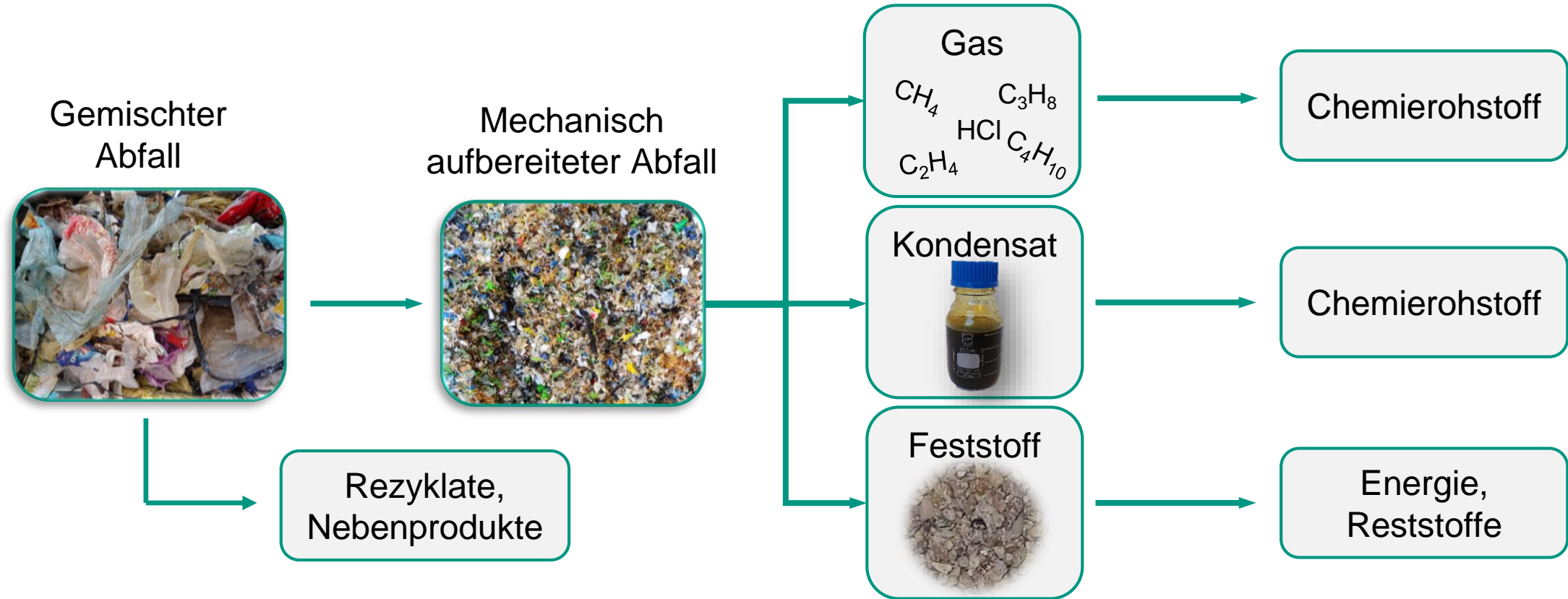
## Pyrolyseverfahren

- **Carboliq, Enningerloh**
  - Input: Mischkunststoffabfälle
  - Kapazität: ca. 4.000 t/a
  - Produkte zur stofflichen Verwertung:
    - Pyrolyseöl (Raffinerie)
  - Verölungsprozess (Rührkesselreaktor)
- 
- **Pyrum Innovations AG, Dillingen**
  - Input: Altreifen
  - Kapazität: ca. 6.000 t/a -> 60.000 t/a
  - Produkte zur stofflichen Verwertung:
    - Recyled Carbon Black rCB (Schwalbe, Continental)
    - Reifenpyrolyseöl (BASF)
  - Festbettreaktor

- **Arcus Greencycling Technologies, Höchst**
- Input: Mischkunststoffabfälle
- Kapazität: ca. 4.000 t/a
- Produkte zur stofflichen Verwertung:
  - Pyrolyseöl (BASF)
- Doppelschnecken-Pyrolysereaktor



# Chemisches Recycling gemischter Kunststoffabfälle – Wertschöpfungskette, Beispiel Pyrolyse



Sortierung

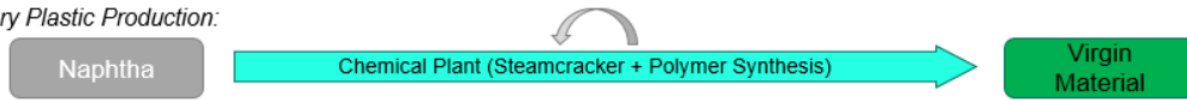
Pyrolyse

Aufbereitung und Synthese

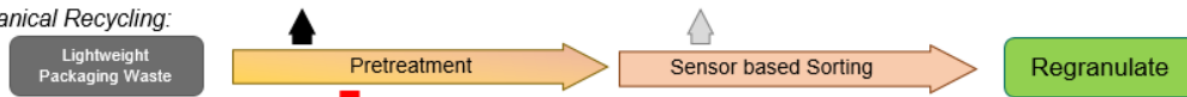
# Mechanisches und chemisches Recycling ergänzen sich

## Bewertung des chemischen Recyclings

Primary Plastic Production:



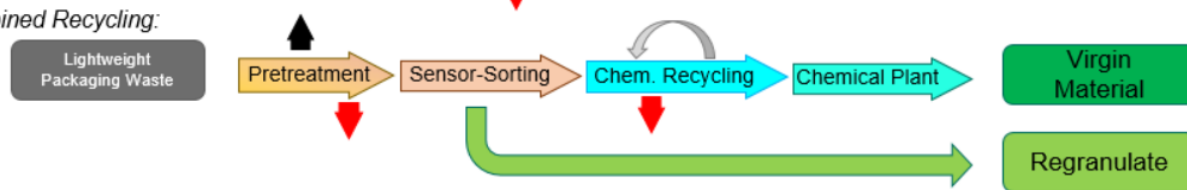
Mechanical Recycling:



Chemical Recycling:



Combined Recycling:



▲ Extracted metals via sorting    ▼ Heavy contents / Mineral residues that are landfilled    ▾ Residues that are used energetically

Lightweight packaging waste recycling routes compared to primary plastics production of HDPE (base scenario)

Recycling pathway	Cost [€/kg <sub>Input</sub> ]	CED [MJ/kg <sub>Input</sub> ]	GWP [kgCO <sub>2</sub> e/kg <sub>Input</sub> ]	Overall Carbon Efficiency
Mechanical recycling, 22% yield	-0.08	-3.5	0.8	22
Chemical recycling	-0.23	-14.4	0.4	59
Combined recycling	-0.26	-21.6	0.1	66

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 08/05/2021 11:02:45 AM. DOI: 10.1111/jiec.13145



# Recycling ist vorteilhaft gegenüber Verbrennung

## Rohstoffliches Recycling von Automobilkunststoffen anstelle Verbrennung

DOI: 10.1111/jiec.13416

RESEARCH ARTICLE

JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY WILEY

### Economic and environmental assessment of automotive plastic waste end-of-life options

#### Energy recovery versus chemical recycling

Christoph Stallkamp<sup>1</sup> | Malte Hennig<sup>2</sup> | Rebekka Volk<sup>1</sup> | Frank Richter<sup>2</sup> | Britta Bergfeldt<sup>2</sup> | Salar Tavakkol<sup>2</sup> | Frank Schultmann<sup>1</sup> | Dieter Stapf<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Industrial Production (IIP), Karlsruhe, Germany

<sup>2</sup>Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Technical Chemistry (ITC), Karlsruhe, Germany

Correspondence: Christoph Stallkamp, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Industrial Production (IIP), Karlsruhe, Germany. Email: christoph.stallkamp@kit.edu

Malte Hennig, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Technical Chemistry (ITC), Karlsruhe, Germany. Email: malte.hennig@kit.edu

Editor Managing Review: Lynette Cheah

#### Abstract

Most automotive plastic waste (APW) is landfilled or used in energy recovery as it is unsuitable for high-quality product mechanical recycling. Chemical recycling via pyrolysis offers a pathway toward closing the material loop by handling this heterogeneous waste and providing feedstock for producing virgin plastics. This study compares chemical recycling and energy recovery scenarios for APW regarding climate change impact and cumulative energy demand (CED), assessing potential environmental advantages. In addition, an economic assessment is conducted. In contrast to other studies, the assessments are based on pyrolysis experiments conducted with an actual waste fraction. Mass balances and product composition are reported. The experimental data is combined with literature data for up- and downstream processes for the assessment. Chemical recycling shows a lower net climate change impact (0.57 to 0.64 kg CO<sub>2</sub>e/kg waste input) and CED (3.38 to 4.41 MJ/kg waste input) than energy recovery (climate change impact: 1.17 to 1.25 kg CO<sub>2</sub>e/kg waste input; CED: 6.94 to 7.97 MJ/kg waste input), while energy recovery performs better economically (net processing cost of -0.05 to -0.02€/kg waste input) compared to chemical recycling (0.05 to 0.08€/kg waste input). However, chemical recycling keeps carbon in the material cycle contributing to a circular economy and reducing the dependence on fossil feedstocks. Therefore, an increasing circularity of APW through chemical recycling shows a conflict between economic and environmental objectives.

#### KEYWORDS

automotive plastics recycling, carbon management, chemical recycling, circular economy, climate change impact, industrial ecology

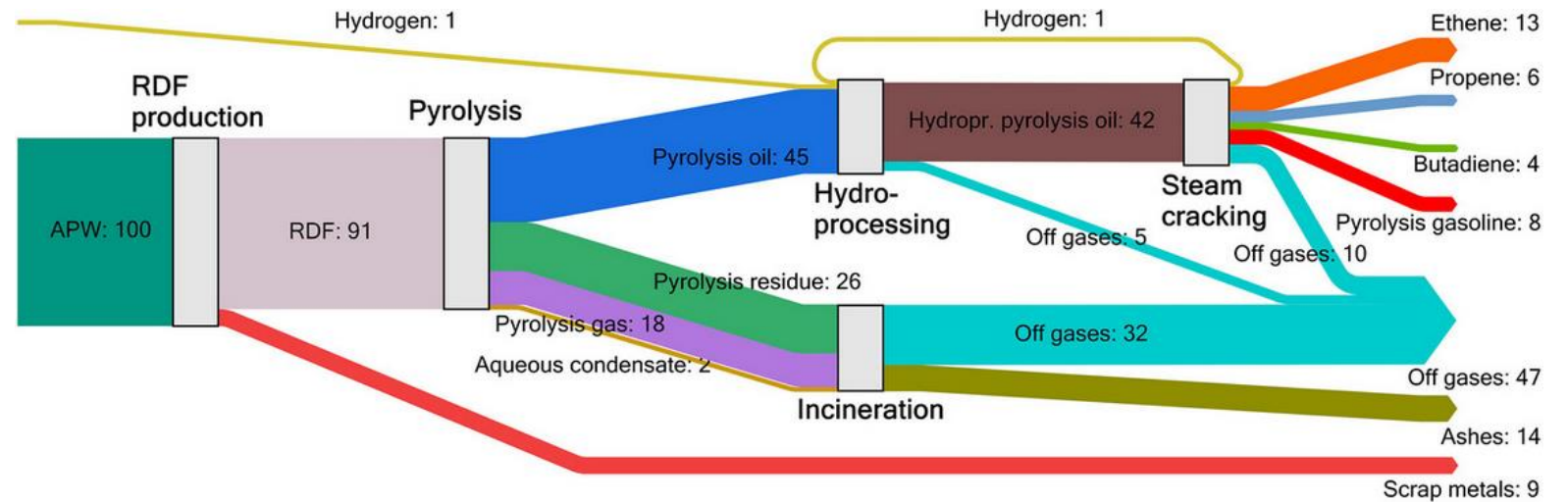
#### 1 | INTRODUCTION

The amount of plastic in automobiles increased considerably in the last decades to realize the advantages of plastic components, such as lower costs and weight reduction (Wilts et al., 2016). Therefore, more automotive plastic waste (APW) will have to be handled in the future. Defect plastic components are replaced during the use phase generating mixed APW. At the end-of-life (EoL), a highly heterogeneous automotive shredder residue (ASR) contains mixed plastics of different origins. Currently, landfilling and energy recovery are the dominating waste-handling options for APW and ASR in Europe (Cossu & Lai, 2015; Mehlhart et al., 2018), resulting in high environmental burdens and a loss of valuable resources

Journal of Industrial Ecology 2023; 1–16.

wileyonlinelibrary.com/journal/jiec

© 2023 by the International Society for Industrial Ecology. | 1



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

Herausforderungen: Economies of Scale (Technologieentwicklung)  
 heutiger ökonomisch/ökologischer Zielkonflikt

Stallkamp, C., Hennig, M., Volk, R., Stapf, D., Schultmann, F. (2024): Pyrolysis of mixed engineering plastics: Economic challenges for automotive plastic waste. Waste Management 176, 105-116. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.01.035>

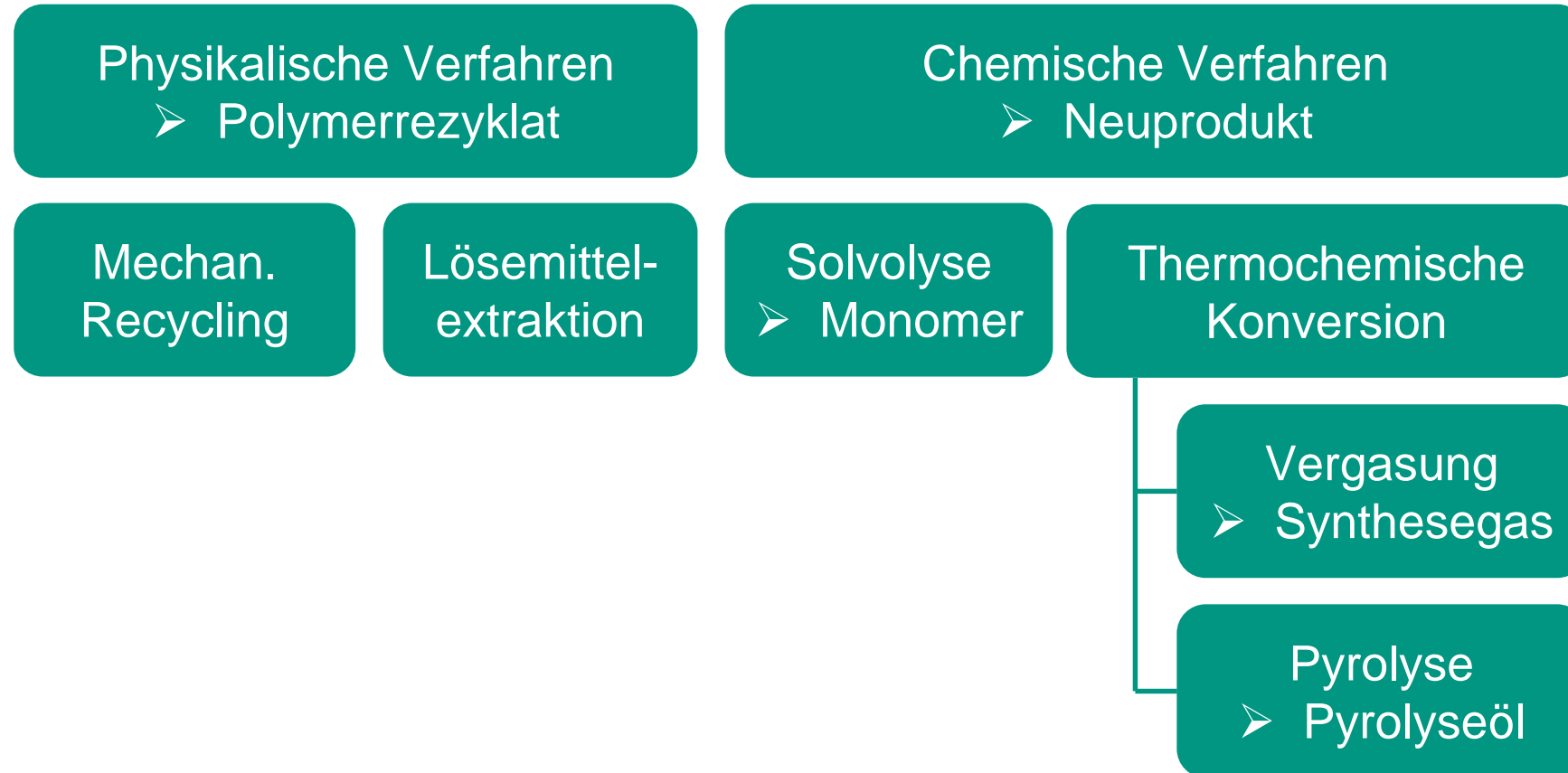
# Post-consumer Mischkunststoffabfälle rezyklierbar machen



WEEE = **W**aste of **E**lectrical and **E**lectronic **E**quipment

LVP = Leichtverpackung

# Recyclingverfahren für Kunststoffabfälle



# Energiebedarf des chemischen Recyclings



## FACTSHEET

### Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

## Energiebedarf und Treibhausgasbilanz

Der Energiebedarf zur Herstellung von Kunststoffen aus fossilen Rohstoffen liegt etwa beim doppelten der am Ende im Kunststoff chemisch gespeicherten Energie. Bei der energetischen Verwertung kann davon ein Teil zurückgewonnen werden. Beim Recycling wird nicht nur die im Kunststoff chemisch gespeicherte Energie zurückgewonnen, sondern auch der zusätzliche Energieaufwand zur Herstellung aus fossilem Rohstoff eingespart.

Mechanisches Recycling hat einen zusätzlichen Energiebedarf der Sortieranlage, des Waschens, und der Regranulierung. Jedoch wird beim mechanischen Recycling ein großer Anteil des Abfallinputs der Recyclinganlage aus den genannten Gründen verbrannt. Chemisches Recycling durch Pyrolyse oder Vergasung hat einen Energiebedarf bezogen auf den Energieinhalt des Abfalls. Auch bei thermochemischen Recyclingverfahren werden Nebenprodukte energetisch verwertet. Die energetische Verwertung der Nebenprodukte ist notwendig, um die Entsorgung der Reststoffe des mechanischen Recyclings und der abgetrennten Stör- und Schadstoffe des chemischen Recyclings gemäß den gesetzlichen Anforderungen sicherzustellen.

Stellt man mechanisches und chemisches Recycling für reale Abfälle einander gegenüber, ergeben sich daher keine grundsätzlichen Unterschiede in der Energierückgewinnung. Beide Ansätze sparen netto gegenüber der Kunststoffherstellung aus fossilen Rohstoffen signifikant Energie ein. Damit tragen beide Ansätze zur Senkung der Treibhausgasemissionen bei.

Der maximale Nutzen für Klima und Umwelt entsteht, wenn mechanisches und chemisches Recycling so kombiniert werden, dass die Recyclingquoten maximiert werden:

Meinung:  
„Chemisches Recycling  
ist energieaufwändig“



# Energiebedarf der Pyrolyse von Mischkunststoffabfällen gemessen und berechnet

Gesamtbilanz der Wertschöpfungskette!

- Chemischer Energiebedarf für Pyrolyse ist gering
  - Physikalischer Energiebedarf für thermische Trennverfahren ist höher
  - Energetische Verwertung der Nebenprodukte liefert Energie
- Kummulierter Energieaufwand (KEA) der gesamten Prozesskette beim Vergleich (LCA bzw. Ökobilanz)


## Energy Demand for Pyrolysis of Mixed Thermoplastics and Waste Plastics in Chemical Recycling: Model Prediction and Pilot-Scale Validation

Niklas Netsch,\* Michael Zeller, Frank Richter, Britta Bergfeldt, Salar Tavakkol,\* and Dieter Stapf


 Cite This: <https://doi.org/10.1021/acssusresmg.4c00109>

 Read Online

ACCESS |

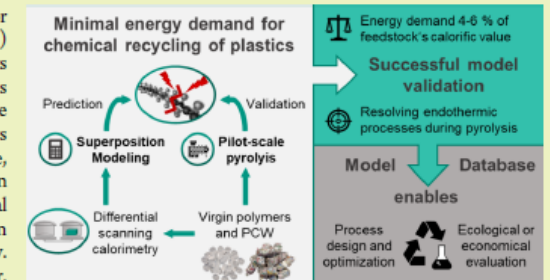
 Metrics & More

 Article Recommendations

 Supporting Information

**ABSTRACT:** Pyrolysis of plastic waste is a key technology for closing the anthropogenic carbon cycle. The energy demand (ED) of this endothermic process is a crucial factor to evaluate its benefits compared to established recycling pathways. The pyrolysis ED can be determined experimentally. However, this is elaborate and limited in transferability. Existing models cover virgin plastics or hydrocarbon thermoplastic mixtures on a laboratory scale. Here, a model for calculating the ED of thermoplastic mixtures based on the superposition of virgin polymer data is developed. The material data, such as heat capacity, phase transition enthalpy, and reaction enthalpy, are determined using differential scanning calorimetry. Pilot-scale experiments are performed in a 1 kg/h screw reactor. These experimental data are compared to model calculations. The feedstock-specific ED for pyrolysis is plastic-type independent. It amounts to approximately 4–6% of the feedstocks' net calorific value. The validation shows excellent accordance for virgin plastics and hydrocarbon plastics mixtures. The modeled ED of mixtures including heteroatoms is systematically underestimated, which indicates changes in the degradation mechanism. The model allows for resolving several phenomena contributing to the pyrolysis ED. The simple calculation of the ED with in-depth information on occurring phenomena enables more reliable process design, optimization, and evaluation.

**KEYWORDS:** plastic recycling, chemical recycling, pyrolysis, energy demand, thermal degradation, polymer decomposition, differential scanning calorimetry

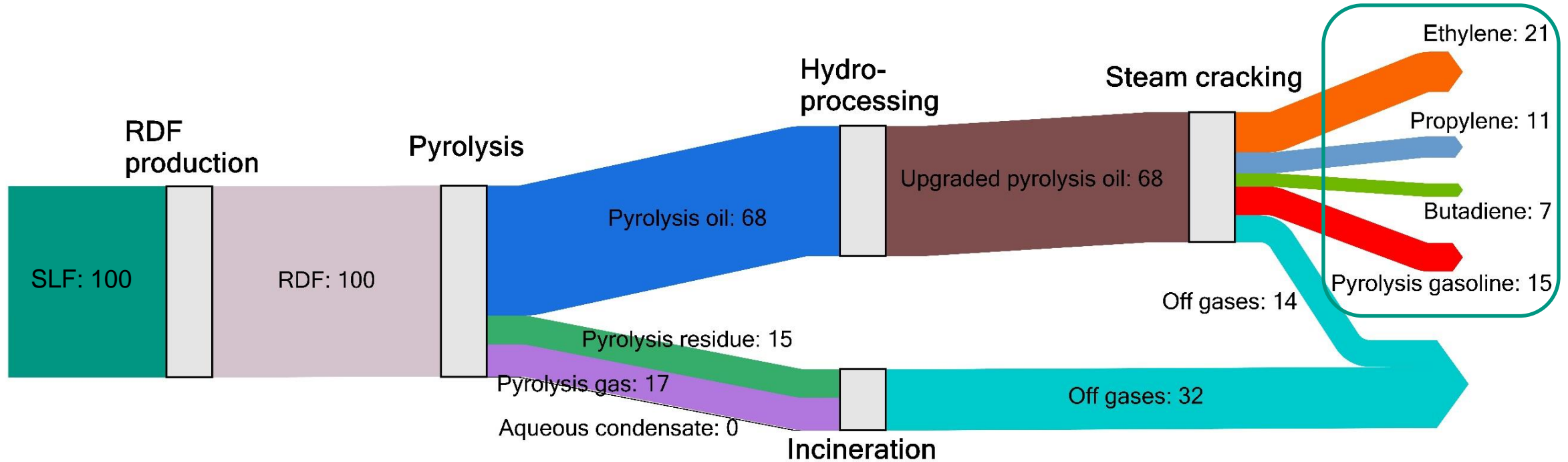


# Pyrolyse von Mischkunststoffabfällen: Energiebedarf und Kohlenstoffrecycling

Einsatzstoff	Energiebedarf für Erwärmen, Schmelzen, Pyrolyse, Verdampfung	Anteil an Einsatzstoff-C im Pyrolyseöl
	[% des Einsatzstoff-Heizwerts]	[Gew.-%]
LVP-SR	5,1	51,1
GA	5,2	60,0
XPS	4,9	74,6
SLF	5,4	57,5
WEEE	3,7	60,5

## Massen- und Energiebilanz

# Kohlenstoffeffizienz der Wertschöpfungskette Polymer-zu-Polymer



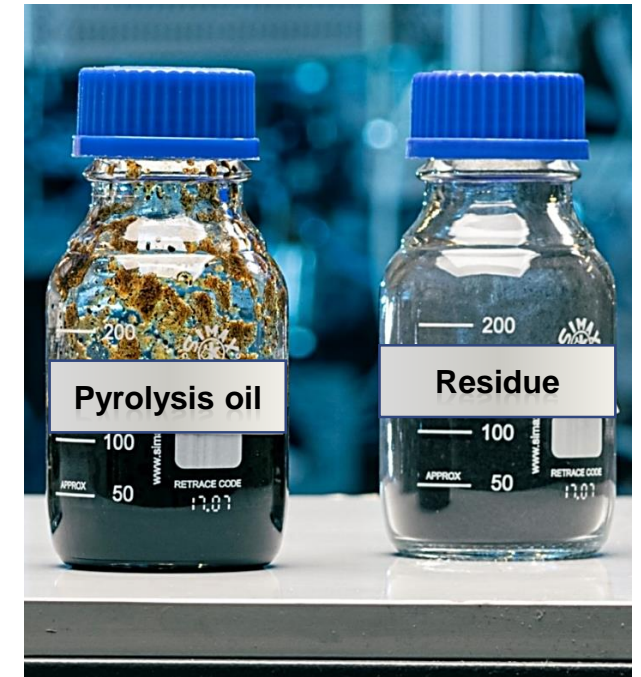
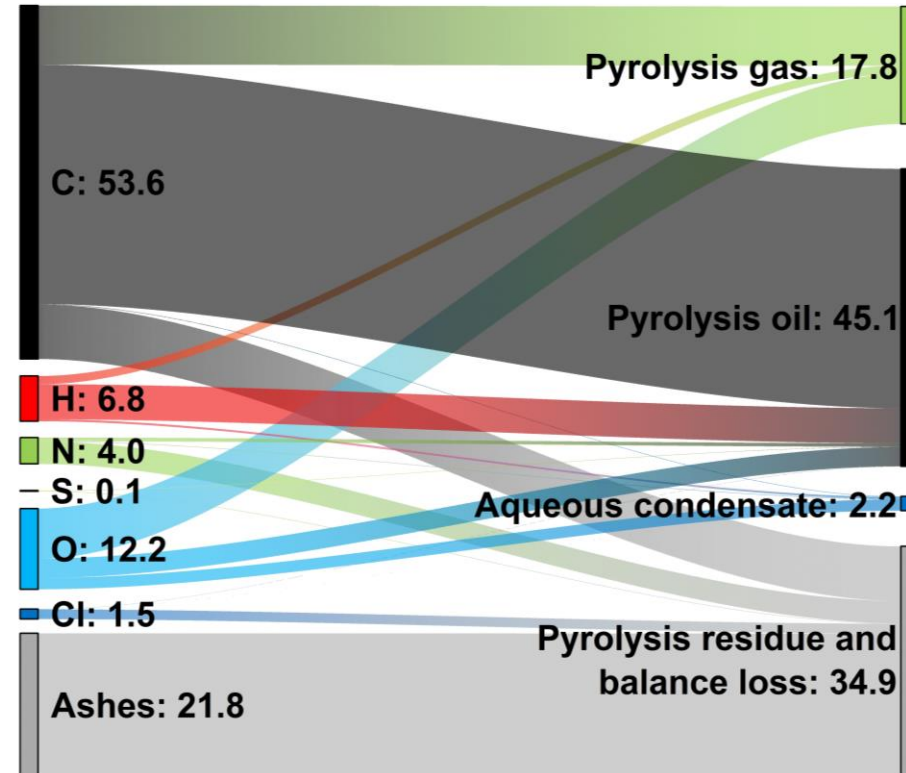
SLF: Shredder light fraction  
 RDF: Refuse derived fuel  
 Percentages refer to input carbon mass flow of SLF

**Steam cracking des Pyrolyseöls resultiert in einem Kohlenstoffrecycling > 50 %**

# Pyrolyse der Schredderleichtfraktion Automobil (SLF)



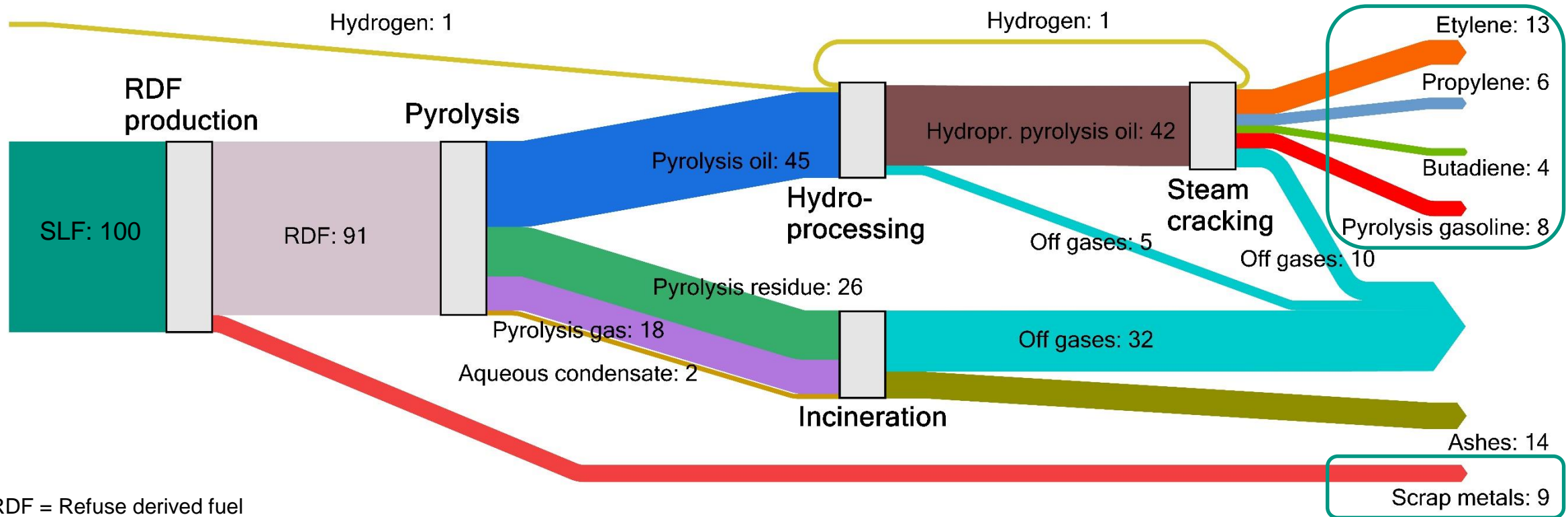
Abfall: SLF



Pyrolyseprodukte

*Welcher Verwertungsweg hat die beste Treihausgasbilanz ?*

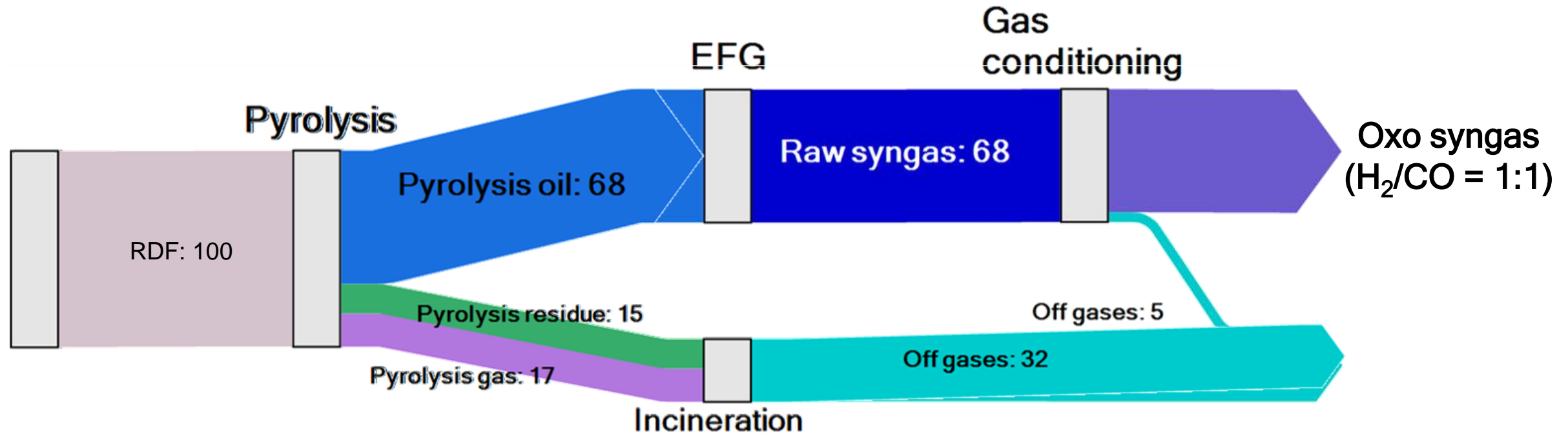
# Massenbilanz des chemischen Recyclings der Shredderleichtfraktion mittels Pyrolyse / Steamcracking



RDF = Refuse derived fuel  
Percentages refer to input mass flow of SLF

**31% des Inputmaterials werden als High Value Chemicals (HVC) bzw. Metallschrott wiedergewonnen**

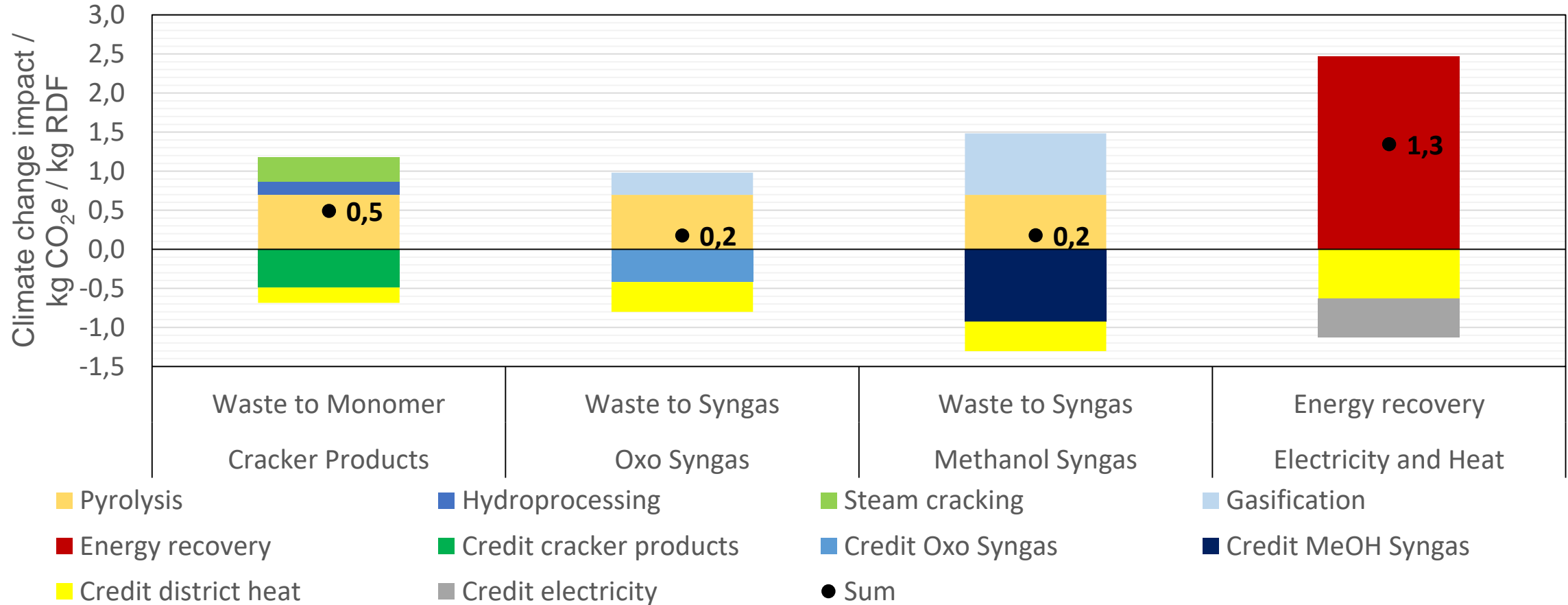
# Massenbilanz des chemischen Recyclings der Shredderleichtfraktion mittels Pyrolyse / Synthesegaserzeugung



EFG: Entrained flow gasification  
RDF: Ersatzbrennstoff

**63% des Inputmaterials werden als Zwischenprodukt wiedergewonnen**

# Vergleich der Treibhausgasemissionen

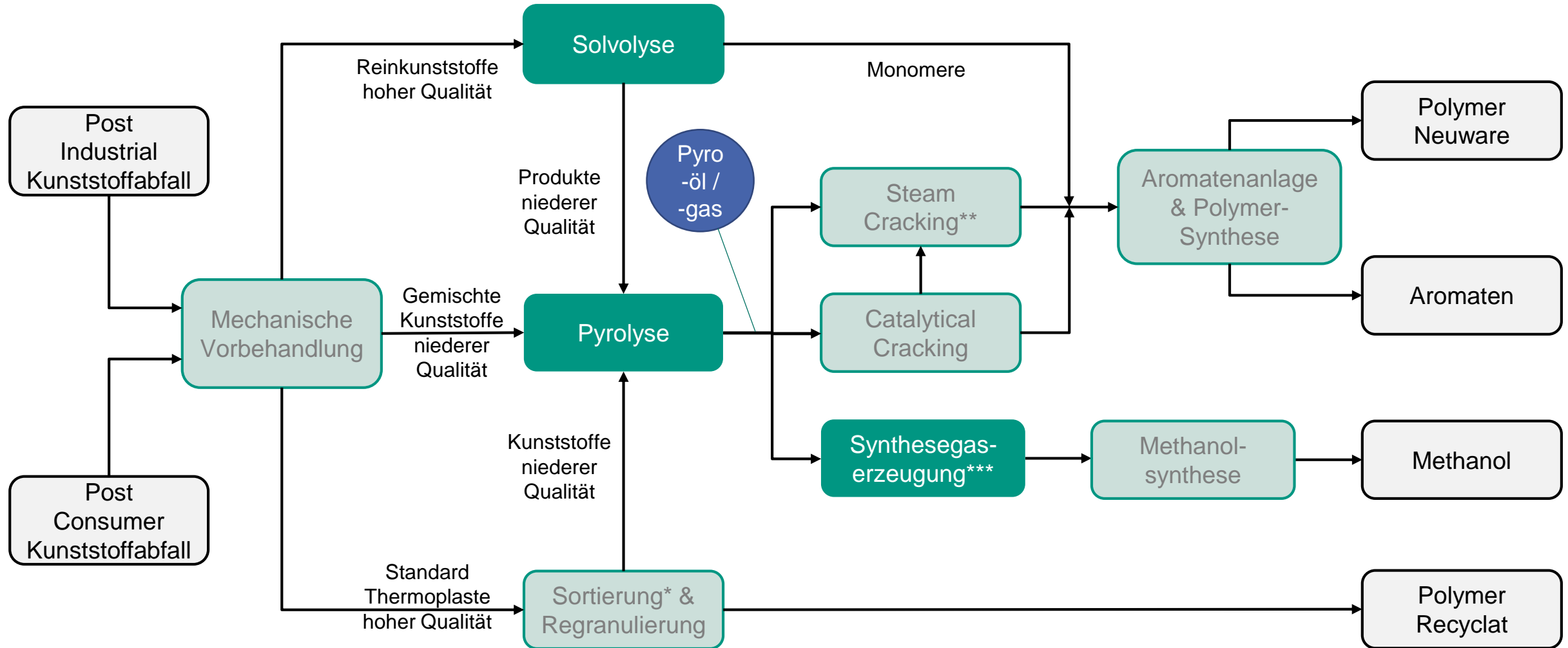


Stallkamp, C., et al. (2023). J. Ind. Ecol., DOI: 10.1111/jiec.13416

Hennig, M., et al. (2024). Conf. Waste Eng., Sendai, Japan, 2024

# Wertschöpfungsketten einer klimaneutralen Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe

## Chemische Recyclingtechnologien



\* incl. physikalische Lösemittelverfahren; \*\* incl. Pyrolysegasnutzung; \*\*\* incl. direkte Gasifizierung von Abfällen



# Zukünftige Verwertung des Kunststoffabfallaufkommens in einer klimaneutralen Kreislaufwirtschaft

## Chemisches Recycling – Stand und Perspektiven

Technologiemix:

- Mechanisches Recycling, physikalisches Recycling und chemisches Lösemittelrecycling:  
Getrenntsammlung, gute Sortierbarkeit / hohe Rezyklatreinheit, geeignete Polymertypen
- Pyrolyse und direkte Synthesegaserzeugung (Rohstoffliches Recycling):
  - Mischkunststoffabfälle
  - Studienergebnisse: Vorteilhaftigkeit gegenüber Verbrennung und fossilen Rohstoffen
  - Schadstoffentfrachtung und Upcycling
- Energetische Verwertung + Carbon Capture:
  - Rest

Herausforderungen: Technologieentwicklung und Wirtschaftlichkeit

Abfälle und Materialien wurden bereit gestellt durch:

ARN B.V.

Pre Zero GmbH & Co. KG

Electrocycling GmbH

Audi / Volkswagen OTLG

Lyondellbasell

INEOS Styrolution, INEOS Inovyn

Finanzierung der Studien / Evaluierung durch:



PlasticsEurope  
Association of Plastics Manufacturers



BKV KUNSTSTOFF  
KONZEPTE  
VERWERTUNG



HELMHOLTZ RESEARCH FOR  
GRAND CHALLENGES



THINKTANK  
INDUSTRIELLE  
RESSOURCEN-  
STRATEGIEN