



# Whack-A-Mole «Alternative» Ansätze zur thermischen Abfallbehandlung

Prof. Dr.-Ing. Peter Georg Quicker

Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe

RWTH Aachen University

VBSA-Fachtagung

3. Dezember 2024 | Olten



# Whack-A-Mole

## Sonstige Ansätze zur thermischen Abfallbehandlung

ICS ###.###.###		VDI-RICHTLINIEN		### 2024	
VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE		Emissionsminderung Thermische Abfallbehandlung Sonstige Verfahren <i>VDI3460-4 N0028 VE02.docx</i>		VDI 3460 Blatt 4 Entwurf <i>Internes Arbeitspapier</i>	
Emission control – Thermal waste treatment – Other processes		Einsprüche bis ... <ul style="list-style-type: none"> <li>• vorzugsweise über das VDI-Richtlinien-Einspruchsportal <a href="http://www.vdi.de/3460-4">http://www.vdi.de/3460-4</a></li> <li>• in Papierform an VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) Fachbereich Umweltschutztechnik Postfach 10 11 39 40002 Düsseldorf</li> </ul>			
Inhalt		Seite			
Vorbemerkung .....		3			
Einleitung .....		3			
1 Anwendungsbereich .....		3			
2 Normative Verweise .....		3			

Frühere Ausgabe: ##.##

Deutscher Ingenieur e. V., Düsseldorf 2024

cke – nicht gestattet



Whac-A-Mole

THERMOSELCT

NOELL-KONVERSION

SIEMENS SCHWEL-BRENN

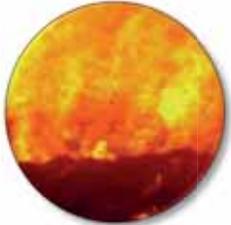
DESTRUGAS

ENERKEM

TODAY'S BEST SCORE

SCORE

SCORE



# Einführung



# Kunststoffe



# Restmüll



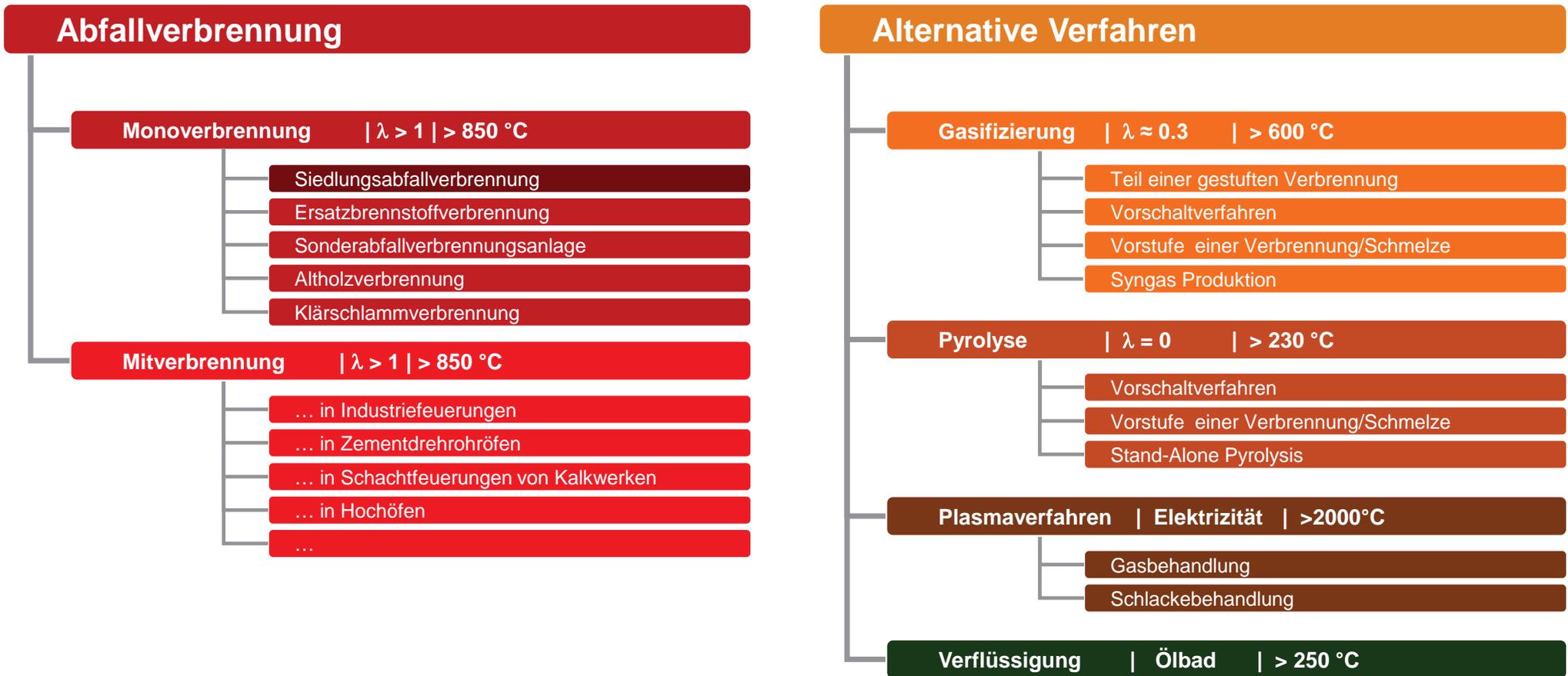
# Klärschlamm



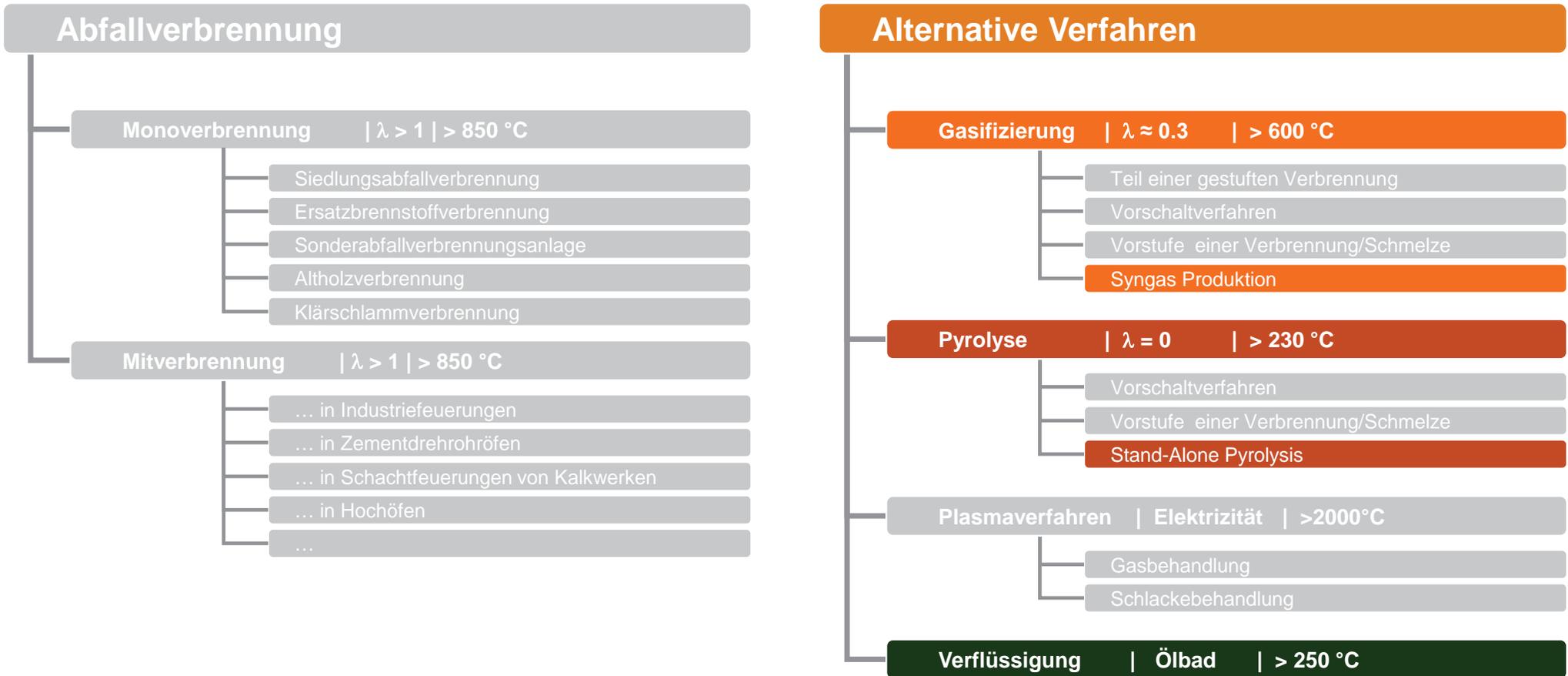
# Einführung



# Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung

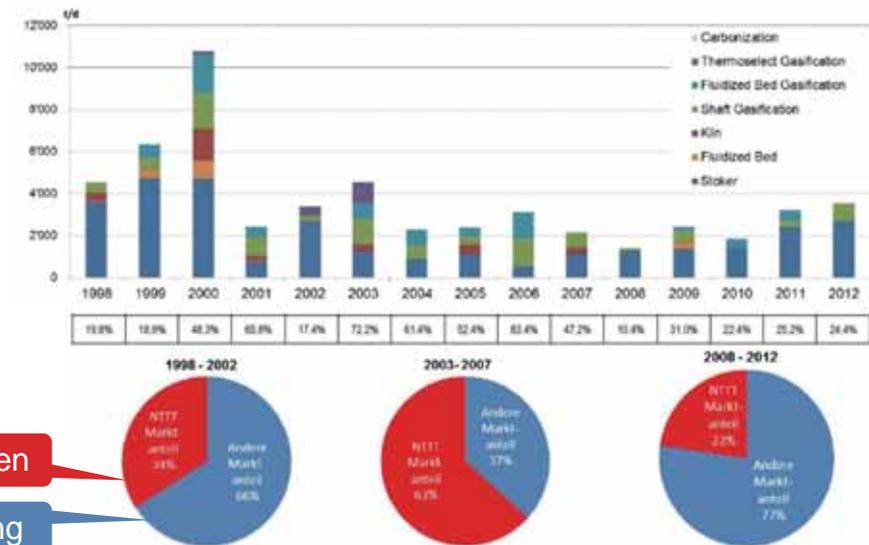


# Verfahren zur thermischen Abfallbehandlung



# Alternative thermische Verfahren zur Kunststoffabfallverwertung – Die Mär aus Japan

- Rechtliche Anforderungen
  - Pflicht zur Verglasung der Schlacke (1990er - 2008)
  - Pflicht der kommunalen Selbstverwaltung (1970) → Bau von vielen Anlagen (mehr als 1.200!)
- Kurze Betriebszeiten: 6.500 - 7.500 h/a (als Folge der großen Anlagenzahl)
- Hohe Behandlungskosten
  - intransparente Finanzierung durch Steuern
  - 400 €/Mg Abfall im Großraum Tokyo 2013 laut Studie <sup>[1]</sup>
- Fokus auf Entsorgung, wenig Interesse an energetischer Verwertung (heute anders)
- Hohe Abfallqualität
  - Hoher Sortiergrad
  - Geringer Aschegehalt



Alternative Verfahren

Verbrennung

Quelle: Vaccani 2014 | [1] Waste Report 2013, Clean Association of Tokyo

# Kunststoffe – Chemisches Recycling



## Alternative thermische Verfahren zur Kunststoffabfallverwertung – Das chemische Recycling

<https://www.youtube.com/watch?v=2KFdGnz5XDc>

Recy & Chemy im „Bottletalk“



0:11 / 4:57

# Die Wurzeln des chemischen Recyclings: Die Verölung

- Schlagzeilen vor 10 Jahren



# Alternative thermische Verfahren zur Kunststoffabfallverwertung

---

## EU Taxonomy Environmental Delegated Act Annex II: Transition to a circular economy

### 1. MANUFACTURING

#### 1.1. Manufacture of plastic packaging goods

##### *Description of the activity*

Manufacture of plastic packaging goods.

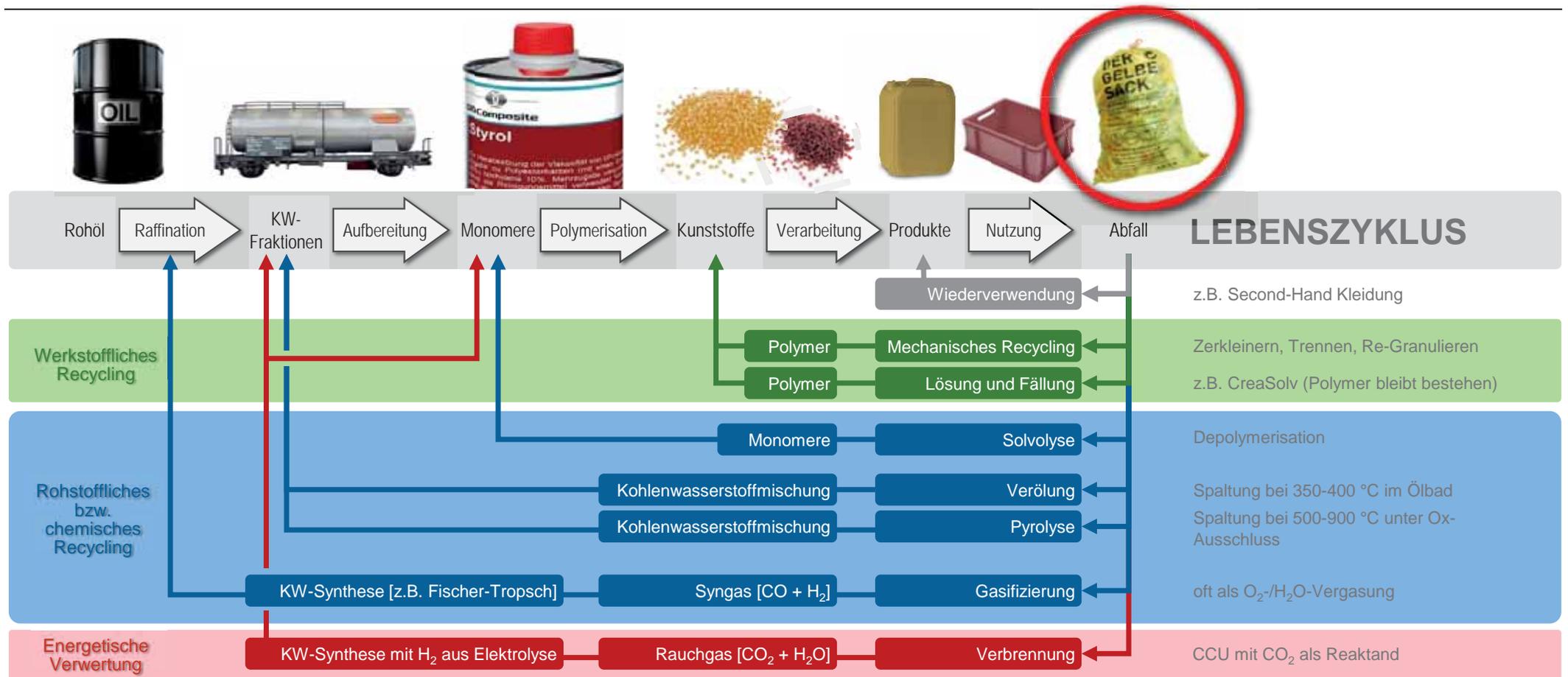
....

##### 1. The activity complies with one of the following criteria:

- (a) design for reuse: ....
- (b) use of circular feedstock: at least 65% of the packaging product by weight consists of mechanically recycled post-consumer material for non-contact sensitive packaging and at least 50% for contact sensitive packaging<sup>2</sup>. **Where producing mechanically recycled material is not technically feasible or economically viable, the product may consist of at least 65% of chemically recycled material;**
- (c) use of bio-waste feedstock: ....



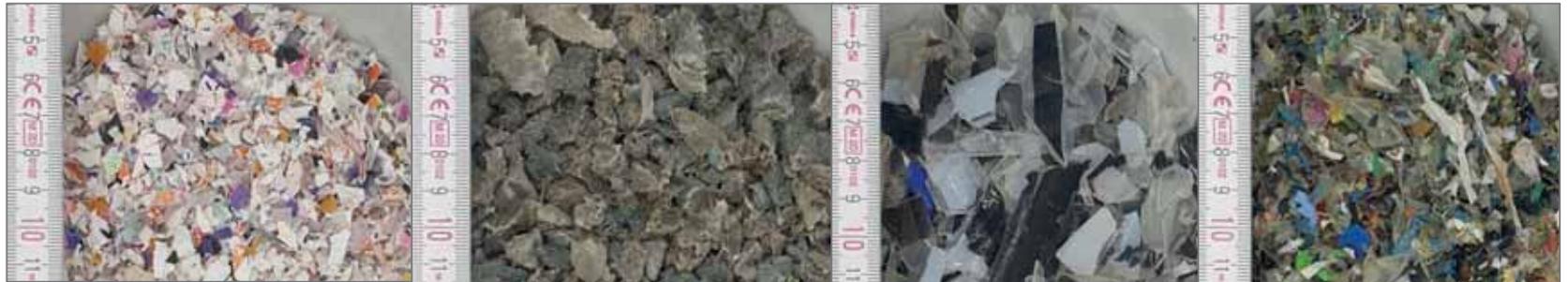
# Verfahren zur Kunststoffabfallverwertung



# Chemisches Kunststoffrecycling: Ergebnisse UBA-Studie

- Praxisanlagen

- Verölung I



Verschieden PO-Materialien

- Verölung II



EBS

PO/PA

PO/PA

# Chemisches Kunststoffrecycling: Ergebnisse UBA-Studie

- Praxisanlagen

- Verölung I



Leichtprodukt



Schwerprodukt 1



Wachs

- Verölung II



PE-PA-Verbund  
[Post Industrial]



PE/PA-Verbund  
[Post Produktion]



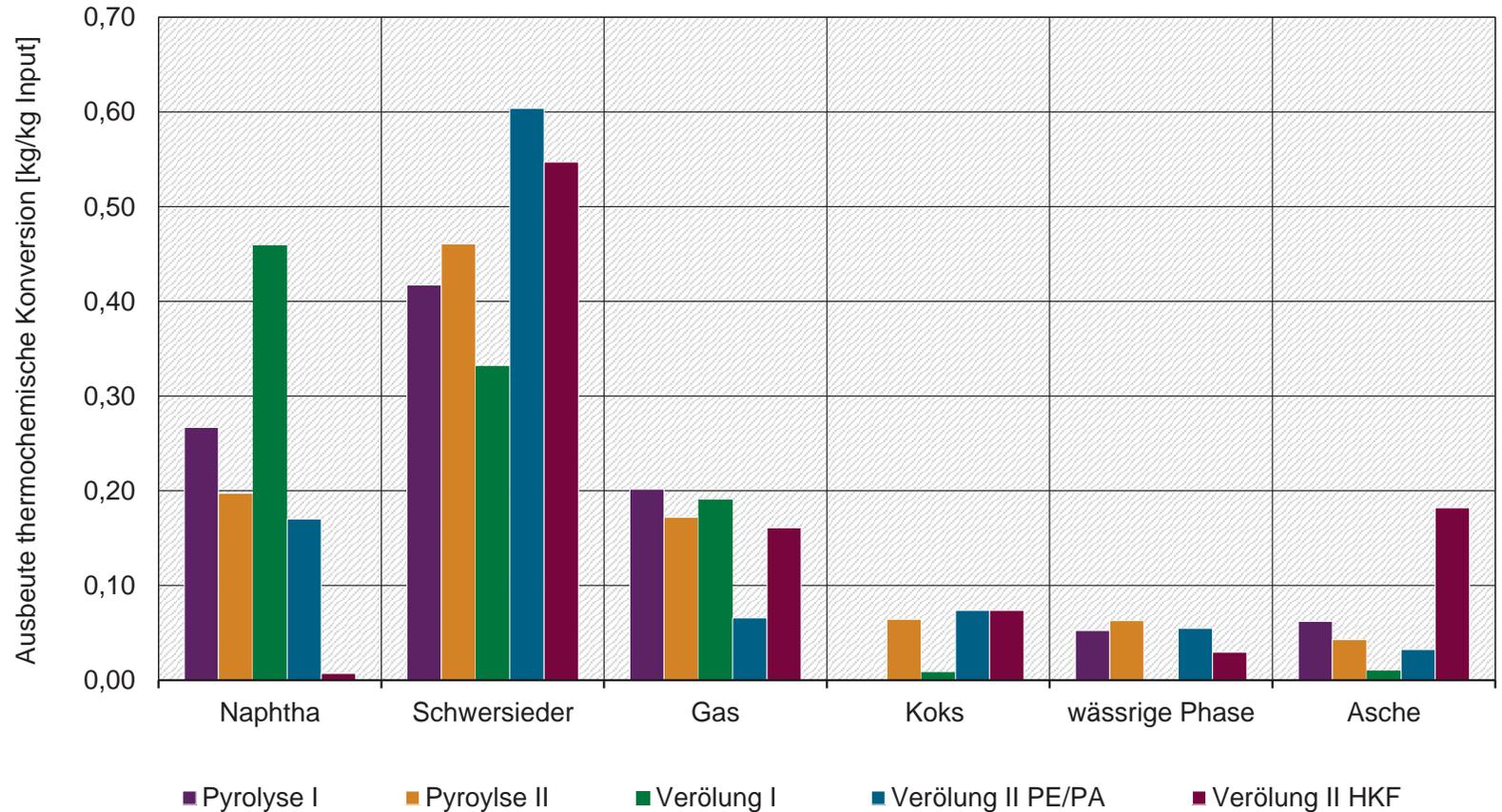
EBS



# Chemisches Kunststoffrecycling: Ergebnisse UBA-Studie

- Praxisanlagen

- Ausbeuten
- Siedeschnitt  
Naphtha-Schwersieder  
bei 180 °C
- Gas (ohne CH<sub>4</sub>)  
kann an integrierten  
Standorten stofflich  
verwertet werden



# Chemisches Kunststoffrecycling: Ergebnisse UBA-Studie

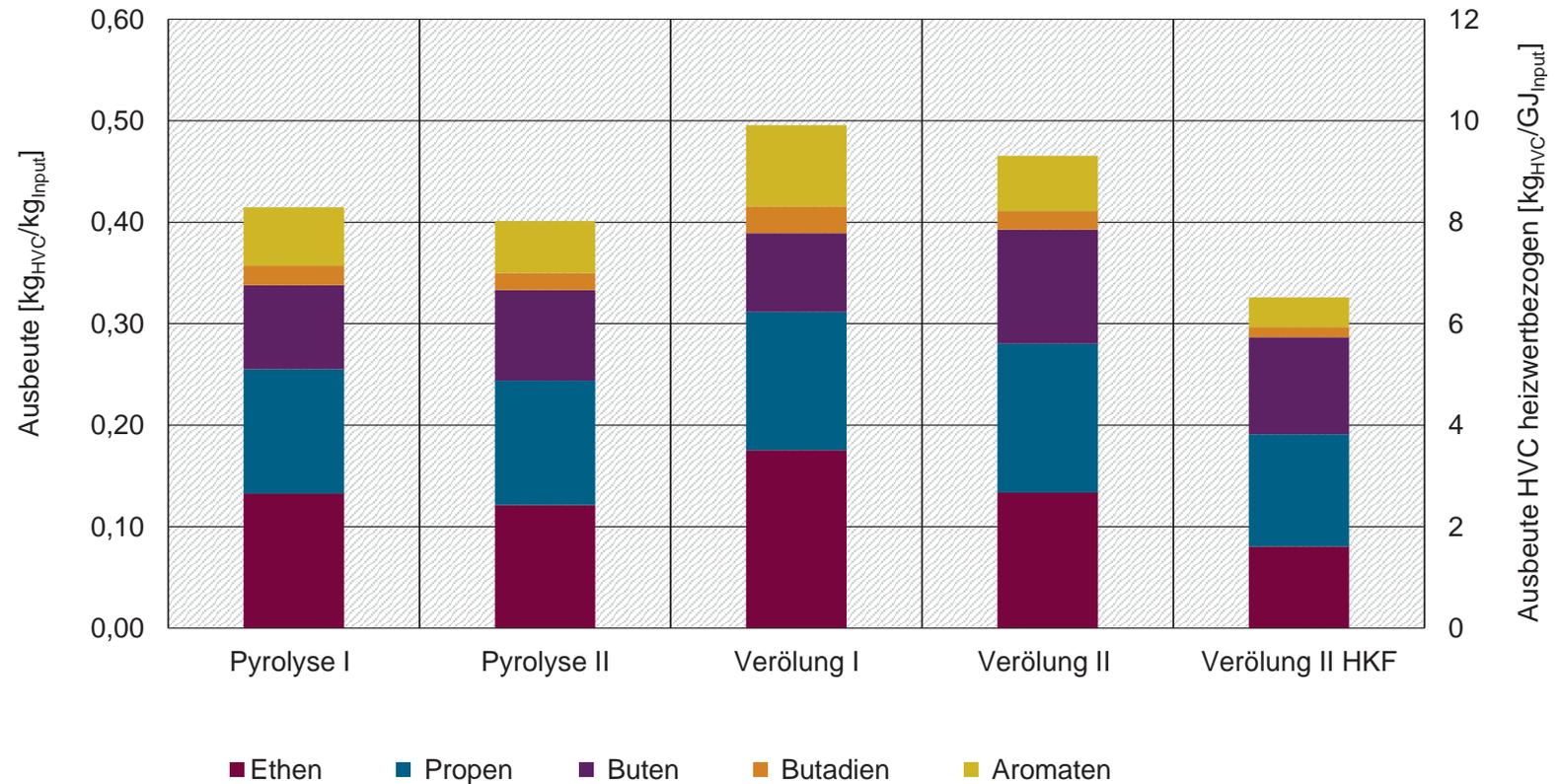
- Praxisanlagen

- Ausbeuten HVC

High-Value-Chemicals:

- Ethen
- Propen
- Buten
- Butadien
- Aromaten

- Modellierung gesamte Prozesskette



# Chemisches Kunststoffrecycling: Ergebnisse UBA-Studie

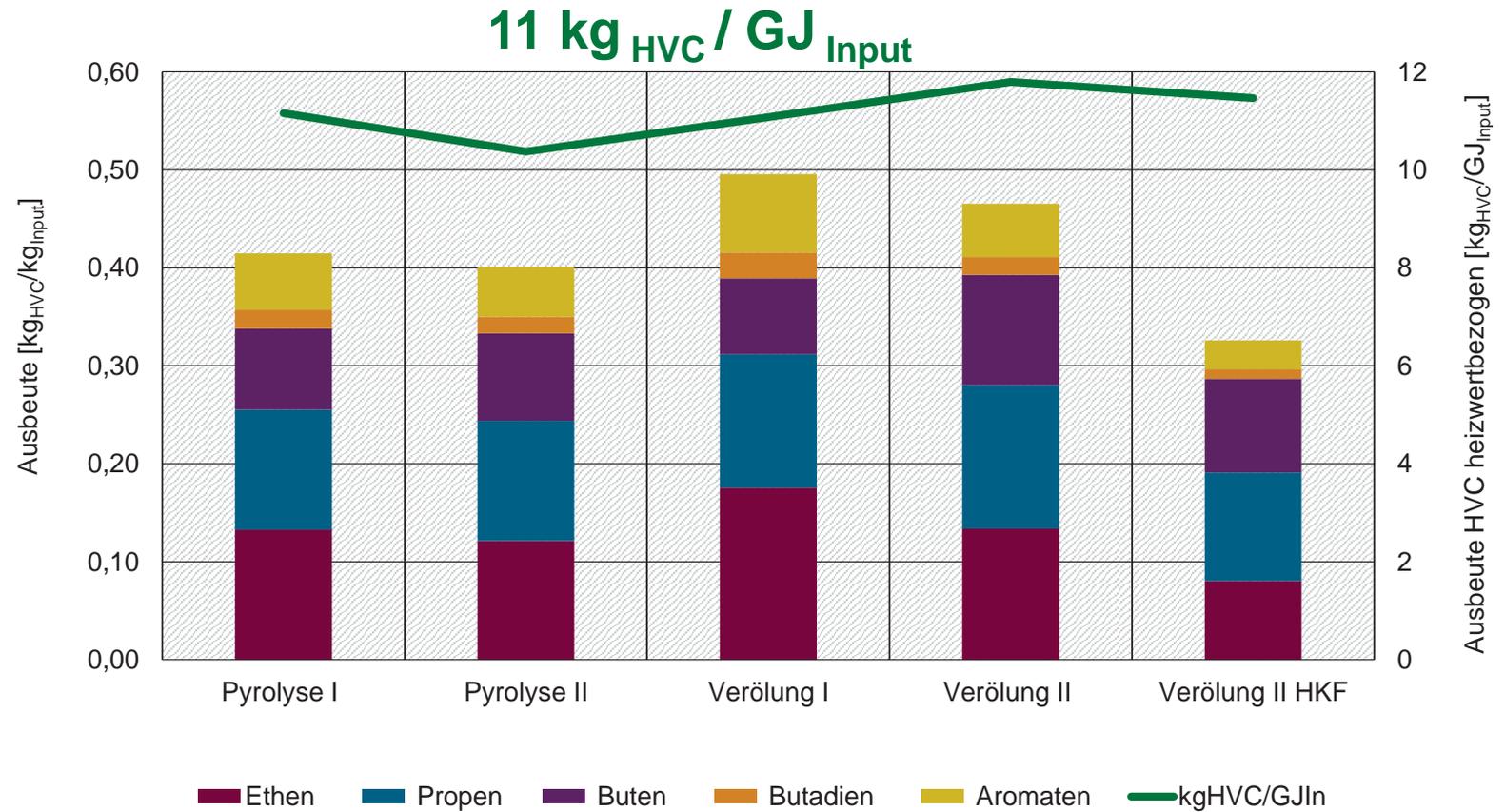
- Praxisanlagen

- Ausbeuten HVC

High-Value-Chemicals:

- Ethen
- Propen
- Buten
- Butadien
- Aromaten

- Modellierung gesamte Prozesskette



## Chemisches Kunststoffrecycling: Ergebnisse UBA-Studie

---

- Thermochemische Verfahren als **Bausteine** für das CR grundsätzlich geeignet
- In Praxisverfahren Ölausbeuten von 70-80 %
- Schlechte Ölqualitäten [Viskositäten, Verunreinigungen, Heteroatome etc.]
- Erzielbare Ausbeuten High Value Cghemicals (HVC) nach **optimalem Downstream**:
  - Verölung bis 50 % HVC/Mg<sub>Input</sub> [bei ca. 80 % Ölausbeute]
  - Pyrolyse bis 45 % HVC/Mg<sub>Input</sub> [bei ca. 70 % Ölausbeute]
  - Gasifizierung rund 30 % HVC/Mg<sub>Input</sub> [bei ca. 850 kg Syngas pro Mg Input]
- KEV & THG-Emissionen ChemRec via Pyrolyse & Verölung vgl. mit Primärroute aus Naphta
- CR-Benchmark mittels Nutzenkorbmethode [Parameter KEV & THG]
  - Signifikante Nachteile gegenüber dem mechanischen Recycling
  - Vorteile gegenüber energetischer Verwertung in MVA & EBS-KW
  - Geringfügige Nachteile gegenüber energetischer Verwertung im Zementwerk
- Ökonomische Nachteile aufgrund des hohen Aufwandes (Edukt- und Produktaufbereitung)
- **Aber**: Option der Detoxifizierung und potenzieller Baustein einer Kohlenstoffautarkie

## Chemisches Kunststoffrecycling: Ergebnisse UBA-Studie

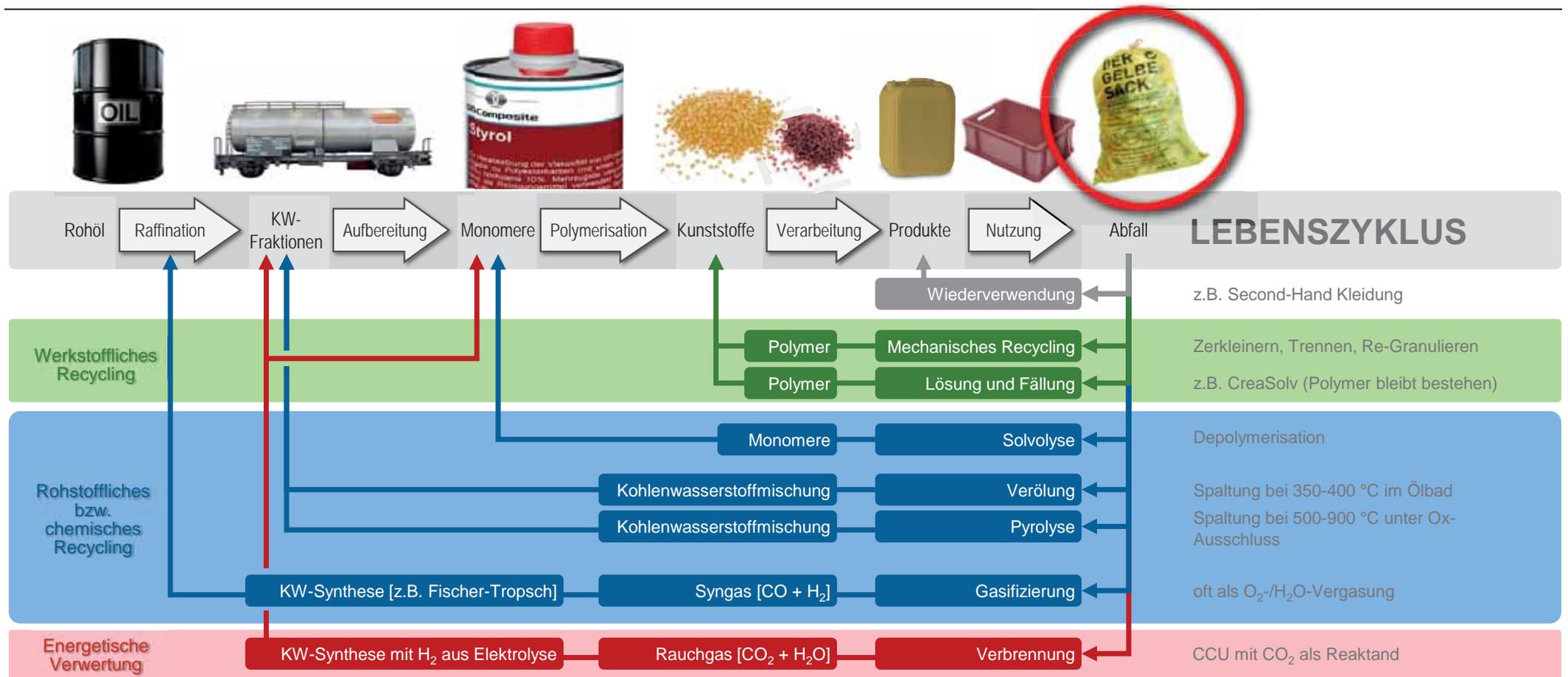
- Einsatzstoffe?



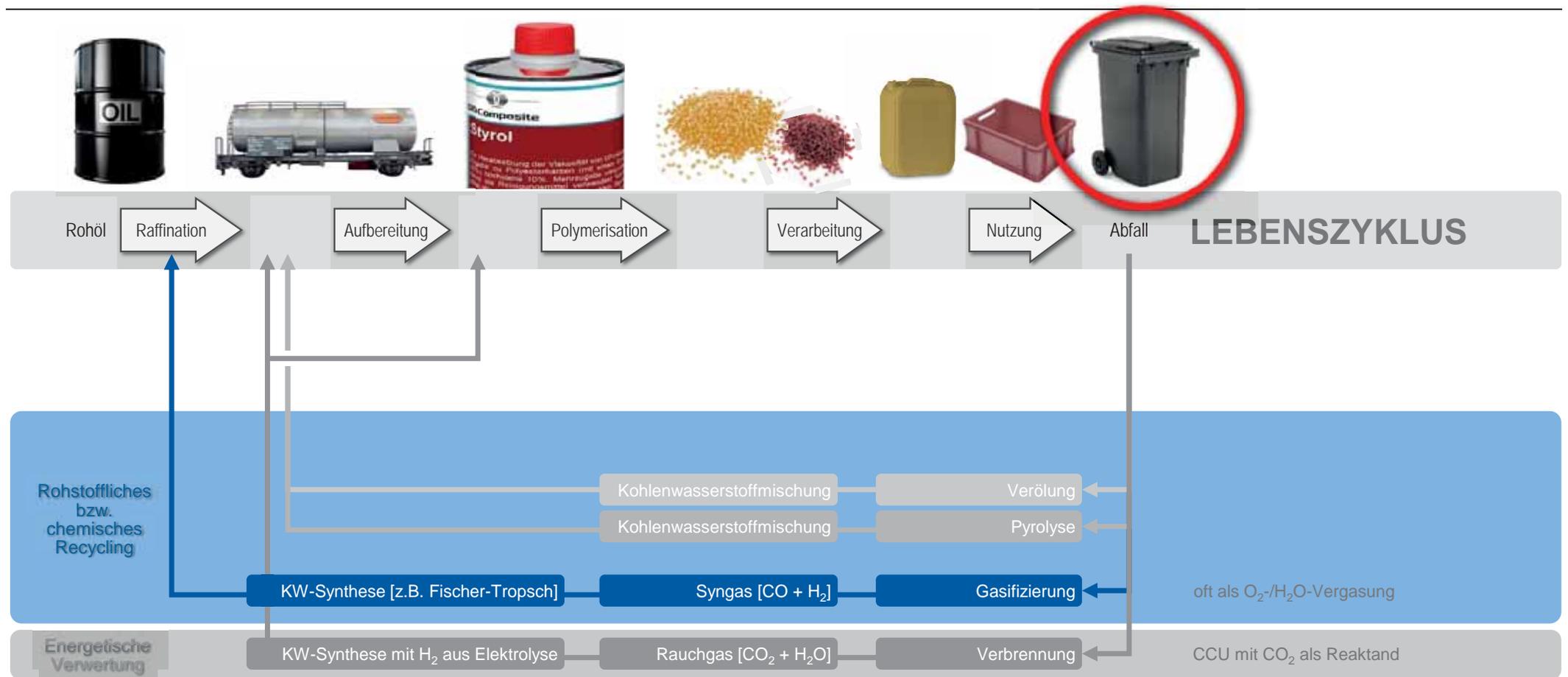
# Restabfälle



# Verfahren zur Kunststoffabfallverwertung



# Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung

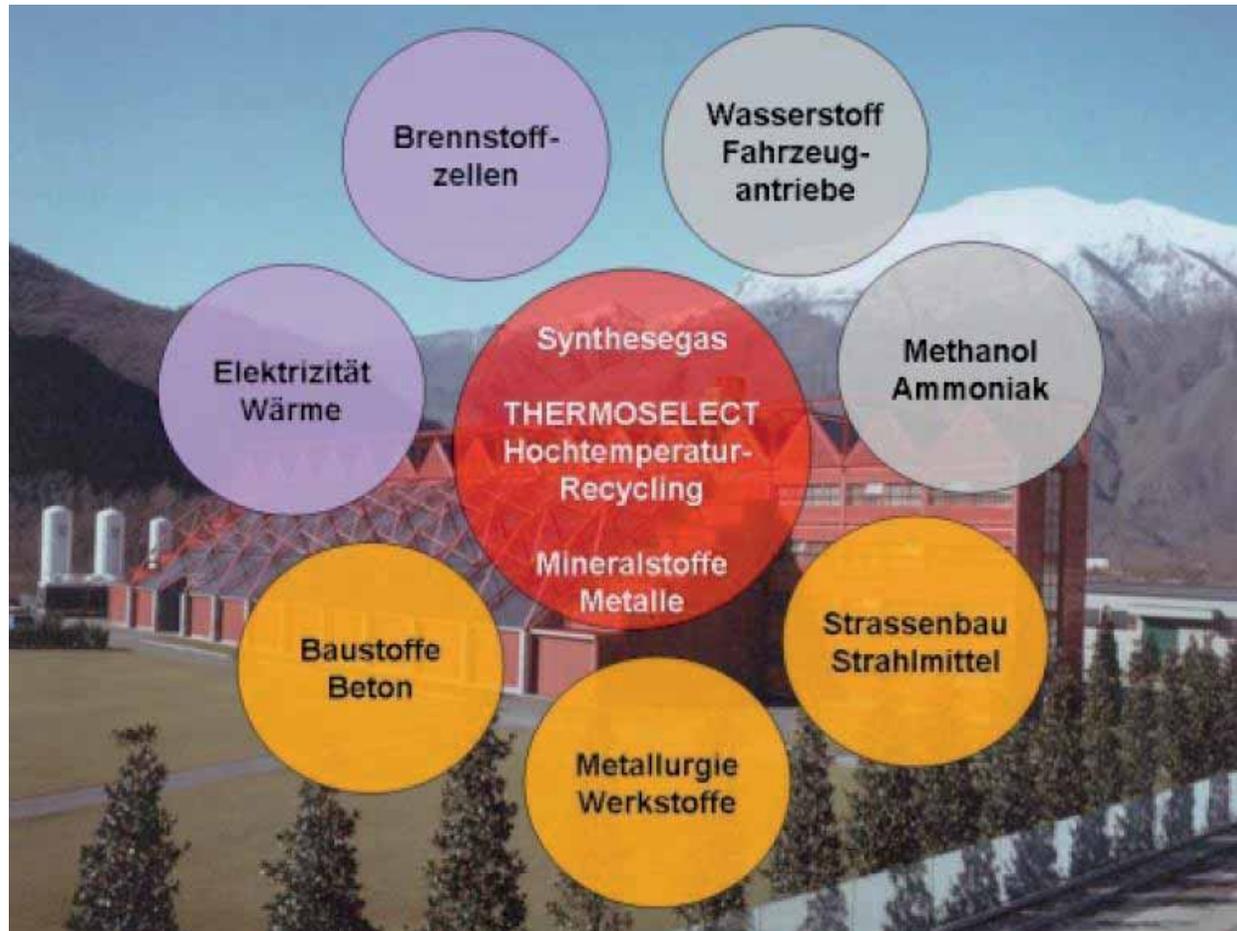


## Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung

- Erste alternative Ansätze zur thermischen Abfallbehandlung bereits im 19. Jahrhundert:
  - Versuche zur Gasproduktion (Straßenbeleuchtung) in Stuttgart, Paris, Wien
  - Gaserzeugung zur motorischen Nutzung in San José
- Erste großtechnische Anlagen in 1970ern
  - Kaum erfolgreicher Langzeitbetrieb in Europa
  - SVZ Schwarze Pumpe technologisch erfolgreich, aber nicht wirtschaftlich
  - Diverse Anlagen in Asien, insb. Japan
- Ab 2000 Neubauten in GB
- Aktuelle Renaissance aufgrund CO<sub>2</sub>-Problematik

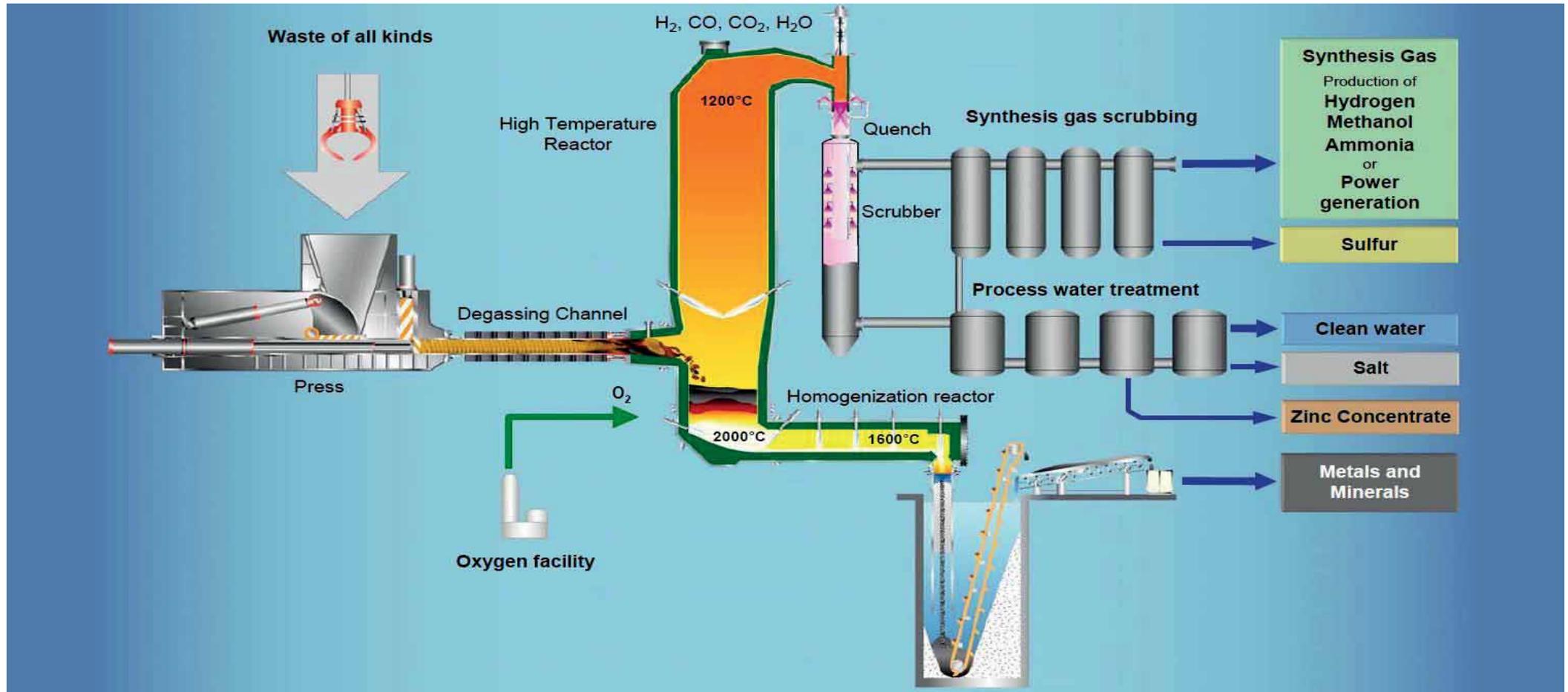


## Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung – Thermoselect



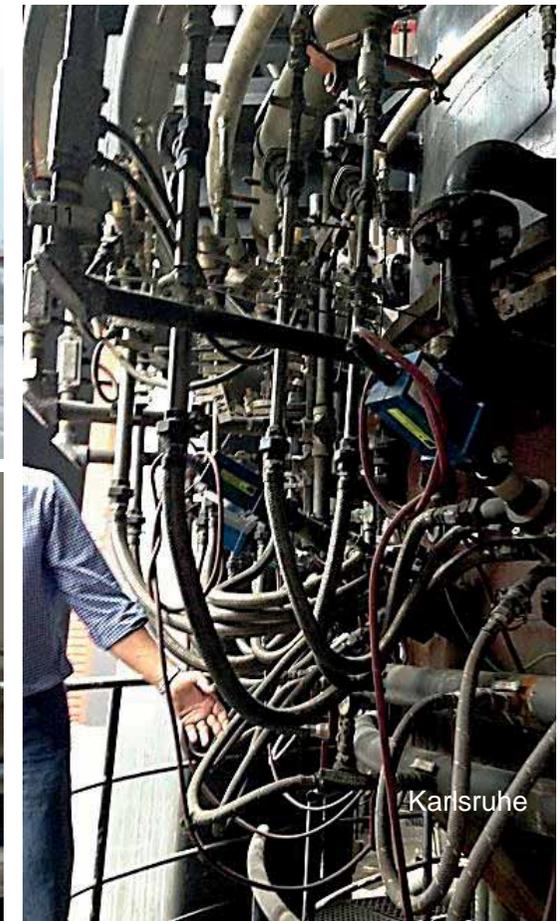
Quelle: Umweltmagazin

## Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung – Thermoselect



Quelle: Thermoselect

## Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung – Thermoselect



Quelle: Thermoselect, eigene Fotos

## Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung – Thermoselect

- In Japan noch mehre Anlagen in Betrieb
- Notizen aus Yorii (2017)
  - Verfügbarkeit 82-87 % (nach 11 Jahren Betrieb)
  - Gasqualität trotz vielstufiger Gasreinigung nicht zur motorischen Nutzung geeignet (Brennkammer)
  - ca. 5 % C-Gehalt „Schlacke“
  - Verbräuche:
    - 300-400 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O pro Tag
    - 400 m<sup>3</sup> O<sub>2</sub> pro Mg Abfall
    - 40 m<sup>3</sup> Erdgas pro Mg Abfall
    - **10 Mio € Verlust pro Jahr**



Yorii, Japan



Chiba, Japan



## Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung- Air products & AlterNRG

- Teesside GB

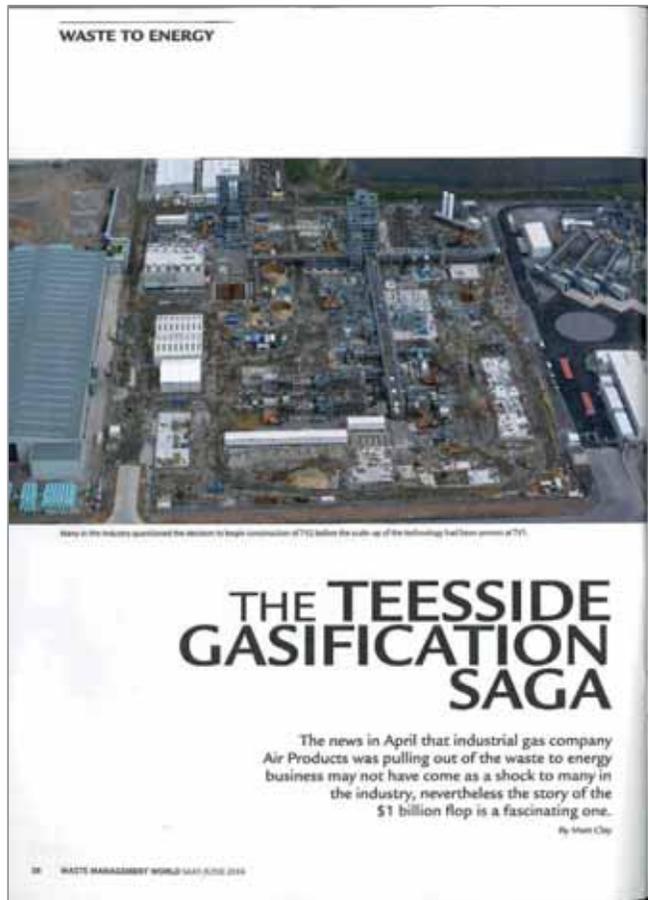


## Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung – Air products & AlterNRG

- Teesside GB



## Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung – AlterNRG [Air products]



Hopefully lessons can be learned from the experience and the UK should not lose hope on eventually scaling up gasification to treat waste on a large scale. —



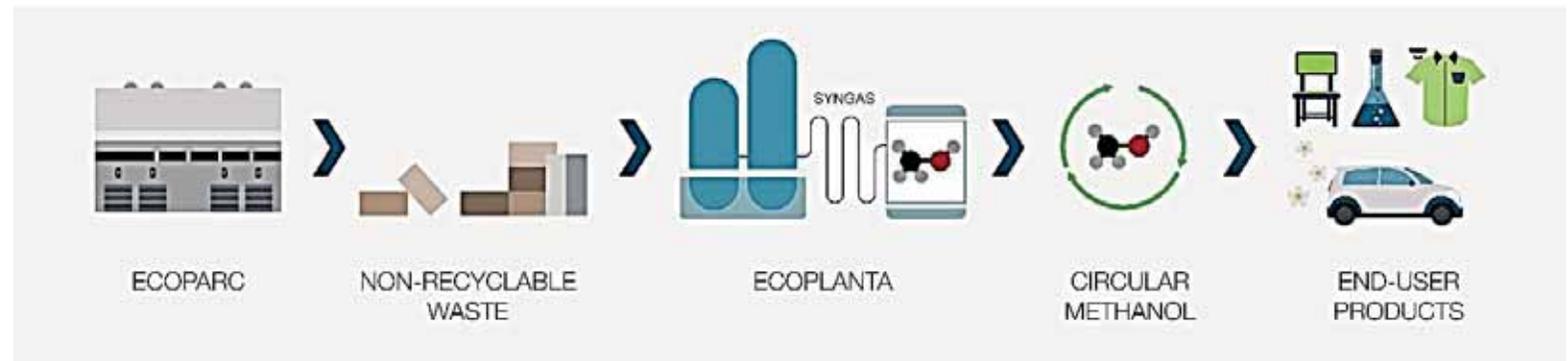
Quelle [www.istockphoto.com](http://www.istockphoto.com) | <http://beta.allergikerl.de/?tag=haare> | <https://de.fotolia.com>

## Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung – Enerkem

- EU-Förderung für Ecoplanta
- Ecoplanta = Joint Venture zwischen Veolia (Agbar), Repsol und Enerkem
- 240.000 Mg/a Methanol



### Transforming waste into circular methanol



#### Decarbonization solution - GHG emissions reduction

- Achieving 3.4 Mt CO<sub>2</sub>eq of greenhouse gas (GHG) emissions reductions over the first ten years of operation.
- Recycling over 70% of the carbon present in the residual waste.

## Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung – Enerkem

- Ecoplanta = Joint Venture zwischen Veolia (Agbar), Repsol und Enerkem
- 240.000 Mg/a Methanol
- EU-Förderung für Ecoplanta

<b>AMOUNT OF INNOVATION FUND GRANT</b>
EUR 106 379 783
<b>RELEVANT COSTS</b>
EUR 185 164 706
<b>CAPEX</b>
EUR 749 729 639
<b>TOTAL PROJECT COSTS</b>
EUR 2 496 472 661

**INNOVATION FUND**  
Driving clean innovative technologies towards the market

**ECOPLANTA: Reduction of CO<sub>2</sub> emissions from municipal non-recyclable waste to produce methanol**

The Innovation Fund is 100% funded by the EU Emissions Trading System

**COORDINATOR**  
ECOPLANTA MOLECULAR RECYCLING SOLUTIONS S.L.

**LOCATION**

<https://enerkem.com/news-release/ecoplanta-signs-grant-agreement-with-the-european-commission-under-the-innovation-fund/>

## Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung – FUREC

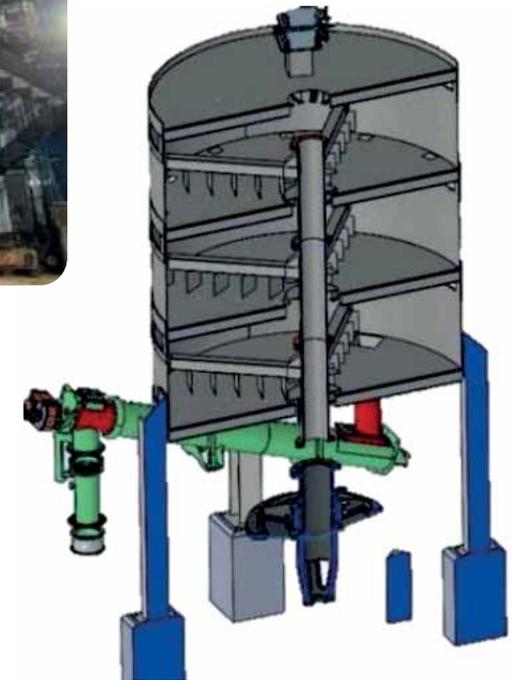
- RWE-Projekt zur Gasifizierung von Restabfällen



<https://www.rwe.com/forschung-und-entwicklung/wasserstoff-projekte/furec/>

## Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung – FUREC

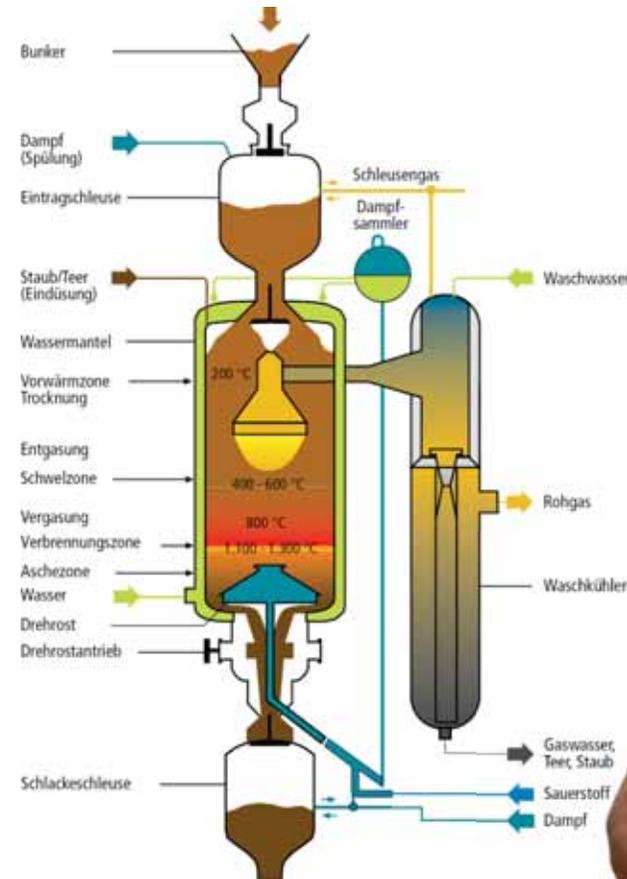
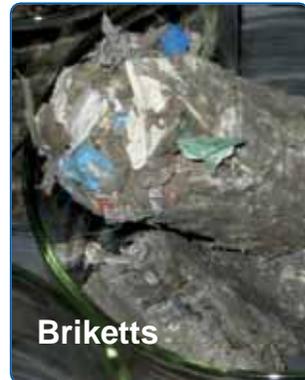
- RWE-Projekt zur Gasifizierung von Restabfällen
- Restabfallaufbereitung
  - Zerkleinern und Trocknen,
  - FE-Metall-Abscheidung,
  - NE-Metall-Abscheidung,
  - Abscheidung mineralischer Störstoffe und
  - Pelletierung
- Torrefizierung der Pellets im Etagenofen
- Mahlung der torrefizierten Pellets
- Flugstromvergasung



Quelle: Ginsberg et al. 2023

# Alternative thermische Verfahren zur Kunststoffabfallverwertung – Beispiel SVZ

- SVZ Vergaser  
(25 bar | 1.600-1.800° C)
  - Festbettvergasung
  - Flugstromvergasung  
BGL-Schlackebadvergaser



# Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung – Hedviga

## Hedviga

- Diskontinuierliche Pyrolyse „Hedviga“ bei 380 C, 2-3 h VWZ
- Batch-Betrieb mit Kran
- Gewinnung flüssiger und gasförmiger Brennstoffe für KWK
- 3 Referenzanlagen (CZ, GB, China)



Quelle: <https://hedviga.eu/>

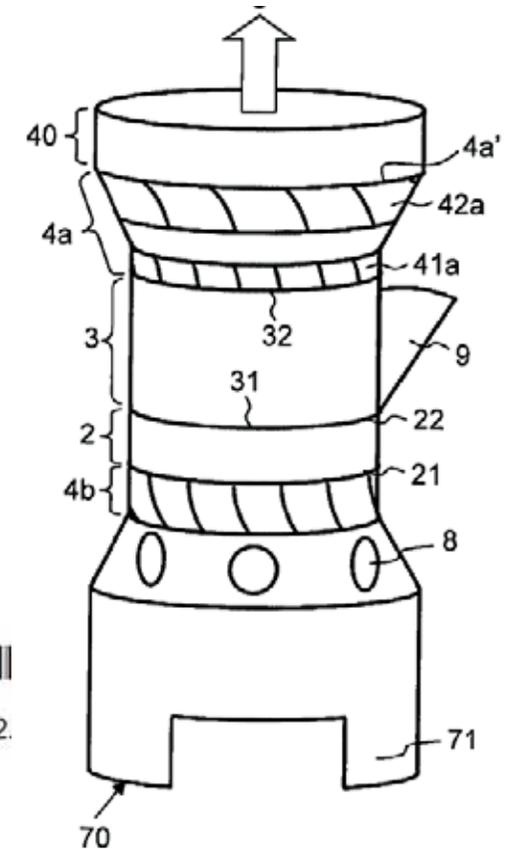
# Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung – Die Müllturbine

## Müllturbine

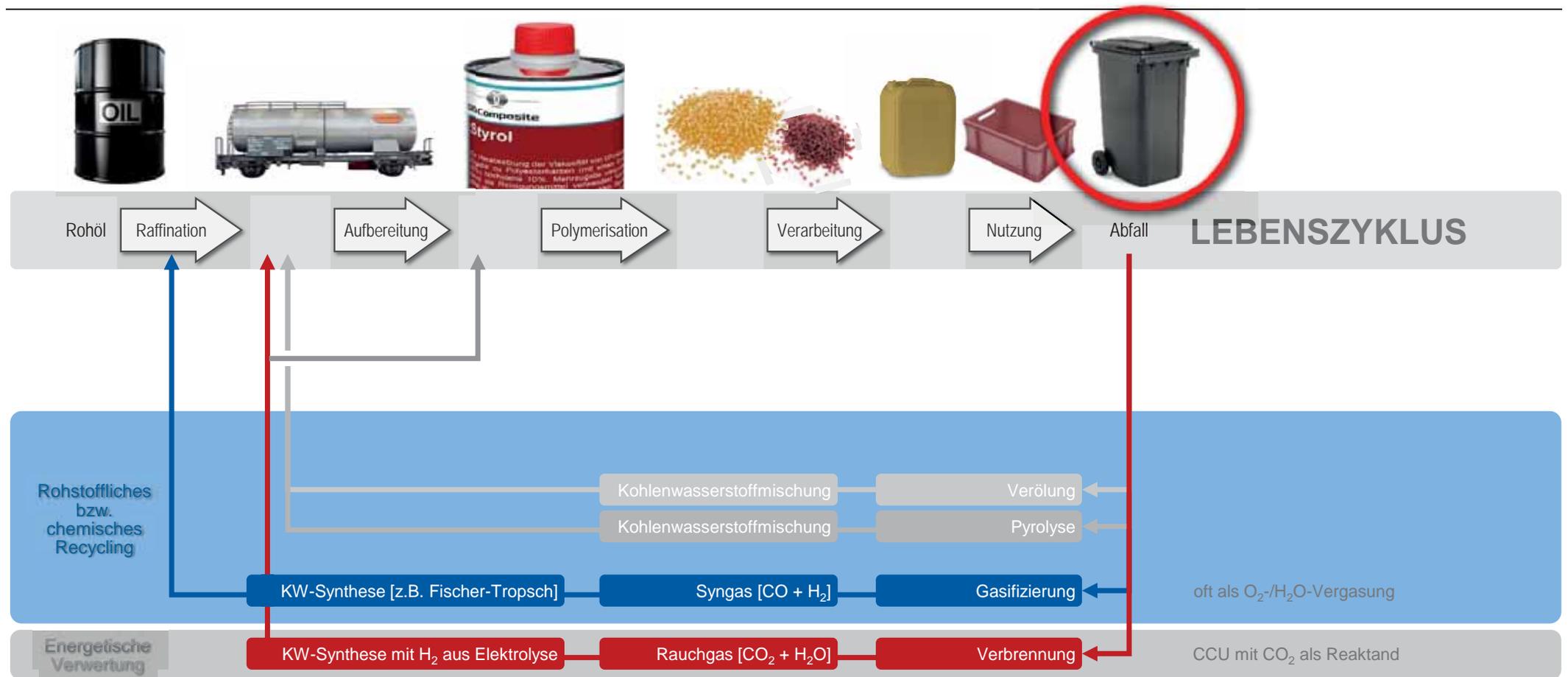
- Aus der Beschreibung:
  - „Verfahren zur gekoppelten Müllverbrennung und Gewinnung elektrischer Energie, die als kompakte Baueinheit ausgebildet ist.“
  - Die Vorrichtung hat eine Müll-Brennkammer (3) ... [die] eine Beschickungsöffnung (9) aufweist.
  - Ferner sind eine ... eine Gasturbine (4a), ein Kompressor (4b) und ein Generator (5) vorgesehen, die ... gekoppelt sind.

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}}$$

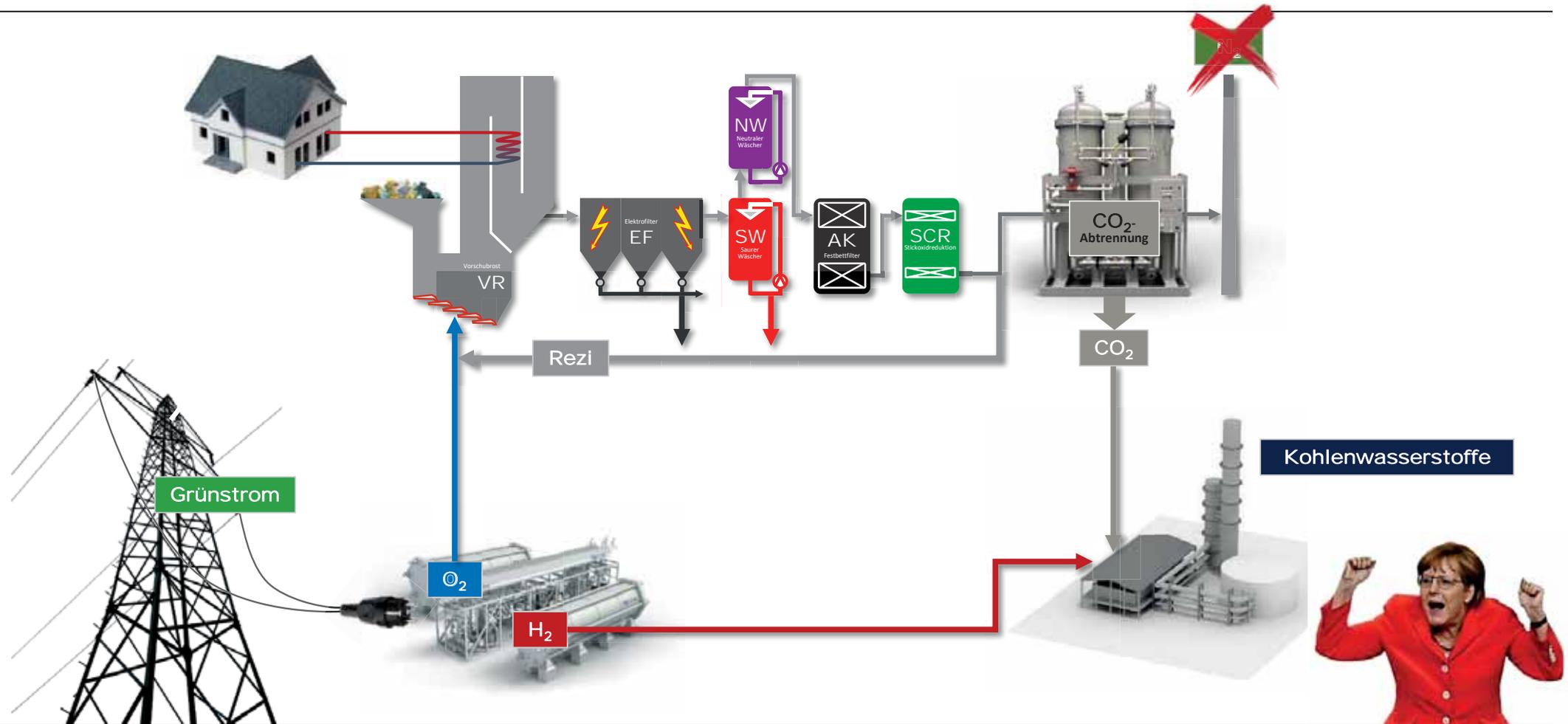
von ca. 6%.



# Alternative thermische Verfahren zur Restabfallverwertung



## Fazit: Alternative zu den Alternativen – CCU an der MVA



# Klärschlamm



# Klärschlamm – Übersicht thermische Klärschlammbehandlung

## Monoverbrennung

- Stationäre Wirbelschicht
- Drehrohr
- Rostfeuerung
- Etagenöfen
- Etagenwirbler
- Staubfeuerung
- Vorschubofen



## Mitverbrennung

- Müllverbrennung
- Kohlekraftwerke
- Zementwerk



## Alternative Verfahren

- Hydrothermale Karbonisierung
- Pyrolyse
- Vergasung
- Metallurgische Verfahren



## Klärschlamm – HTC: TerraNova Energy

- Behandlung bei 200 ° C und 20-35 bar unter Luftabschluss für ca. 3 Stunden
- TS-Gehalt Produkt: 65-70 %, anschließend thermische Verwertung



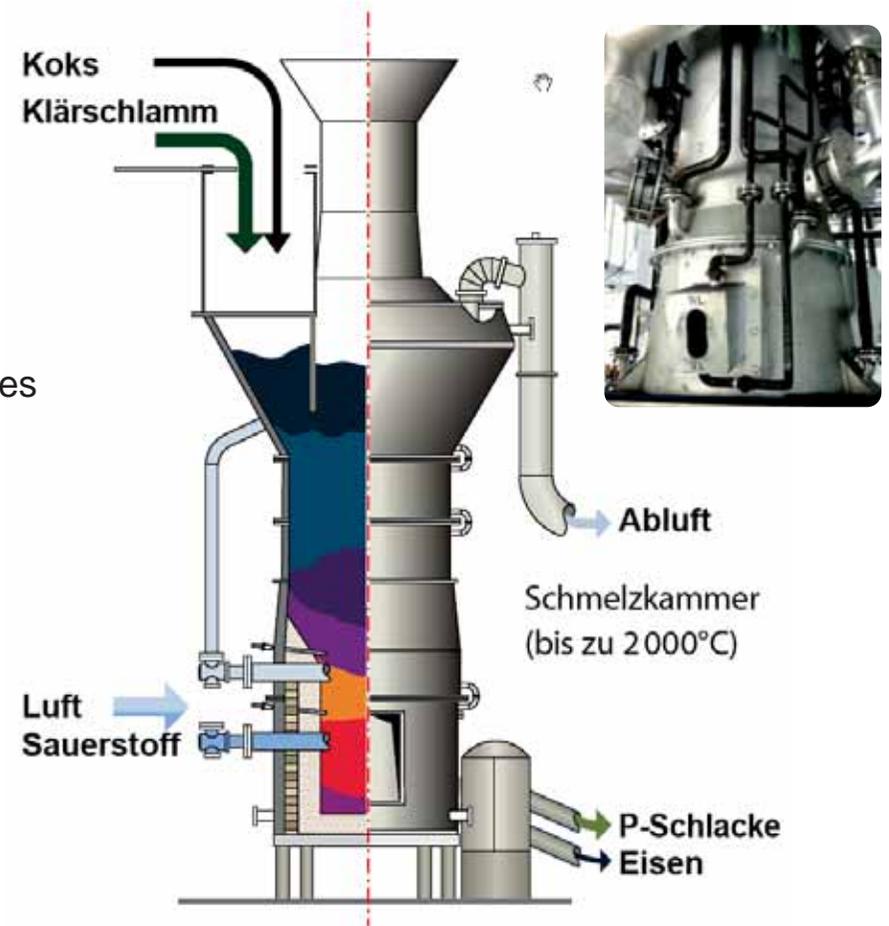
# Klärschlamm – Nassoxidation

- XXX



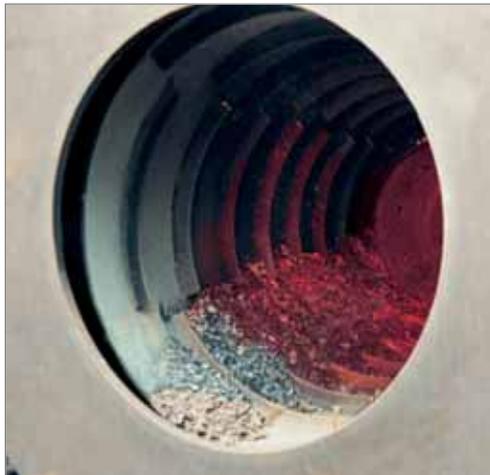
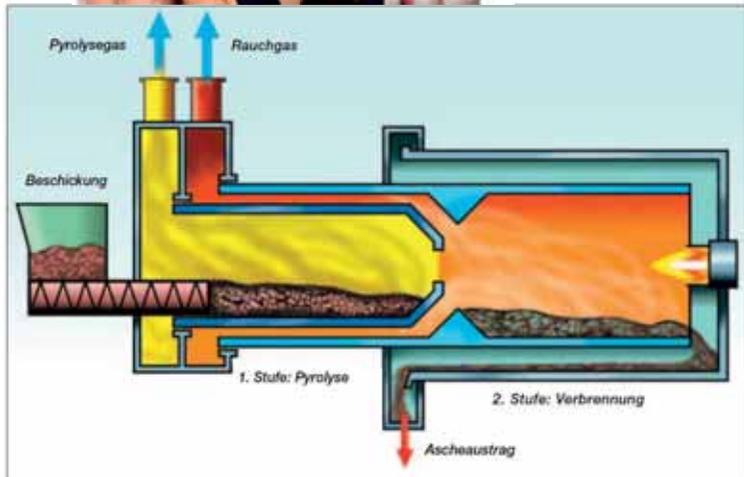
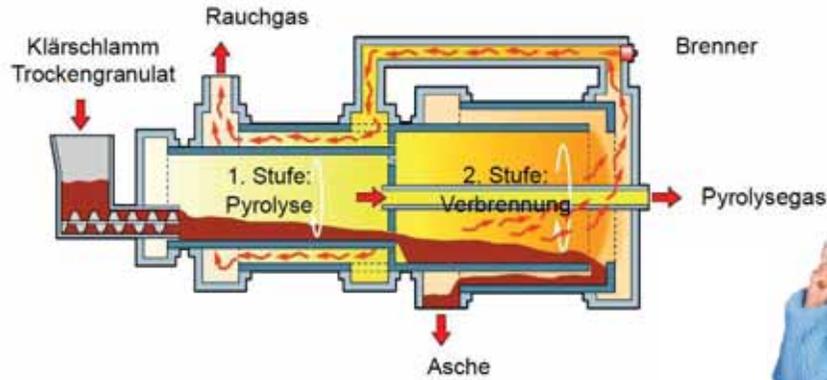
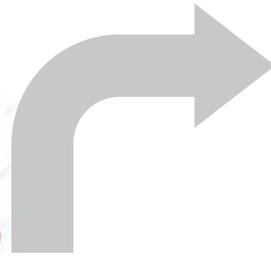
## Klärschlamm: Metallurgisches Verfahren – Mephrec

- Metallurgisches Phosphor-Recycling:  
Gewinnung phosphathaltige Schlacke ( $P_2O_5$  ca. 16 Gew.-%)
- Sauerstoffangereicherter Heißwind
- Einsatz von fossiler Primärenergie (Koks) erforderlich
- Brikettierung
- Pilotanlage in Nürnberg
  - Probleme: Staub-,  $SO_2$ -,  $NO_x$ - und Teerbelastung des erzeugten Gases
  - niedriger P-Gehalt der Schlacke (P-Austrag mit Staub)
  - Bei Projektabschluss keine Überführung in Dauerbetrieb



# Klärschlamm – Pyrolyse: Pyrobustor

- Entwicklung Fa. Eisenmann
  - Kopplung Pyrolyse & Verbrennung



# Klärschlamm

- **Pyrolyse:** Beispiel TCR

- Zweistufiges Verfahren: Pyrolyse + Reformierung der Gase (bisher Technikum)
- Demonstrationsanlage (14 Mio. € Projekt To-Syn-Fuel) in Markt Hohenburg zur Herstellung von „grünem Wasserstoff“, „Biokraftstoffen“ und „Biokohle“
- Projekt im Oktober 2022 „erfolgreich abgeschlossen“, die „Forschung und Entwicklung [...] sollen weitergehen“



[Fraunhofer Umsicht Institutsteil Sulzbach Rosenberg, 2Synfuel]

# Klärschlamm

- **Pyrolyse:** Beispiel Zweckverband Frohnbach
  - Pyrolyseanlage in Niederfrohna (Sachsen) seit April 2020
  - „Kurzzeitige“ Pyrolyse bei 600-650 °C



- Laut Betreiber:  
Beseitigung aller organischen Inhaltsstoffe und Erzeugung eines stark phosphorhaltigen, keimfreien und schadstoffarmen Karbonisats
- Karbonisat wird von Interessierten kostenlos abgeholt



## 6. Wertung und Fazit

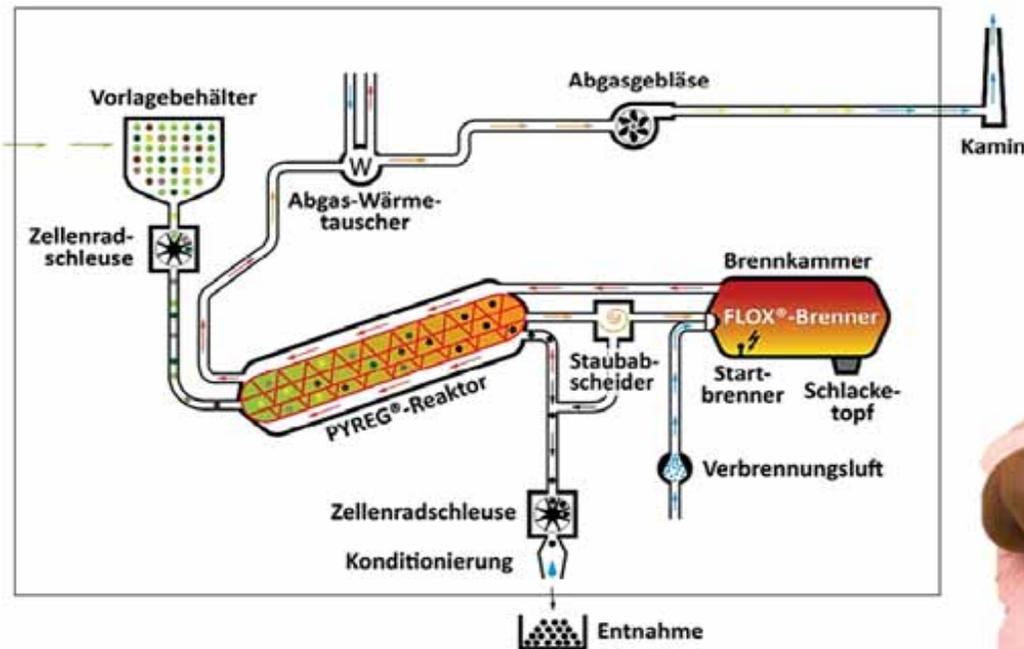
[Zitat Dr.-Ing. Steffen Heinrich, in Verwertung von Klärschlamm 5, TK Verlag 2022]

Die unbelehrbar skeptischen, verallgemeinernden oder generell ablehnenden Beurteilungen durch im Wissenschaftsbetrieb tätige Behördenberater (*Influencer*) und der industriellen Abfallwirtschaft Hörige hinsichtlich der Pyrolyse von Klärschlamm sind widerlegt. Sie gilt vor allem aus Sicht der Bodenkunde, der Kohlenstoffspeicherung und des Klimaschutzes als das Verfahren der ersten Wahl. Die mit vorgeschobenen Argumenten verteidigten einschränkenden Regelungen sind unangemessen und widersprechen höherem Recht.

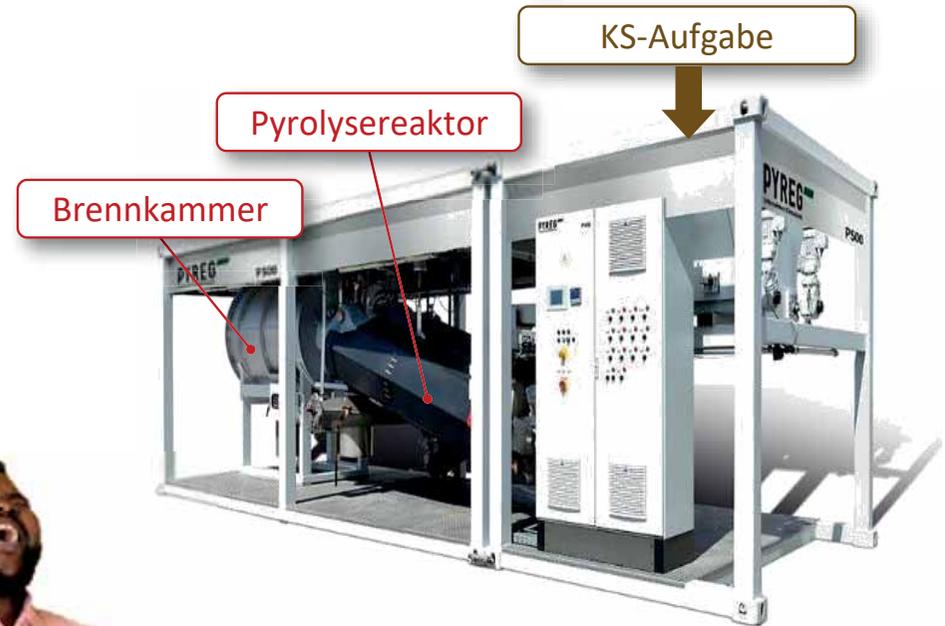
# Klärschlamm

- **Pyrolyse:** Beispiel Pyreg

- 3 technische Anlagen
- Karbonisat muss verbrannt werden

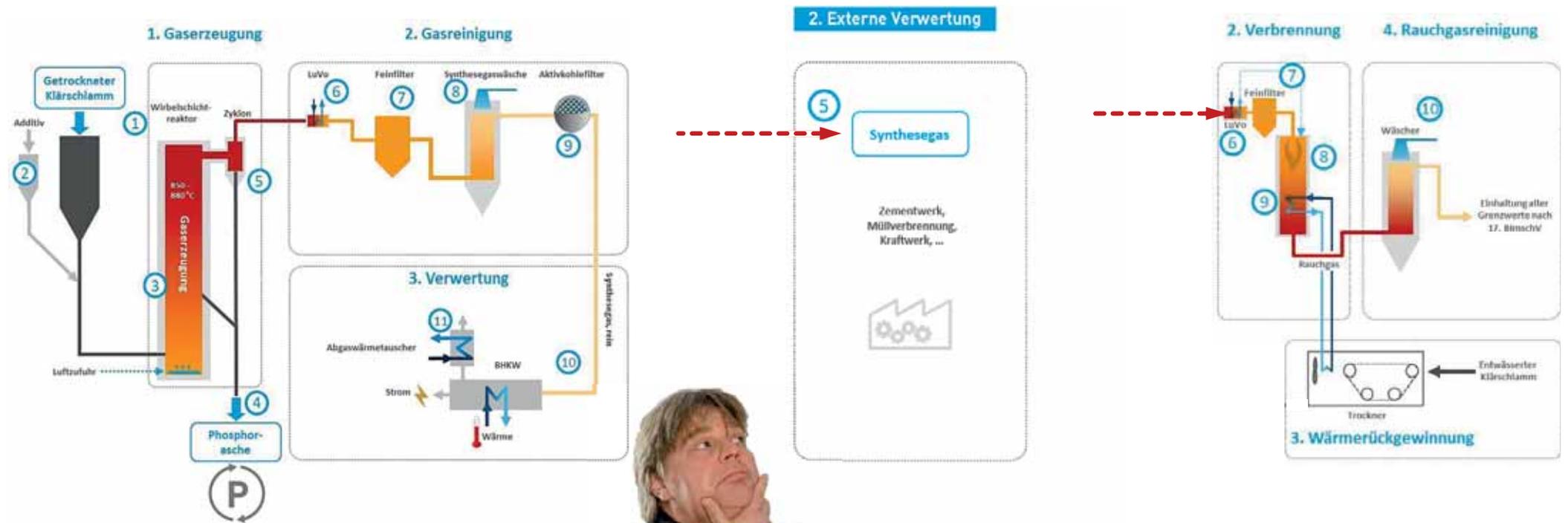


[Pyreg]



# Klärschlamm

- Gasifizierung: Beispiel Sülzle Kopf Syngas



[<https://kopf-syngas.de/syngas-bhkw-modul>]



# Fazit



## Fazit

---

- Die Alternativen Thermischen Verfahren sind wieder da
- Bevorzugte Stoffströme sind
  - Kunststoffe  
Das chemische Recycling von Kunststoffen ist bereits Realität (vgl. EU-Taxonomiegesetzgebung)
  - Restabfälle  
Der Druck zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung ermöglicht neue Ansätze in der thermischen Restabfallbehandlung
  - Klärschlamm  
Klärschlamm-Pyrolyse (insbesondere in Skandinavien) im Fokus
  - ...
- Sehr hoher Aufwand erforderlich, wenn vermarktbare Produkte erzeugt werden sollen
- Technisch ist vieles möglich...
  - ... aber wirtschaftlich und ökologisch sind viele Fragen offen
- Für die Klimaneutralität der (chemischen) Industrie werden diese Ansätze eine Rolle spielen

## Fazit: Die Realität der Alternativen Thermischen Verfahren



Pyrolysegasleitung



Pyrolysegasleitung



Produktöl Pyrolyse





<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/abschaetzung-der-potenziale-bewertung-der-techniken>  
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/evaluation-neuer-entwicklungen-bei-alternativen>  
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sachstand-zu-den-alternativen-verfahren-fuer-die>

**Vielen Dank  
für Ihre Aufmerksamkeit**

Peter Quicker  
RWTH Aachen University

[www.teer.rwth-aachen.de](http://www.teer.rwth-aachen.de)

