

# Chemisches Recycling von Kunststoffen – Potenziale, Risiken und viele offene Fragen



# Der NABU

- 120. Geburtstag im Jahr 2019  
1899 als „Bund für Vogelschutz“ gegründet
- 700.000 Mitglieder und Förderer  
Mitgliederstärkster Umweltverband in Deutschland
- Bundesweit aktiv und demokratisch organisiert  
2.000 Orts- und Fachgruppen sowie 37.000 Aktive

## Ziele

- Erhalt der Lebensraum- und Artenvielfalt  
Nachhaltigkeit in der Land-, Wald- und Wasserwirtschaft,  
Klimaschutz, Ressourcenschonung
- Engagement für nachhaltigeren Konsumstil  
Weniger Abfall, Suffizienz, durchdachtes Ökodesign, bessere  
Kreislaufwirtschaft



# Ablauf

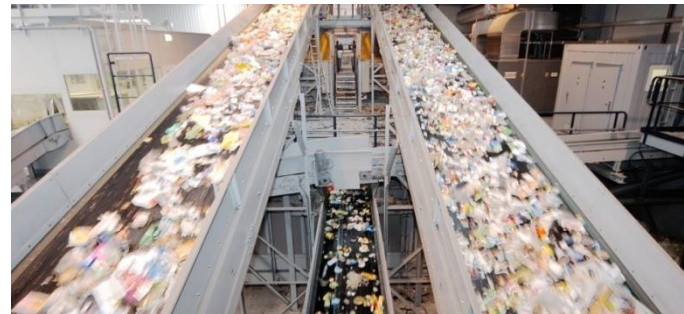
- A. Herausforderungen bei Kunststoffen/ Politischer Rahmen/ Definitionen
- B. Warum chemisches „Recycling“? – Hoffnungen und Ziele
- C. Wie funktioniert chemisches Recycling? Welche Verfahren gibt es?
- D. Welche technischen und ökologischen Probleme gibt es beim chemischen Recycling?
- E. Wie muss der zukünftige politische Rahmen für das chemische Recycling aussehen?

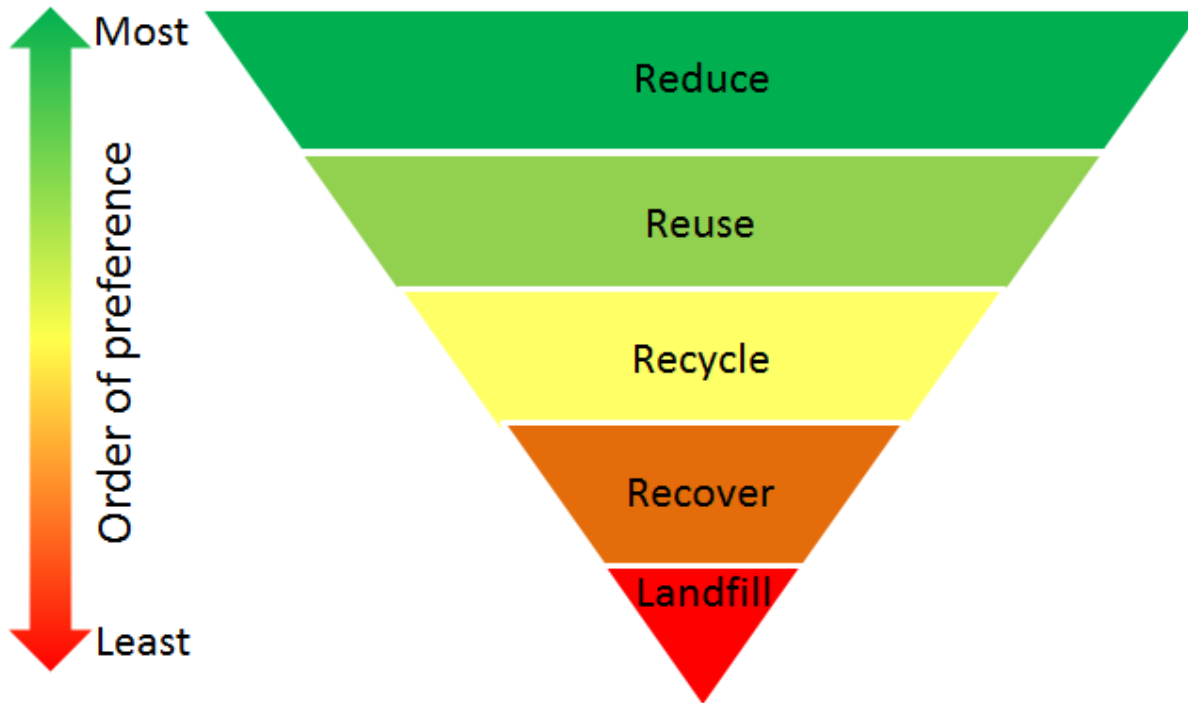
# HERAUSFORDERUNGEN BEI KUNSTSTOFFEN/ POLITISCHER RAHMEN/DEFINITIONEN

# Vor welcher Herausforderung stehen wir bei Kunststoffen?

- **Zu viele** (In der EU 25 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle pro Jahr, weniger als 30 Prozent werden für Recycling gesammelt, 39 Prozent werden verbrannt, 31 Prozent deponiert)
- **Zu viel Vermüllung** (85 Prozent des Mülls an den Stränden weltweit sind aus Plastik)
- **Zu schädlich** (Weichmacher/ Flammhemmer/ etc.)
- **Zu viel Mikroplastik** (knapp 1 Mio. Tonnen primäres Mikroplastik pro Jahr in die Weltmeere)
- **Zu schlecht recycelbar** (fehlendes Design for Recycling und Produktverantwortung)
- **Zu viel Verbrennung** (schlechte Erfassungsstrukturen und falsche Anreizpolitik)

Fotoquellen: NABU/Alba





# Politischer Rahmen rund um das Kunststoffrecycling (EU)

## EU

- Kreislaufwirtschaftspaket: bis **2025 50 Prozent Recyclingquote** für alle Kunststoffverpackungen
- Plastikstrategie:
  - Alle **Kunststoffverpackungen** sollen bis **2030 recyclingfähig** sein („in a cost-effective manner“)
  - **25 Prozent Rezyklatanteil in Plastikflaschen** ab 2025/ 30 Prozent ab 2030
- Circular Plastic Alliance: freiwillige Selbstverpflichtungen der Industrie, um bis 2025 **10 Mio. Tonnen Kunststoffrezyklate** einzusetzen
- **EU-Plastiksteuer**: 80 Cent je Kilogramm nicht recycelter Kunststoff-Verpackungsabfälle



# Politischer Rahmen rund um das Kunststoffrecycling (Deutschland)

## Deutschland

- Materialspezifische Recyclingquoten für Kunststoffe gibt es nur im **Verpackungsgesetz**
- Ab 2019: 58,5 Prozent Recycling (werkstoffliche Verwertung) [Basis ist Beteiligungsmenge]
- Ab 2022: 63 Prozent Recycling (werkstoffliche Verwertung) [Basis ist Beteiligungsmenge]
- Ab 2019: 90 Prozent Verwertungsquote (inklusive Vorbereitung zur Wiederverwendung oder energetische Verwertung)
- Verbundverpackungen: 70 Prozent Recyclingquote ab 2022
- Ergänzung: 50 Prozent Recyclingquote auf ALLE eingesammelten Verpackungsabfälle

**Herausforderung Quotenberechnung:** Nicht mehr Input, sondern Berechnung nach Sortierung und Reinigung („Was geht in den Extruder?“)



# Definitionen von Recycling (I)

Artikel 3 (17) der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG sowie §3 (25) KrWG:

*„**Recycling**“: jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu **Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen** entweder für den ursprünglichen Zweck **oder für andere Zwecke** aufbereitet werden. Es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, aber **nicht die energetische Verwertung** und die Aufbereitung zu Materialien, die für die **Verwendung als Brennstoff** oder zur **Verfüllung** bestimmt sind*

§ 3 (19) VerpackG:

**Werkstoffliche Verwertung** ist die Verwertung durch Verfahren, bei denen stoffgleiches Neumaterial ersetzt wird oder das Material für eine weitere stoffliche Nutzung verfügbar bleibt.

# Definitionen rund um das Recycling (II)

Abgrenzung „mechanisches“ vs. „chemisches“ Recycling

- Problem: kaum Einheitlichkeit auf verschiedenen Ebenen (A: werkstofflich, physikalisch, stofflich, materiell, mechanisch) (B: chemisches Recycling, advanced recycling, tertiäres Recycling, rohstoffliches Recycling)

Vorschlag: *Als werkstoffliches Recycling wird die mechanische Aufbereitung von gebrauchten Kunststoffen bezeichnet. Die chemische Struktur bleibt dabei unverändert. (Quelle: Kunststoffe.de)*

Prozess des werkstofflichen Recyclings beinhaltet in der Regel Sortierung, Reinigung/Wäsche, Mahlen, Schmelzen, Regranulieren

# Definition: Chemisches „Recycling“

Herausforderung/ Problem: Keine **einheitliche, rechtlich bindende Definition**

Umweltbundesamt nennt chemisches Recycling „*die Umwandlung der Kunststoffpolymere in ihre Monomere bzw. chemischen Grundbausteine oder Basischemikalien, also die Depolymerisation mittels thermochemischer bzw. chemischer Prozesse*“ [Umweltbundesamt 2020]

Zero Waste Europe sieht chemisches Recycling als „*any recovery operation by which waste materials that are unfit to be mechanically recycled are reprocessed into building blocks of a material of higher quality than the waste input.*“ [Zero Waste Europe 2019]

In4climate: „*Chemisches Recycling ist die Gesamtheit von Verfahren, die einerseits mehr als nur mechanische oder physikalische Vorgänge zur Aufbereitung des Ausgangsstoffs nutzen, die aber andererseits nicht zur vollständigen chemischen Umsetzung (Verbrennung) mit Luftsauerstoff führen.*“

Vorschlag: Wenn Begriff „Recycling“ im Spiel, dann sollte Endprodukte des Verfahrens Kunststoffe sein. – Mindestbedingung ist thermische Zersetzung in niedermolekulare Reaktionsprodukte bei erhöhter Temperatur

# WARUM CHEMISCHES „RECYCLING“? – HOFFNUNGEN UND ZIELE

# Wo liegen die Grenzen des mechanischen Recyclings

- Keine Trennung von Verbundkunststoffe (Mehrschichtfolien, etc.) möglich
- Verunreinigungen und Additive begrenzen Rezyklateinsatz („Recyclingrau“/ Grenzwerte bei Weichmachern, etc.)
- Molekülketten verkürzen bei jedem Recyclingkreislauf, so dass man Kunststoff nicht beliebig oft mechanisch recyceln kann



Bildquelle: Der Grüne Punkt

# Welche Ziele werden mit dem chemischen „Recycling“ verküpft?

- A. Ausschleusung von Schadstoffen bei gleichzeitiger materieller Verwertung der Kunststoffe**
- B. Recycling von Abfallströmen, die für ein werkstoffliches Recycling nicht in Frage kamen (sowohl in technischer, als auch in wirtschaftlicher Sicht)**
- C. Recycling von stark verunreinigten Kunststoffabfällen**

# Welche Ziele werden mit dem chemischen „Recycling“ verküpft?

- A. Ausschleusung von Schadstoffen bei gleichzeitiger materieller Verwertung der Kunststoffe**
- B. Recycling von Abfallströmen, die für ein werkstoffliches Recycling nicht in Frage kamen (sowohl in technischer, als auch in wirtschaftlicher Sicht)**
- C. Recycling von stark verunreinigten Kunststoffabfällen**

*Inoffiziell*

- A. Neue Narrative der Kreislaufwirtschaft, ohne Status Quo zu sehr zu verändern*
- B. Weniger Produktverantwortung für Design for Recycling*

# WIE FUNKTIONIERT CHEMISCHES RECYCLING?

Welche Verfahren gibt es?



# Welche Verfahren des chemischen Recyclings gibt es?



Gasifizierungsanlage an der TU Freiberg / Foto: NABU (S.Roth)

# Pyrolyse

Schlagworte: thermochemischer Prozess, Sauerstoffausschluss, über 300 Grad Celsius, allothermes Verfahren (=Energiezufuhr)

- Produkte der Pyrolyse: Gas, Öl, Wachse → weiterverarbeitende Schritte der Veredelung oder Destillation entweder zu höherwertigen Chemikalien (Monomere), Grundchemikalien und Treibstoffen
- Geeignete (Input-)Kunststoffarten: Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) und PMMA (Plexiglas)

## Forschung und Projekte

Viele Ankündigungen seitens der Industrie: Shell-Verbund (700.000 Tonnen/Jahr), Plastic Energy (200.000 Tonnen/Jahr), Brightmark Energy 100.000 Tonnen/Jahr), BASF-ChemCycling

# Pyrolyse (II)

## Technische Herausforderungen und Umweltprobleme

- (sehr) hoher Energiebedarf
- Verunreinigungen in gemischten Kunststoffabfällen → Bedarf an relativ homogenen Abfallströmen, sonst niedrige Produktqualität
- Bei technischen Kunststoffen: hohe Materialvielfalt und spezifische Zusammensetzung (Additive) – Menge und Sammelsysteme?
- Unterschiedliche Reinheitsgrade erforderlich → Sortierschritte müssen vorgelagert sein
- Beim Pyrolyse-Verfahren können chemische Schadstoffe wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und Dioxine entstehen
- Wie bei der Verbrennung von Kunststoffen bleiben bei der Pyrolyse Flugasche, Koks und Abwasser übrig (insgesamt ca. 15 – 20 Prozent Reststoffe) → Weiterbehandlung und Deponierung nötig

# Vergasung/ Gasifizierung

Schlagworte: Sauerstoff, ab 700 Grad Celsius, Druck (10 – 90 bar)

Endprodukt: Syngas ( $H_2$ , CO,  $CH_4$ , höhere Kohlenwasserstoffe)

Verfahren bereits sehr alt, früher vor allem bei Holz- und Kohleverwertung bekannt

Reinigung ist im Folgeschritt notwendig, weitere Prozesse vor allem katalytisch und sensibel für Verunreinigungen

# Vergasung/ Gasifizierung (II)

## Technische Herausforderungen und Umweltprobleme

- Syngas enthält viele Verunreinigungen wie Ammoniak, Schwefelwasserstoff, Stickoxide oder Teere → weitere Reinigungsstufen nötig, die mitunter die größten Kostentreiber des Verfahrens sind.
- Besonders problematisch ist, wenn Schadstoffe und Emissionen in die Produkte oder Nebenprodukte gelangen und nicht ausgeschleust werden können (BPA, Cadmium, Benzol, bromierte Verbindungen, Phtalate, Blei, Antimon, flüchtige organische Verbindungen).
- Eine Gasifizierung bei niedrigeren Temperaturen ist technisch möglich und wird angewandt, das produzierte Syngas ist allerdings nur für Anwendungen im Energiebereich nutzbar.

# Solvolyse

Schlagworte: Chemische Depolymerisation mithilfe von Katalysatoren (Methanol, Glykol, Wasser), Temperaturen zwischen 150 und 400 Grad Celsius

Geeignete (Input-)Kunststoffarten: PET, Polyurethane, Verbundkunststoffe (weniger sensibel für heterogene Stoffe)

Endprodukte sind Monomere → Bausteine für verschiedene Produkte der chemischen Industrie

Solvolyse-Verfahren stehen noch sehr am Entwicklungsanfang im Vergleich zu Gasifizierung und Pyrolyse → Versuche, mit Katalysatoren zu arbeiten haben erhebliche weitere Kostenfaktoren zur Folge

Herausforderung: sehr aufwändige Lösemittelabtrennung, Entsorgung und Wiederaufbereitung der Katalysatoren

# Lösemittelbasiertes Recycling

Schlagworte: Lösemittelbad für Kunststoffe, Befreiung von Additiven und Schadstoffen

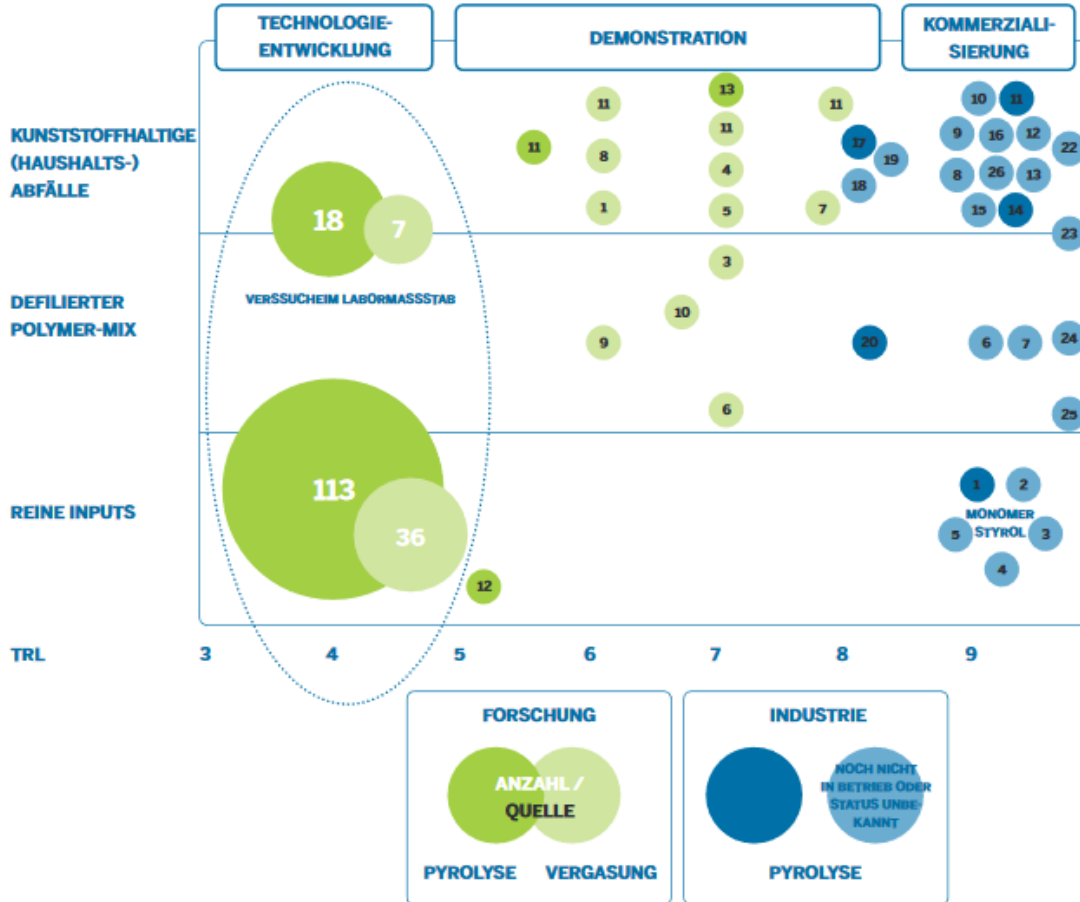
Streng genommen kein chemisches Recycling, da die Zusammensetzung des Polymers sich nicht verändert

Aber es gibt **keine einheitlich und rechtlich bindenden Standards**, so dass manche den Einsatz von Chemikalien (also Lösemitteln), um die Formulierung des Kunststoffes zu ändern als chemische Recyclingtechnik bezeichnen.

→ NABU betrachtet lösemittelbasierte Verfahren, die nicht zur chemischen Zersetzung der Kunststoffe führen, nicht als chemisches Recycling

→ Einsatzpotenziale vorhanden z.B. bei EPS-Dämmplatten/PVC-Kabel – technische Machbarkeit und ökobilanzielle Vorteile müssen aber genauer geprüft werden

→ Herausforderung: Inputqualitäten, möglicher Verbleib von Rückständen, Behandlung und Entsorgung der Lösemittel



Von 133 Pyrolyse-Verfahren nur zwei im Pilotmaßstab beschrieben

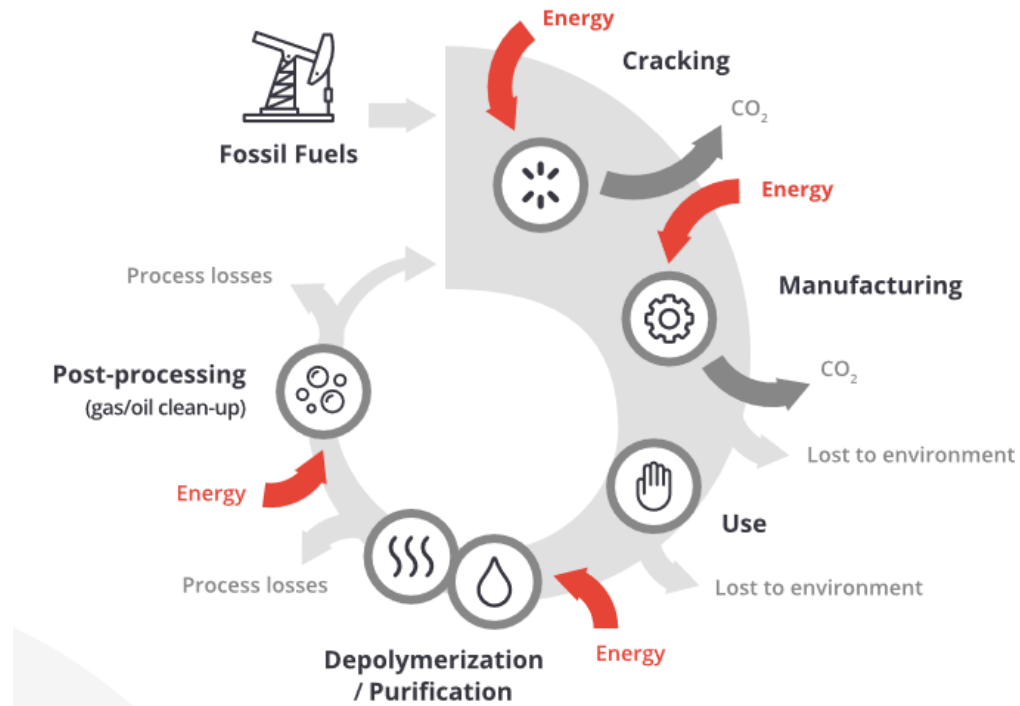
In 150 von 174 Quellen werden Reinstoffe als Ausgangsmaterial eingesetzt (Pyrolyse und Vergasung)

Nur sehr wenige betrachten verunreinigte gemischte Kunststoffabfälle

Quelle: IN4climate.NRW 2020 (Seite 14)



# WELCHE TECHNISCHEN UND ÖKOLOGISCHEN PROBLEME GIBT ES BEIM CHEMISCHEN RECYCLING?



Quelle: GAIA 2020

# Technische Herausforderungen

- Temperatur und Gaszirkulation müssen stetig kontrolliert und erhalten werden, um optimale Reaktionen zu erhalten und um die Synthese ungewollter Moleküle zu verhindern
- Bei niedrigen Temperaturen entstehen leichte Monomere, aber es wird keine komplette Depolymerisation stattfinden
- Bei höheren Temperaturen (und Kosten) depolymerisiert man zwar vollständig, allerdings entstehen dabei auch schneller schwere aromatische Moleküle
- Gasifizierer können mit diesem Problem zwar umgehen, dafür bedarf es aber höchst homogener Inputströme und nicht etwa mit nicht-standardisierten Plastikabfällen
- Nach der Depolymerisation sind die Energieverbräuche erheblich: Um die Öle und Gase auf die Qualitätsbedarfe der Industrie hochzubringen, gehen 53 Prozent der Kohlenstoffe aus den Inputströmen verloren (Ölveredelung) bzw. 48 Prozent (Gasveredelung)

Quelle: GAIA 2020

# Herausforderungen bei der Toxizität

- Großer Mangel an unabhängigen Studien zur Bewertung der Umwelteigenschaften/Toxizität der Technologien und Prozesse
  - Die Vermutung liegt nahe, dass niemand genau weiß, wie es um die toxische Belastung beim Prozess und in den Produkten steht
- Entstehung teils toxischer Substanzen im Prozess der Pyrolyse/Gasifizierung: Benzol, Teeröle, Formaldehyd, Vinylchlorid, Blausäure, polybromierten Diphenylether (PBDE)
- Gerade bei Temperaturen über 700 Grad kommt es zur starken Freisetzung von PAKs (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe)
- Beispiel Pyrolyse-Öl: Stärker mit Dioxinen und PAHs verunreinigt als etwa Diesel → hoher Reinigungsaufwand, um Endprodukte überhaupt als Treibstoffe zu nutzen

Quelle: GAIA 2020

# Herausforderungen bei der Energiebilanz

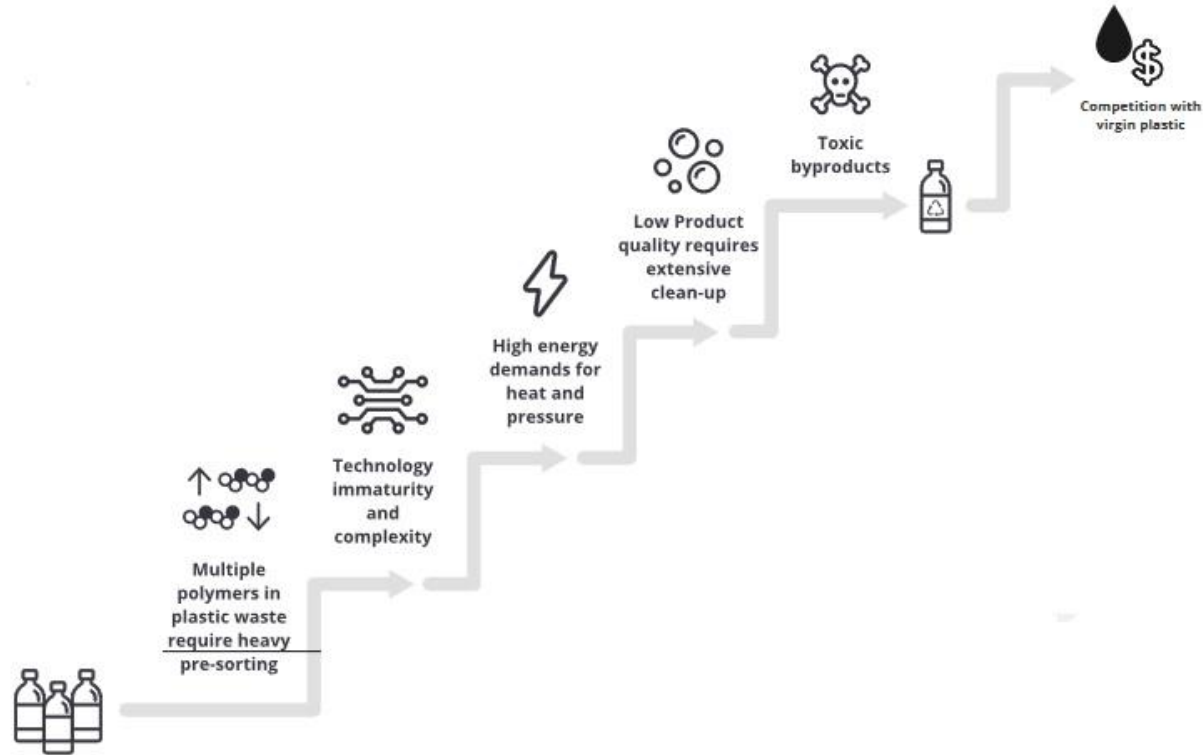
- Der hohe Energieverbrauch ist einer der größten ökologischen Nachteile des chemischen Recyclings
- Versuche, Energieverbräuche zu senken (etwa durch Katalysatoreinsatz), sorgen für zahlreiche neue Probleme (Trennung der Katalysatoren, unerwünschtes Abbauverhalten, etc.)
- Selbst bei der erwünschten Dekarbonisierung der (Energie-)Wirtschaft fraglich, warum wertvolle Energie für ineffiziente Verfahren genutzt werden sollte
- Einige chemische Transformationsprozesse stoßen erhebliche CO<sub>2</sub>-Mengen aus (insbesondere bei der Gasifizierung, bei der rund die Hälfte der Kohlenstoffe aus den Kunststoffen während des Gaskonzentrierungsprozesses)
- Plastic-to-Fuel-Verfahren: Die Brennstoffe wie Öl, Gas und Kohle, die aus den Kunststoffen gewonnen werden, sind ihrerseits fossile Brennstoffe mit ähnlichen CO<sub>2</sub>-Emissions-Verhalten

# Generelle Bewertung chemischer Recyclingverfahren

- Verfahren wohl weniger abhängig von gemischten Input und Verunreinigungen, ABER Inputqualität hat nach wie vor hohen Einfluss auf späteren Output → hoher Vor- und Nachbereitungsaufwand
- Trotz hohen Erwartungen seitens der Industrie und immer höherer öffentlicher Aufmerksamkeit, stecken Technologien noch in den Kinderschuhen → zahlreiche Verfahrensfragen ungeklärt (Effizienz- und Ertragssteigerung/ Umgang mit Reststoffen/ Schließung von Kohlenstoffkreisläufen)

# SOLLTE IN DAS CHEMISCHE RECYCLING INVESTIERT WERDEN?

# Kostenfaktoren des chemischen Recyclings



Quelle: GAIA 2020



# Wirtschaftliche Aspekte chemischer Recyclingverfahren

## Beispiel aus den USA

- Von 37 Anlagen, die seit 2000 in den USA in Pilotprojekten angelaufen sind, laufen heute noch 3 – keine einzige kann dabei erfolgreich neues Plastik nach industriellem Maßstab produzieren (GAIA US 2020)

## Bedingungen für wirtschaftlichen Betrieb chemischer Recycling-Anlagen

- Stabil hohe Ölpreise
- Kontinuierliche Verfügbarkeit in entsprechender Qualität (Einfluss der Gesetzgebung auf Abfallströme mitbedenken)
- Gute Sammel- und Sortierstrukturen müssen vorliegen (Elektroschrott/ Bauabfälle/internationaler Kontext)
- Passende Infrastruktur – Andocken an Weiterverarbeitungsstufen (Raffinerien) wichtig
- Bürokratiekosten (Umgang mit und Entsorgung von toxischen Substanzen – Einhaltung strikter Regeln des Arbeits- und Umweltschutzes)

# WIE MUSS DER ZUKÜNFTIGE POLITISCHE RAHMEN FÜR DAS CHEMISCHE RECYCLING AUSSEHEN?

## Fragen:

- Wie gelingt es, dass chemisches Recycling nicht mit mechanischem Recycling konkurriert?
- Wie gelingt es, dass chemisches Recycling nicht bloß plastic-to-fuel-Verfahren sind?
- Wie gelingt es, dass chemisches Recycling recyclingfreundliches Design und Vermeidungsbemühungen nicht verhindert?

# NABU-Forderungen zum chemischen Recycling

- Rechtlich bindende Definition des chemischen Recyclings: Ausschluss aller Behandlungen, in denen Kunststoffe nicht wieder zu Kunststoffen werden. Anwendungen nur für Abfälle, die zu zersetzt, zu komplex und/oder zu schadstoffbelastet sind, um werkstofflich recycelt zu werden
- Einführung einer neuen Stufe in der EU-Abfallhierarchie: Nach dem Recycling und vor der Verbrennung
- ISO-konformen Ökobilanzen als Bedingung für die Zulassung von Anlagen
- Staatliche Förderungen der Chemischen-Recycling-Technologie müssen immer im Einklang mit der Klima- und Kreislaufwirtschaftspolitik der EU stehen

UND

Striktere Vorgaben bei recyclingfreundlichem Kunststoffdesign, Anreizsysteme wie Plastiksteuern und Rezyklateinsatzquoten

# Quellenverzeichnis

**GAIA 2020:** [https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/CR-Technical-Assessment\\_June-2020.pdf](https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/CR-Technical-Assessment_June-2020.pdf)

**GAIA US 2020:** <https://www.no-burn.org/chemical-recycling-us/>

**IN4climate.NRW 2020:** <https://www.in4climate.nrw/nachrichten/details/analyse-von-in4climatenrw-zeigt-ausbau-von-chemischem-kunststoffrecycling-bietet-viele-chancen-fuer-den-klimaschutz/>

**Umweltbundesamt 2020:**

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17\\_hgp\\_chemisches-recycling\\_online.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf)

**Zero Waste Europe 2019:** <https://zerowasteurope.eu/downloads/el-dorado-of-chemical-recycling-state-of-play-and-policy-challenges/>



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**



NABU-Bundesgeschäftsstelle

Sascha Roth

Charitéstraße 3

10117 Berlin

Tel. +49 (0)30.28 49 84-1660

[sascha.roth@NABU.de](mailto:sascha.roth@NABU.de)

Twitter: sa\_roth

[www.NABU.de](http://www.NABU.de)