

Kurzfassung

„Chemisches Recycling in Deutschland – Ist-Situation 2024 und Ausblick bis 2030/2035“

Erstellt für:

BKV GmbH
Mainzer Landstraße 55
60329 Frankfurt a.M.

BKV KUNSTSTOFF
KONZEPTE
VERWERTUNG



Auftraggeber: **BKV** KUNSTSTOFF KONZEPTE VERWERTUNG

BKV GmbH

Mainzer Landstraße 55
60329 Frankfurt a. Main
Tel. 069 / 2556-1921
info@bkv-gmbh.de
www.bkv-gmbh.de

Mit Unterstützung von:



IK Industrievereinigung
Kunststoffverpackungen e. V.

Kaiser-Friedrich-Promenade 43
61348 Bad Homburg
Tel. 06172 / 926601
info@kunststoffverpackungen.de
www.kunststoffverpackungen.de



PlasticsEurope
Deutschland e. V.

Mainzer Landstraße 55
60329 Frankfurt a. Main
Tel. 069 / 2556-1303
info@plasticseurope.de
www.plasticseurope.org



VCI Verband der
Chemischen Industrie
e.V.

Mainzer Landstraße 55
60329 Frankfurt a. Main
Tel. 069 / 2556-0
vci@vci.de
www.vci.de

Ihr Conversio Team



Christoph Lindner
Geschäftsführender Gesellschafter

c.lindner@conversio-gmbh.com
+49 (0) 6021 15067-01



Dr. Arne Glüer
Senior Projektleiter

a.glueer@conversio-gmbh.com
+49 (0) 6021 15067-17



Christopher Gruber
Junior Projektleiter

c.gruber@conversio-gmbh.com
+49 (0) 6021 15067-15

Conversio
Market & Strategy GmbH
Am Glockenturm 6
63814 Mainaschaff/Germany
+49 (0) 6021 15067-00

Vorstellung der Studienpartner

Einleitung



BKV GmbH

Als Thinktank und Kompetenzcenter der Kunststoffindustrie, stellt die BKV der Industrie für deren unternehmerische Entscheidungen Daten und Fakten zu Themen der Ressourceneffizienz und Kreislaufführung von Kunststoffen zur Verfügung. Dazu verfügt die BKV über ein breites Netzwerk von Experten, mit denen sie sowohl national als auch international kooperiert.

Die Hauptaufgabe der BKV ist es, die Interessen ihrer Gesellschafter aus der gesamten Kunststoffindustrie auf dem Gebiet der Ressourceneffizienz von Kunststoffen mit dem Fokus auf End-of-Life Themen zu wahren. Das Hauptaugenmerk liegt auf dem Gebiet der Verwertung vor allem, aber nicht nur, von Kunststoffverpackungen. Die BKV beobachtet aufmerksam, wie sich diese Themen im politischen Umfeld entwickeln.

Aktuelle Entwicklungen, die für die Kunststoffindustrie relevant sind, werden identifiziert und in der Projektarbeit aufgegriffen. Die BKV schafft damit für alle interessierten Stakeholder frühzeitig eine Faktenbasis für fundierte Diskussionen.



Conversio Market & Strategy GmbH

Mitarbeiter von Conversio sind auf B2B-Marktforschung und -Beratung spezialisiert und verfügen über eine mehr als 20-jährige Erfahrung im Bereich der Kunststoffherstellung, -verarbeitung und -verwertung. Conversio wurde gebeten, einen Bericht zum Thema „Chemisches Recycling in Deutschland – Ist-Situation 2024 und Ausblick bis 2030/2035“ zu erstellen.

Conversio verfügt über umfassende Erfahrung mit zahlreichen Studien zur Kunststoffverwertung für namhafte Kunden wie z. B. Bayernoil, BDE, Borealis, BASF, BVSE, Dansk Retursystem, OMV, Braskem, Indorama Ventures Recycling Group, Covestro, Eumeps, Rehau, Orlen, Sabic, Total, BKV, Plastics Europe, VinylPlus und SCS.

Mit Partnern entlang der gesamten Kunststoff-Wertschöpfungskette wurden zahlreiche bekannte Studien auf EU- und globaler Ebene veröffentlicht. Conversio verfügt über profunde Marktkenntnisse und ein europäisches Netzwerk.

Hinführung

Einleitung

- Die **Defossilierung** der Wirtschaft ist in vollem Gange und erfordert weitreichende Änderungen in vielen Bereichen. Kunststoffe beinhalten Kohlenstoff als integralen Bestandteil und aktuell kommen über 80% der in Deutschland verarbeiteten Kunststoffmenge aus fossilen Quellen. Als Alternativen kommen insbesondere drei Möglichkeiten in Betracht:
 - ◆ Biomasse
 - ◆ CO₂-Nutzung
 - ◆ Recycling (mechanisches, physikalisches und chemisches)
- Da **Biomasse** nur begrenzt zur Verfügung steht, ohne in Konkurrenz mit Nahrungsmittelanbau zu treten, und die Abscheidung und **Nutzung** von **CO₂** inhärent energieintensiv ist, ist es naheliegend das Potential, das Recycling bietet, voll auszuschöpfen. Dazu sind verstärkte **Getrenntsammlung** und **Sortierung** genauso erforderlich wie **neue Technologien**.
- Das **chemische Recycling** umfasst verschiedene Technologien, die das Potential haben, auch heterogene und vermischt Abfallströme, die derzeit verbrannt werden, hochwertig zu rezyklieren. Aktuell am weitesten verbreitet sind dabei die Pyrolyse/Verölung, die Solvolyse und die Gasifizierung.
- **Ziel dieser Studie** ist eine **Bestandsaufnahme des chemischen Recyclings in Deutschland**, in Verbindung mit einem **Ausblick auf zukünftige Entwicklungen bis 2035**. Dabei werden Input- und Output-Kapazitäten und Betreiber nach Technologien differenziert analysiert. Außerdem werden Input-Material sowie Prozessverluste und Vor- und Nachbehandlung der einzelnen Technologien beschrieben.

Untersuchungsthemen

Einleitung

Themen der Studie sind der Status quo des chemischen Recyclings in Deutschland im Jahr 2024 sowie ein Ausblick auf 2030/2035, inklusive Kapazitäten/Betreiber, Abfallströme, Technologien etc. Der Fokus liegt dabei auf dem chemischen Recycling von kunststoffhaltigen Post-Consumer Abfällen. Ebenso wird die Pyrolyse von Altreifen betrachtet. Die Bereiche Solvolyse von *Post-Industrial* Kunststoffabfällen und physikalisches Recycling werden vergleichend diskutiert, aber nicht volumänglich dargestellt.

Im Detail werden die Folgenden Themen behandelt:

- ◆ Erstellung einer Player Landscape für 2024, inkl. der gesamten Kapazitäten und Angabe der Betreiber von Anlagen des chemisches Recycling 2024 mit weiteren Hinweisen zur Art der chemischen Recycling Technologie (Solvolyse, Pyrolyse/Verölung, Gasifizierung)
- ◆ Art der Kunststoffabfälle, die 2024 in EU27+3 in chemische Recyclinganlagen eingebracht wurden (nach Anwendungen/Abfallströmen)
- ◆ Bestimmung typischer Prozessverluste beim chemischen Recycling
- ◆ Input- und Ausbringungsmengen und -qualitäten
- ◆ Potenzial für chemisches Recycling aus Abfällen von mechanischen Recyclingverfahren
- ◆ Veritabler Ausblick auf 2030 und 2035 (Kapazitäten, Betreiber, Technologien, Input- und Output-Mengen)

Generelle Herangehensweise

Methodik

Sekundäranalysen

- Detaillierte Auswertung und Analysen von vorhandenen Conversio-Studien, Datenbanken und vorliegenden Analysen
- Identifizierung von Pressemitteilungen, Unternehmensveröffentlichungen, Daten aus Vorträgen und Symposien

Primäranalysen/Plausibilisierung

- Punktuell zusätzliche Primärerhebung wie z.B. Interviews mit ...
 - Betreibern bestehender Anlagen
 - großen Abfallentsorgungs- und Recyclingunternehmen
 - Entwicklungs- und Technologiefirmen bzw. -Instituten
 - anderen Marktexperten

Analyse und Reporting

- Analyse der Informationen und Daten, Erstellung eines Datenmodells, Datenexplorationen, Berichtserstellung, Bewertung

Methodische Details zur Bestimmung von aktuellen und zukünftigen Kapazitäten

Methodik

- ◆ Eine extensive Liste von allen aktuell vorhandenen und geplanten chemischen Recyclinganlagen in Deutschland wurde erstellt, indem Pressemitteilungen, Unternehmensveröffentlichungen, Daten aus Vorträgen und Symposien sowie persönliche Mitteilungen von Experten (Betreiber bestehender Anlagen, großen Abfallentsorgungs- und Recyclingunternehmen, Entwicklungs- und Technologiefirmen bzw. -Instituten und anderen) ausgewertet wurden.
- ◆ Die Liste wurde auf den Fokus der Studie (chemisches Recycling von Altkunststoffen aus Post-Consumer Abfällen) reduziert (kein physikalisches Recycling, keine Post-Industrial Abfälle).
- ◆ Input-Kapazitäten beziehen sich auf öffentlich (oder in persönlichen Mitteilungen) kommunizierte Werte und beinhalten daher hauptsächlich Kunststoffe/Reifen, aber auch kleine Mengen an Störstoffen (Pyrolyse/Verölung, Solvolyse). Um eine Vergleichbarkeit in Bezug auf umgesetzte Kunststoffe zu gewährleisten, wurde die Kapazität von Gasifizierungsanlagen, die kunststoffarme Abfälle wie Restmüll umsetzen, mit dem Kunststoffanteil (8% für Restmüll) multipliziert.
- ◆ Wenn Daten zu Input-Kapazitäten von Pilotanlagen fehlten, wurde eine durchschnittliche Kapazität von 0,1 kt/a angenommen.
- ◆ Geplante Anlagen wurden nur berücksichtigt, wenn bereits ein fester Standort kommuniziert wurde.
- ◆ Anlagen, deren Planung ohne ein anvisiertes Datum zur Fertigstellung kommuniziert wurde, wurden als spätestens 2035 in Betrieb erachtet.

Chemisches Recycling in Deutschland (1/7)

Management Summary

Überblick über die analysierten Technologien (1/2)

- Das chemische Recycling ist definiert als die Umwandlung zu Monomeren oder Herstellung neuer Materialien durch Ändern der chemischen Struktur des Kunststoffabfalls mit Ausnahme von Energierückgewinnung und Verbrennung.*
- Für diesen Bericht wurden drei Technologiefamilien des chemischen Recyclings unterschieden, die sich für unterschiedliche kunststoffhaltige Abfallfraktionen eignen und unterschiedliche Produkte generieren:

1) Pyrolyse/Verölung

- Bei der **Pyrolyse** werden PO-haltige Kunststoffabfälle bei erhöhter Temperatur unter Luftausschluss zersetzt.
 - Bei der **unkatalysierten Pyrolyse** werden Temperaturen bis 600°C eingesetzt.
 - Bei der **katalytischen Pyrolyse** werden im Allgemeinen geringere Temperaturen von bis zu ~400°C verwendet und die Produktpalette kann besser gesteuert werden. Dafür sind diese Prozesse oft anfälliger für Verunreinigungen, die zu Katalysatordeaktivierung führen.
- Die **Verölung** ist der Pyrolyse sehr ähnlich, aber anders als bei der Pyrolyse wird ein hochsiedendes Lösungsmittel zugesetzt.
- Die **thermische Depolymerisation** von PS- und PMMA-Abfällen kann als Spezialfall der Pyrolyse betrachtet werden, bei der Monomere resultieren.
- Die **Reifenpyrolyse** ist sowohl auf LKW-als auch PKW-Reifen anwendbar und wird im Allgemeinen unkatalysiert bei 600 bis 700 °C durchgeführt.

*Definition nach ISO 15270. Artikel 3 Nr. 17 der EU-Abfallrahmenrichtlinie definiert chemisches Recycling als jedes Verwertungsverfahren, durch das Kunststoffabfälle oder andere Abfallmaterialien unter Spaltung der Polymerketten zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden, mit Ausnahme der energetischen Verwertung und der Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.

Chemisches Recycling in Deutschland (2/7)

Management Summary

Überblick über die analysierten Technologien (2/2)

2) Lösemittelbasierte Verfahren (Solvolyse)

- ◆ Abfallfraktionen, welche Kunststoffprodukte enthalten, die durch Polykondensation oder Polyaddition hergestellt sind, wie etwa PET, PUR, PA und PC, werden mittels Lösungsmittel in Monomere/Oligomere gespalten.
- ◆ Solvolyse kann in viele verschiedene Unterverfahren unterteilt werden, z.B.:
 - ◆ Hydrolyse: Spaltung der Polymere mit Wasser
 - ◆ Glykolyse: Spaltung der Polymere mit Glykol
 - ◆ Methanolyse: Spaltung der Polymere mit Methanol
 - ◆ Aminolyse: Spaltung der Polymere mit Aminen

3) Gasifizierung

- ◆ Zersetzung und **Teiloxidation** kunststoffhaltiger Abfallströme (Polymerunabhängig) mit kleinen Mengen Sauerstoff bei hohen Temperaturen (~700 bis 1200°C) zu **Synthesegas** (u.a. CO und H₂).
- ◆ Der Einsatz von Kunststoffabfällen als **Reduktionsmittel** zur Substitution fossiler Rohstoffe wie Koks oder Kohle bei der Roheisenherstellung im Hochofen kann auch als chemisches Recycling aufgefasst werden, wurde im Rahmen dieses Berichts aber nur am Rande betrachtet, weil es sich nicht zur Wiedergewinnung von Kunststoffen eignet.
- ◆ **Physikalisches Recycling** beschreibt ein Verfahren, bei dem Kunststoffabfälle mit Hilfe von Lösemittel von Verbunden, Mischungen oder Verunreinigungen befreit werden. Die Polymere bleiben bei diesem Verfahren erhalten. Wird in der Studie nur am Rande betrachtet, weil es sich nicht um chemisches Recycling handelt.

Chemisches Recycling in Deutschland (3/7)

Management Summary

Player Landscape 2024 (2/2)

Im Allgemeinen

- Das **chemische Recycling** von kunststoffhaltigen Post-Consumer Abfällen und Altreifen in Deutschland hat noch nicht den groß-industriellen Maßstab erreicht und ist mit insgesamt 30,2 kt/a Input-Kapazität aktuell auf sehr **niedrigem Niveau**. Dies wird insbesondere klar, wenn man betrachtet, dass aktuell ~2.440 kt/a kunststoffhaltige Abfälle mechanisch recycelt werden.

Im Speziellen

- Pyrolyse/Verölung** ist in Deutschland mit einer groß-industriellen Reifenpyrolyseanlage (20 kt/a) und 4 PO-Pyrolyse **Demonstrationsanlagen** (je 1 bis 4 kt/a) die am weitesten entwickelte Technologiefamilie. Die Landschaft wird 2024 von kleinen Technologieentwicklern (Pyrum, Arcus Greencycling, Carboliq, Pruvia, Enespa) geprägt. Die Gesamt-Input-Kapazität beträgt 29,7 kt/a.
- Die **Solvolyse** von kunststoffhaltigen Post-Consumer Abfällen befindet sich noch im **Pilotstadium** mit Anlagengrößen meist unter 0,1 kt/a und einer Gesamt-Input-Kapazität in Deutschland von ~0,5 kt/a. Zu den Akteuren in diesem Bereich gehören große deutsche Konzerne wie BASF, Covestro, Evonik und Heraeus sowie kleinere Technologieentwickler wie matterr. Im Gegensatz dazu wird die **Solvolyse** von Post-Industrial Abfällen z.B. von der **Rampf-Gruppe** schon seit 2000 und 2011 mit zwei Anlagen von 2,5 kt/a und 4 kt/a in Pirmasens bereits kommerziell betrieben, dies ist aber nicht im Fokus der Studie.
- Die **Gasifizierung** von kunststoffhaltigen Post-Consumer Abfällen befindet sich im **Forschungs- und Pilotstadium** mit einer Gesamt-Input-Kapazität in Deutschland von <0,1 kt/a.

Chemisches Recycling in Deutschland (4/7)

Management Summary

Input-Material und Vorbehandlung

- **Altreifen** sind mit 66% der **häufigste Input in Pyrolyseanlagen**, weil die kürzlich erweiterte Pyrolyseanlage von Pyrum die aktuellen Kapazitäten dominiert.
- Für die **PO-Pyrolyse/Verölung** wird überwiegend (zu über 90%) **Material aus LVP-Sortierbetrieben** wie gemischte Polyolefine (DSD323) oder Mischkunststoffe (DSD350) verwendet. Auch EBS (Ersatzbrennstoff, der sowohl aus LVP-Sortieranlagen, als auch aus Gewerbeabfallsortieranlagen hervorgehen kann) kann umgesetzt werden. Kampagnenweise sind weitere Abfälle, z.B. Schredder-Leicht-Fraktionen aus Großschredderanlagen (Mischschrott aus Altautos und Elektroaltgeräten), industrielle Endverbraucherabfälle und Polyolefinfraktionen aus dem Recycling von Elektrokleingeräten getestet worden (2024 befindet sich die PO-Pyrolyse/Verölung in Deutschland noch im Demonstrationsstadium).
- Höherwertiger Input bedingt auch höherwertigeren und/oder größeren Output (z.B. geringerer Anteil an Heteroatomen/Metallen und/oder höhere Ausbeute). Dabei ist irrelevant, ob das Verfahren katalysiert abläuft oder nicht. Für die **PO-Pyrolyse** werden z.B. oft **gemischte Polyolefinfraktionen (DSD323)** verwendet, da schlechtere Qualitäten wie DSD350 oder auch EBS geringere Ölausbeuten/-qualitäten bedingen. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Technologieanbieter leicht darin, wie tolerant der Prozess gegenüber schlechteren Input-Qualitäten ist.
- **Inputaufbereitung:** Vor der **Pyrolyse** und der **Gasifizierung** wird das Input-Material im Allgemeinen geschreddert und in eine Form überführt, die sich gut in den Reaktor fördern lässt (z.B. Verpressung zu Pellets oder Aufschmelzen). Bei der **Reifenpyrolyse** wird zusätzlich Stahl und Textil vom Gummi getrennt. Im Falle der **Solvolyse** wird das Input-Material oft noch gewaschen, um Verunreinigungen zu entfernen, da nasses Input-Material nicht schädlich für den Prozess (Hydrolyse) ist.

Chemisches Recycling in Deutschland (5/7)

Management Summary

Output, Prozessverluste und Nachbehandlung

- **Output** aus den chemischen Recyclingverfahren sind 1) bei der **Pyrolyse** vor allem Pyrolyseöl, Pyrolysegas sowie Pyrolysekoks und rCB (recovered carbon black) (und bei feuchtem Ausgangsmaterial auch Pyrolysewasser), 2) bei der **Solvolyse** Monomere/Oligomere sowie Feststoffe und Nebenprodukte, die durch Filtration und/oder Kristallisation abgetrennt werden und 3) bei der **Gasifizierung** Synthesegas sowie andere Gase (z.B. CO₂, CH₄), Wasser, Asche, Flugasche und Schlacke.
- Die Weiterverarbeitung des Outputs zu Polymeren ist je nach Technologie unterschiedlich aufwändig, da der Materialinput in dem chemischen Recyclingprozess unterschiedlich stark abgebaut wird.
 - **Monomere** aus der Solvolyse oder thermischen Depolymerisation können direkt wieder in der **Polymerproduktion** eingesetzt werden
 - **Pyrolyseöl** wird nach Aufreinigung zuerst in **Steamcrackern** zu kurzkettigen **Kohlenwasserstoffverbindungen** (z.B. Ethen, Propen) gespalten, bevor es wieder in Chemikalienproduktion (inkl. Polymere) eingesetzt werden kann.
 - **Pyrolysegas** wird in Demonstrationsanlagen derzeit noch meist verbrannt, z.T. ohne Nutzung der Energie. Unternehmen arbeiten aber daran, die Verbrennungswärme zur Stromerzeugung zu nutzen. Betreiber industrieller Anlagen wie Pyrum nutzen die Verbrennungswärme bereits, um die Prozessenergie für die Pyrolyse bereitzustellen (dann kann der Prozess als thermoneutral angesehen werden). Alternativ kann das Pyrolysegas auch analog zur Gasifizierung stofflich genutzt werden.
 - **Synthesegas** aus der Gasifizierung kann nach Aufreinigung in einem mehrstufigen Prozess (z.B. über **Methanolsynthese** und **Methanol-to-olefin** Prozess oder alternativ **Fischer-Tropsch-Synthese**) wieder zu Polymeren verarbeitet werden. Im Allgemeinen wird aber nicht die Produktion neuer Kunststoffe angestrebt, sondern die Produktion anderer werthaltiger Chemikalien wie Methanol, Ethanol, Methan oder Dimethylether.

Chemisches Recycling in Deutschland (6/7)

Management Summary

Potenzial für chemisches Recycling aus Restfraktionen von mechanischen Recyclingverfahren

- Eine Analyse der Reststoffe mechanischer Recycler hat gezeigt, dass diese sich zum Teil als Input-Material für das chemische Recycling eignen können. Insgesamt wurde ein **Potential** (Obergrenze) von **~0,46 Mt/a** ermittelt.
- Eine Analyse der Zusammensetzung hat ergeben, dass für die **Pyrolyse/Verölung** maximal **~0,23 Mt/a**, für die **Solvolyse** maximal **~0,15 Mt/a** und für die **Gasifizierung** maximal **~0,46 Mt/a** zur Verfügung stehen.
- Die Potentiale der Inputfraktionen für die Pyrolyse/Verölung und Solvolyse sind additiv, weil unterschiedliche Inputfraktionen adressiert werden. Alternativ können die gleichen Inputfraktionen auch durch Gasifizierung umgesetzt werden.

Chemisches Recycling in Deutschland (7/7)

Management Summary

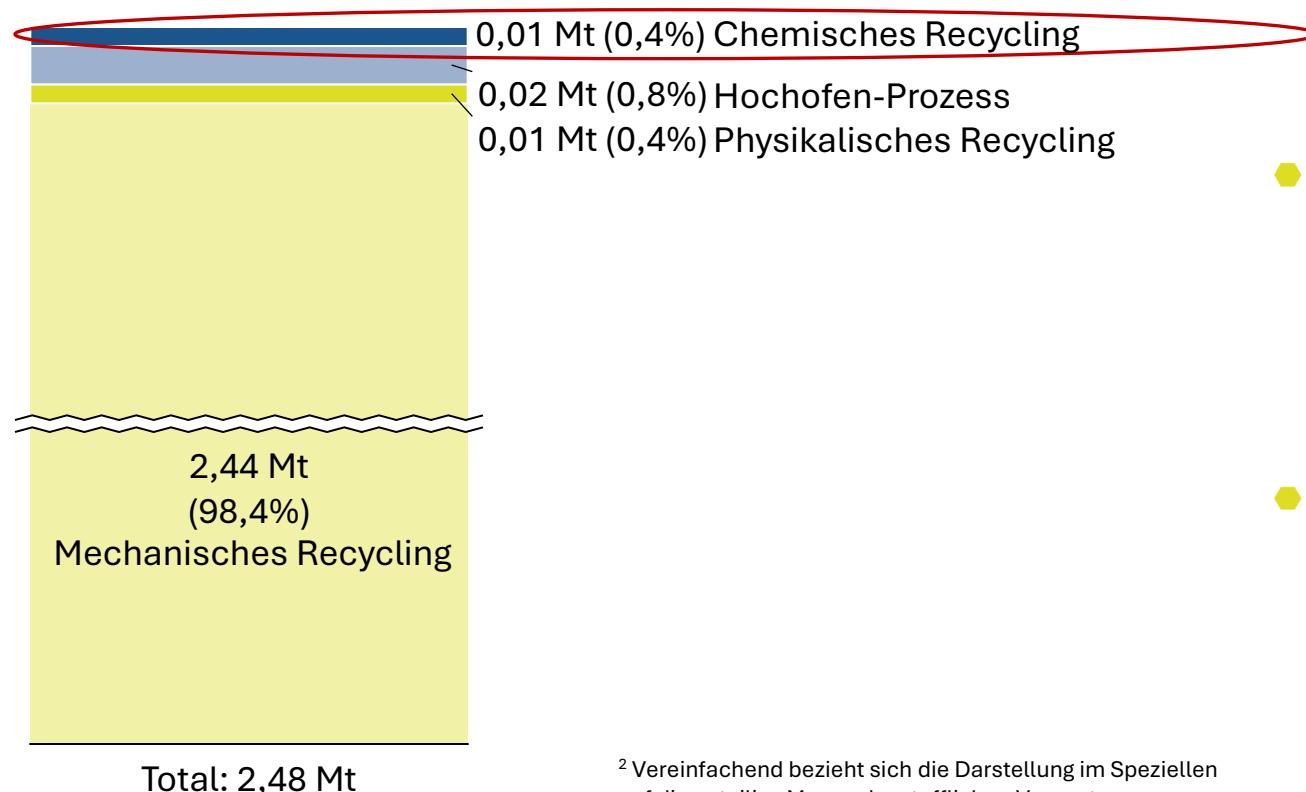
Ausblick bis 2030/2035

- Sofern alle Projekte, Pilotvorhaben und Investitionen zum chemischen Recycling, die aktuell in Deutschland geplant sind, umgesetzt werden, kann die maximale Input-Kapazität in Deutschland drastisch steigen. Eine Abschätzung hat ergeben, dass die Input-Kapazitäten von 0,010 Mt/a im Jahr 2024 auf **~0,1 – 0,4 Mt/a** im Jahr 2030 und **0,1 bis 0,8 Mt/a** im Jahr 2035 steigen können. Fast der gesamte Anstieg der Input-Kapazität ist auf die Pyrolyse/Verölung zurückzuführen. Dabei wird die Pyrolyse von PO die Reifenpyrolyse kapazitätstechnisch überholen.
- **Großunternehmen** in der Chemie (z.B. BP, Ineos), wollten die Führungspositionen übernehmen, indem sie mit führenden **Technologieanbietern** wie Plastic Energy zusammenarbeiten, um große Anlagen mit Kapazitäten ≥ 100 kt/a zu bauen. Ob und wann die Projekte umgesetzt werden ist allerdings ungewiss (vide infra). Andere wie BASF haben bisher keine eigenen Anlagen angekündigt, kaufen aber schon jetzt Pyrolyseöl in großem Maßstab zu und verarbeiten es.
- Die Entwicklung des chemischen Recyclings in diesen Großkonzernen kann die zukünftigen Kapazitäten des chemischen Recyclings drastisch beeinflussen. So wäre BP mit ihrer geplanten riesigen 360 kt/a Anlage für ca. die Hälfte des Anstiegs von 2030 auf 2035 verantwortlich. Die Umsetzung bis 2035 ist allerdings noch nicht gesichert (das Unternehmen selbst macht keine Angaben zur Fertigstellung) und daher mit großen Unsicherheiten behaftet.
- Dagegen sind Entwickler von **Solvolyse**-Verfahren mit Ankündigungen zu Anlagen aktuell sehr **zurückhaltend**. Lediglich matterr hat eine größere 10 kt/a Solvolyseanlage angekündigt. In Anbetracht der Forschungstätigkeit großer deutscher Chemiekonzerne (BASF, Covestro, Evonik, Heraeus) in diesem Bereich, ist bei vielversprechenden Forschungsergebnissen kombiniert mit unterstützender Regulatorik, allerdings der Bau weiterer großskaliger Solvolyseanlagen bis 2035 möglich.

Einordnung: Chemisches Recycling und andere stoffliche Verwertungsmethoden

Management Summary

Stoffliche Verwertung von kunststoffhaltigen Post-Consumer Abfällen nach Technologie im Jahr 2023 in Deutschland²



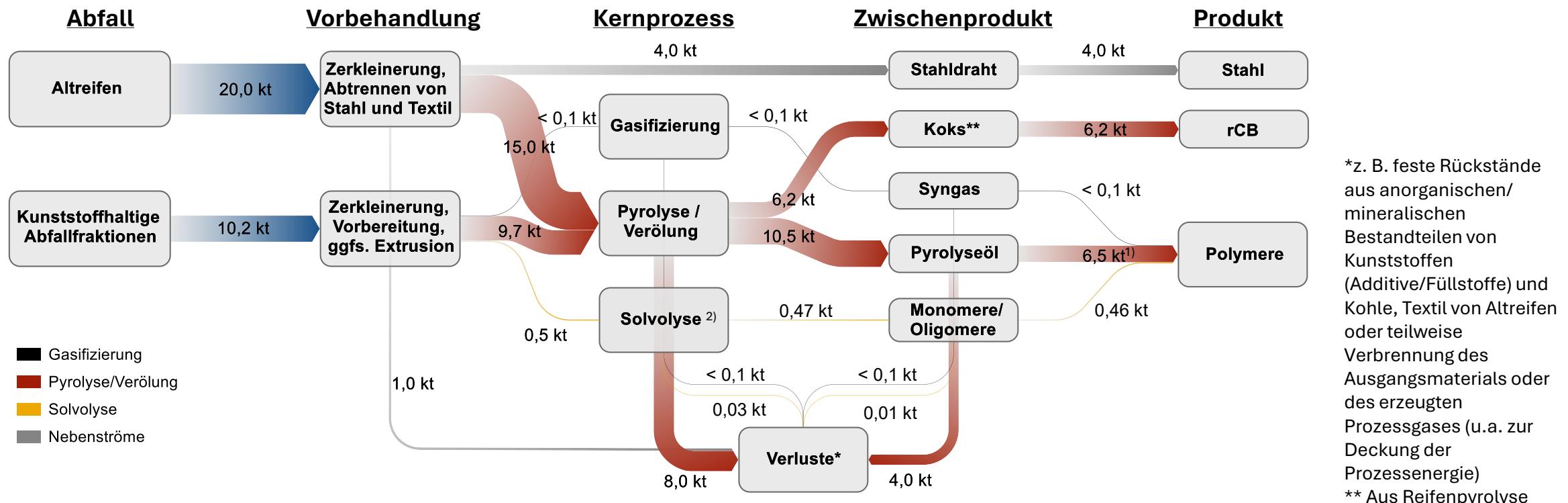
² Vereinfachend bezieht sich die Darstellung im Speziellen auf die anteilige Menge der stofflichen Verwertung. Energetische Verwertung und Deponierung kunststoffhaltiger post-consumer Abfälle sind nicht betrachtet.

- Das **mechanische Recycling** ist bei weitem die **mengenmäßig bedeutendste Technologie** zur stofflichen Verwertung von kunststoffhaltigen Post-Consumer Abfällen (Anteil: 98,4%).
- Das **chemische-** und auch das **physikalische Recycling** spielen mit je 0,4% Anteil an der stofflichen Verwertung von Kunststoffhaltigen Post-Consumer Abfällen in Deutschland **aktuell untergeordnete Rollen**, haben aber starkes **Wachstumspotential**.¹
- Der Einsatz von Kunststoffabfällen als **Reduktionsmittel** im Hochofenprozess (Eisenherstellung) ist zwar schon lange etabliert, aber auf ähnlich niedrigem Niveau (0,8%).

¹ Potentiale ergeben sich maßgeblich durch das Erschließen aktuell energetisch verwerteter Abfallströme für die stoffliche Verwertung

Input- und Output-Kapazitäten chemischer Recyclinganlagen in Deutschland für Post-Consumer Altkunststoffe und Altreifen im Jahr 2024 (vereinfachte schematische Darstellung)

Management Summary



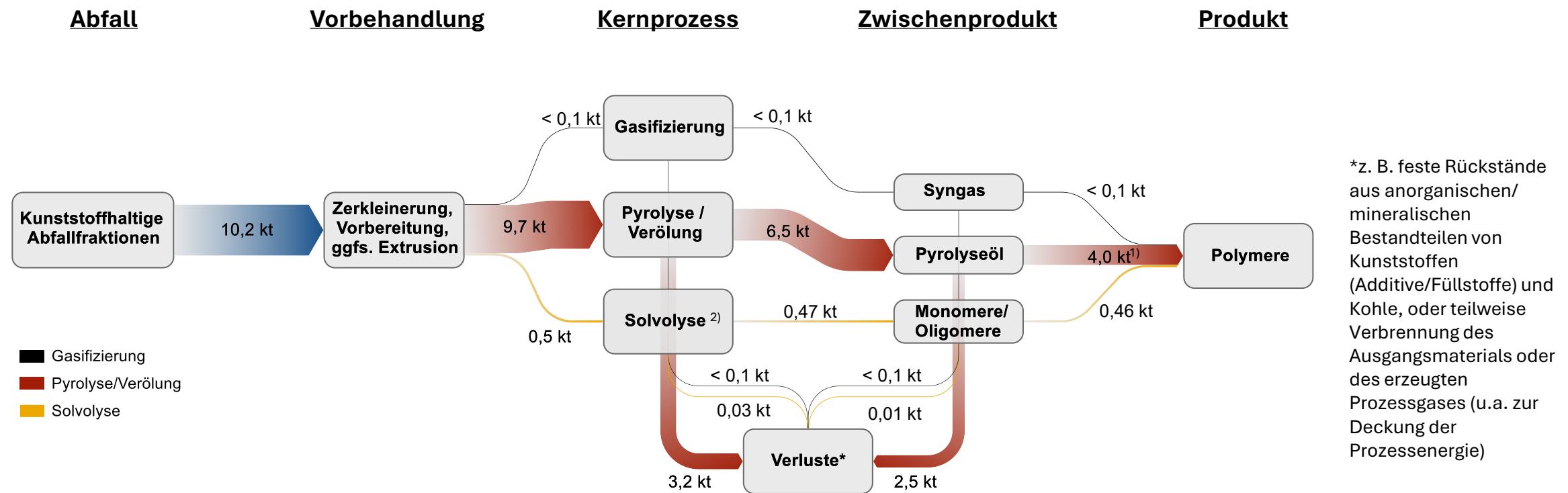
Angegeben sind Input- und Output-Kapazitäten. Reale Massenflüsse sind geringer, da Anlagen insbesondere in der Anlaufphase nicht voll ausgelastet sind und Zwischenprodukte in der Regel nicht vollständig zu Polymeren, sondern auch zu anderen werthaltigen Chemikalien weiterverarbeitet werden.

¹⁾ Berechnung nach „Fuel-use exempt“ Methode unter Berücksichtigung typischer Steam Cracker Ausbeuten (Annahme: Ethen, Propen, Butadien, Buten, Benzol und Toluol werden vollständig zu Polymeren verarbeitet.)

²⁾ Inkl. Glykolyse, Hydrolyse, Methanolysen, Aminolyse, etc.

Input- und Output-Kapazitäten chemischer Recyclinganlagen in Deutschland für Post-Consumer Altkunststoffe im Jahr 2024 (vereinfachte schematische Darstellung)

Management Summary



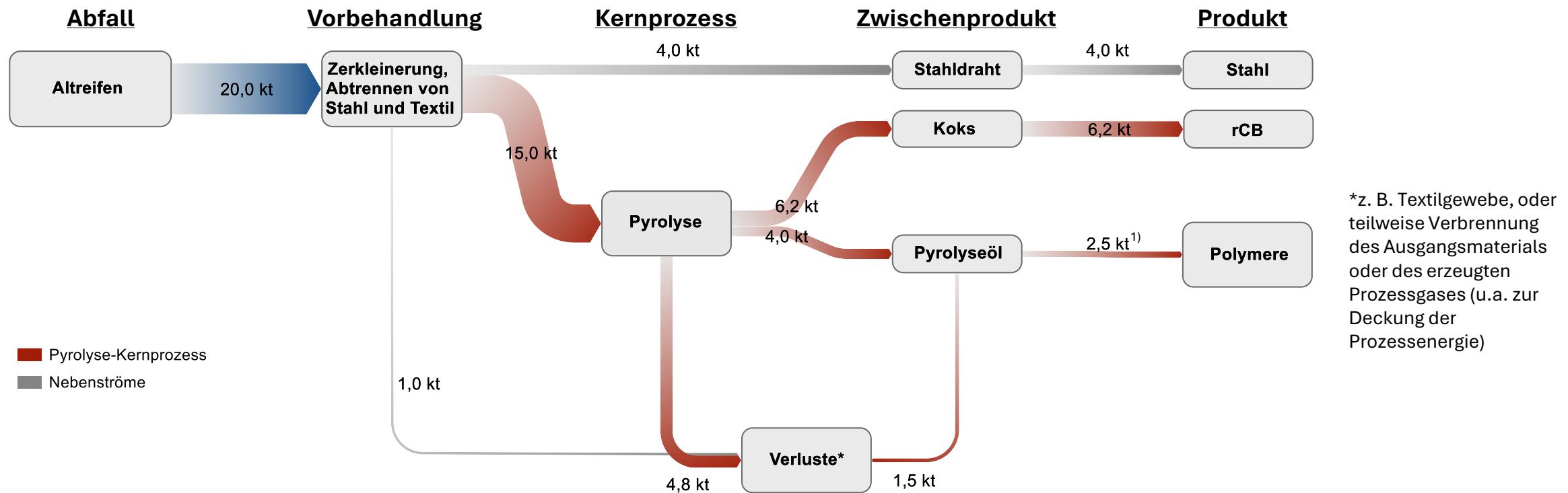
Angegeben sind Input- und Output-Kapazitäten. Reale Massenflüsse sind geringer, da Anlagen insbesondere in der Anlaufphase nicht voll ausgelastet sind und Zwischenprodukte in der Regel nicht vollständig zu Polymeren, sondern auch zu anderen werthaltigen Chemikalien weiterverarbeitet werden.

¹⁾ Berechnung nach „Fuel-use exempt“ Methode unter Berücksichtigung typischer Steam Cracker Ausbeuten (Annahme: Ethen, Propen, Butadien, Buten, Benzol und Toluol werden vollständig zu Polymeren verarbeitet.)

²⁾ Inkl. Glykolyse, Hydrolyse, Methanolysen, Aminolyse, etc.

Input- und Output-Kapazitäten chemischer Recyclinganlagen in Deutschland für Post-Consumer Altreifen im Jahr 2024 (vereinfachte schematische Darstellung)

Management Summary

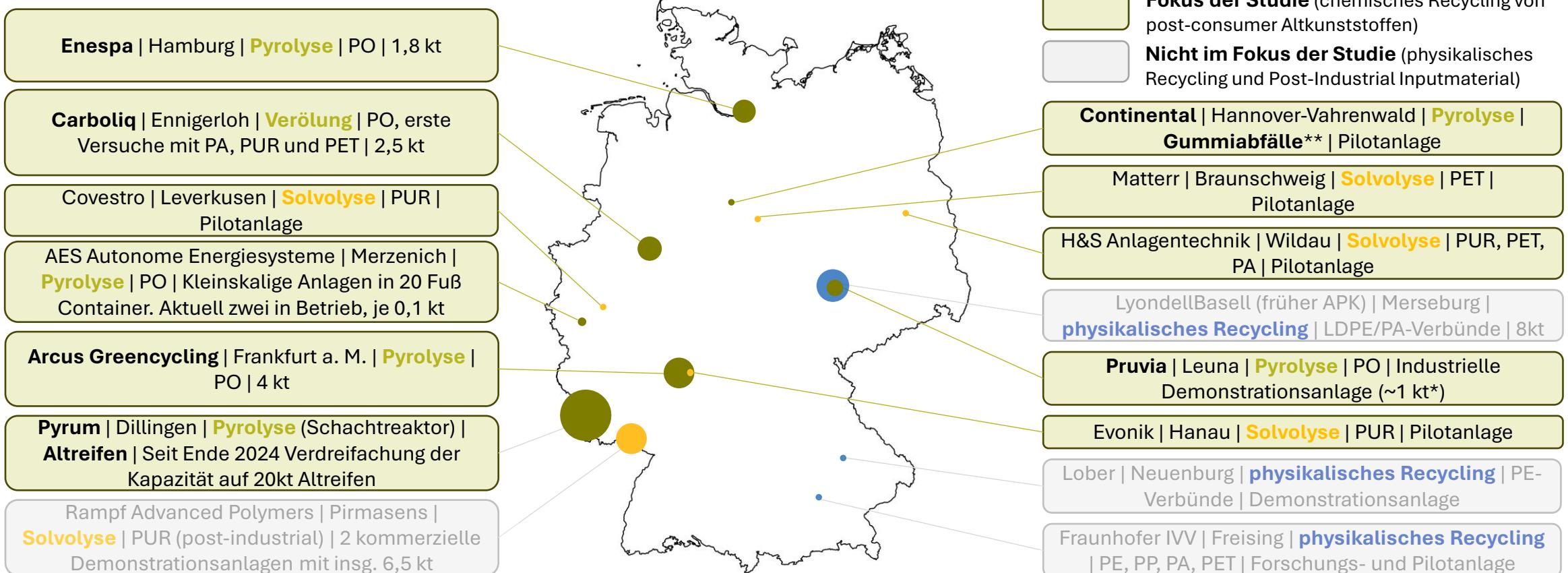


Angegeben sind Input- und Output-Kapazitäten. Reale Massenflüsse sind geringer, da Anlagen insbesondere in der Anlaufphase nicht voll ausgelastet sind und Zwischenprodukte in der Regel nicht vollständig zu Polymeren, sondern auch zu anderen werthaltigen Chemikalien weiterverarbeitet werden.

¹⁾ Berechnung nach „Fuel-use exempt“ Methode unter Berücksichtigung typischer Steam Cracker Ausbeuten (Annahme: Ethen, Propen, Butadien, Buten, Benzol und Toluol werden vollständig zu Polymeren verarbeitet).

Chemische- und Physikalische Recyclinganlagen in Deutschland

Player Landscape 2024 – Kartographische Darstellung



In grau hinterlegte Anlagen wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt, aber aus verschiedenen Gründen hier dargestellt: I) die Verwertung von Post-Industrial Abfällen ist nicht im Fokus der Studie, aber die Rampf-Group ist seit 30 Jahren ein Vorreiter im Bereich Solvolyse II) Bei physikalischem Recycling handelt es sich nicht um chemisches Recycling, aber es ist ebenso ein in letzter Zeit aufgekommenes Verfahren zur Rückgewinnung aktuell nicht mechanisch recycelter Kunststoffhaltiger Abfälle.

Die größten chemischen Recycling-Anlagen in Deutschland wurden vollständig dargestellt. Des Weiteren gibt es kleine Forschungs- und Pilotanlagen, von denen einige hier genannt wurden.

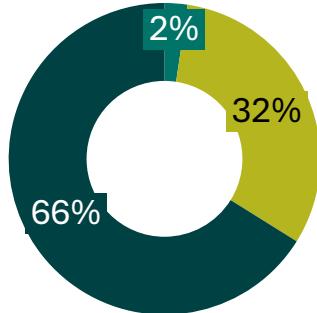
* Abschätzung aufgrund von Aussage von Interviewpartner und Sekundärrecherche

** Prozess kann auch Altreifen umsetzen, dies wird von Continental aber nicht praktiziert und nicht angestrebt

Art des Input-Materials nach Anwendung und Abfallstrom

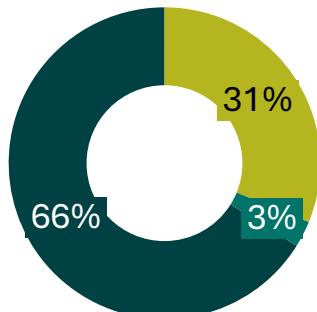
Input-Material und Vorbehandlung

Input nach Anwendung



■ Reifen ■ Verpackung ■ Andere

Input nach Abfallstrom



■ Reifenabfälle ■ LVP-Sammlung
■ Andere

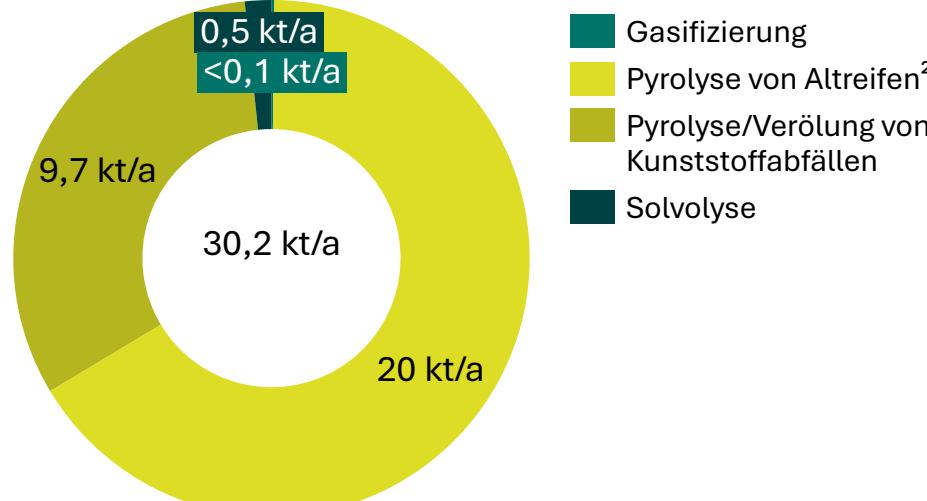
- Verpackungen aus der LVP-Sammlung und Reifenabfälle sind laut Befragungen von chemischen Recyclern die bei weitem wichtigste Rohstoffquelle für chemische Recyclinganlagen. Bei der LVP-Sammlung bieten insbesondere gemischte Polyolefine (DSD323), aber auch Folienfraktionen hohe Polyolefingehalte. Auch geringere Qualitäten wie DSD350 oder spezielle EBS-Fraktionen können eingesetzt werden (insbesondere bei unkatalysierter Pyrolyse), dann aber meist mit schlechteren Ölausbeuten und -qualitäten. Außerdem ist die schwankende Qualität des DSD350 eine Herausforderung.
- Es ist anzumerken, dass die Betreiber von Sortieranlagen ihr Sortieverhalten teilweise ändern, um den Anforderungen der chemischen Recycler gerecht zu werden. In Walldürn entsteht z.B. aktuell eine Nachsortieranlage, die Fraktionen aus LVP-Sortieranlagen für das mechanische- und chemische Recycling weiter sortiert.
- Die Betreiber von Pyrolyseanlagen für Kunststoffe befinden sich aktuell noch in der Demonstrations-phase und fahren kampagnenweise verschiedene Einsatzstoffe.¹⁾ Der Einsatz von Industrieabfällen, Schredderrückständen aus Altfahrzeugen bzw. Elektroschrott befindet sich auf Forschungsniveau und ist derzeit nicht wirtschaftlich anwendbar.
- Des Weiteren wurden z.B. PE-haltige Ausschüsse von mechanischen Recyclern bereits erfolgreich eingesetzt, die sonst energetisch verwertet worden wären.

¹⁾ Siehe auch: D. Stapp et al., Bewertungsgrundlagen der Pyrolyse von gemischten Kunststoffabfällen, KIT, Karlsruhe, 2021

Input- und Output-Kapazität von CR-Anlagen in Deutschland 2024

Output, Prozessverluste und Nachbehandlung

Input-Kapazität chemische Recyclinganlagen 2024 in Deutschland¹

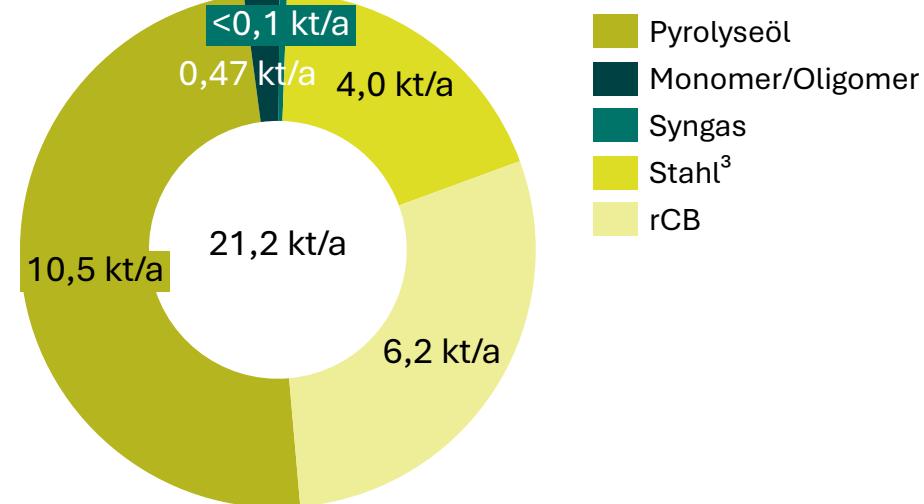


- Pyrolyse ist die dominierende CR-Technologie mit 9,7 kt/a für Kunststoffabfälle und 20 kt/a für Altreifen.
- Solvolyse und Gasifizierung befinden sich - bei 0,5 kt/a bzw. <0,1 kt/a Post-Consumer Material im Input - noch im Forschungs- bzw. Pilotstadium.

¹ Von Anlagen, die hauptsächlich Post-Consumer Abfälle verarbeiten

² Kapazität bezogen auf Altreifen (i.e., inkl. Stahl, Textil, Ruß, etc.)

Output-Kapazität chemische Recyclinganlagen 2024 in Deutschland¹



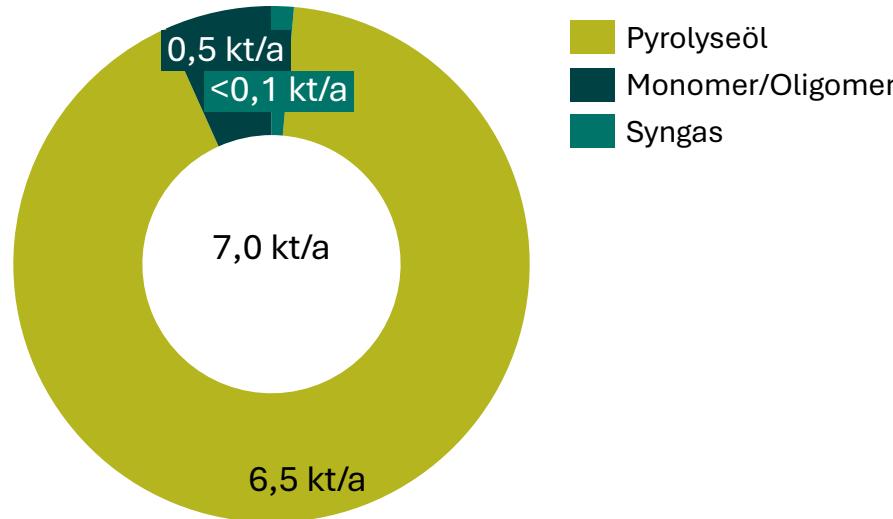
- Die Output-Kapazität wird von 10,5 kt/a Pyrolyseöl dominiert. Darauf folgen rCB mit 6,2 kt/a und Stahl mit 4,0 kt/a aus der Reifenpyrolyse.
- Monomere/Oligomere aus der Solvolyse sowie Synthesegas aus der Gasifizierung haben mit 0,47 kt/a und <0,1 kt/a einen deutlich geringeren Anteil.

³ Aus der mechanischen Vorbehandlung der Altreifen vor dem Pyrolyse-Kernprozess

Output-Kapazität von CR-Anlagen nach Abfallart in Deutschland 2024

Output, Prozessverluste und Nachbehandlung

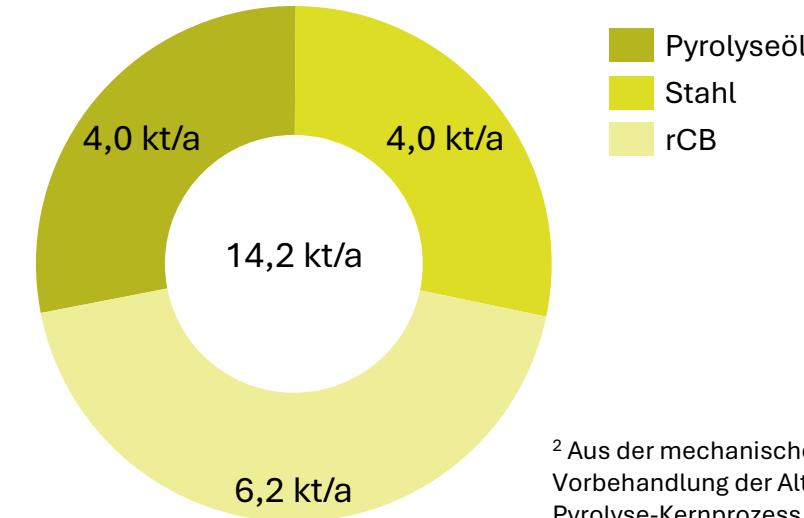
Output-Kapazität chemische Recyclinganlagen für kunststoffhaltige Abfälle 2024 in Deutschland¹



- Pyrolyseöl ist mit einer Outputkapazität von 6,5 kt/a (93%) das Hauptprodukt von chemischen Recyclinganlagen für kunststoffhaltige Abfälle
- Monomere/Oligomere aus der Solvolyse fallen mit einer Output-Kapazität von 0,5 kt/a kaum ins Gewicht

¹ Von Anlagen, die hauptsächlich Post-Consumer Abfälle verarbeiten

Output-Kapazität chemische Recyclinganlagen für Altreifen 2024 in Deutschland¹



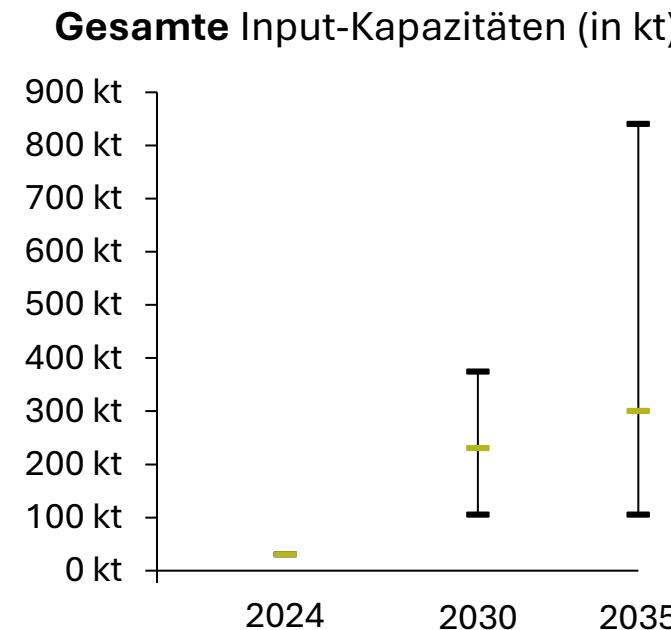
² Aus der mechanischen Vorbehandlung der Altreifen vor dem Pyrolyse-Kernprozess

- rCB ist mit einer Outputkapazität von 6,2 kt/a das Hauptprodukt der Pyrolyse von Altreifen.
- Pyrolyseöl und Stahl (beide 4,0 kt/a bzw. 28%) folgen knapp dahinter. Der im Vergleich zur Pyrolyse von kunststoffhaltigen Abfällen geringe Ölanteil ist darin begründet, dass Reifen hohe Anteile an nicht-Elastomeren besitzen (v.a. Stahl, Ruß, Silica, Textil)

Prognose von Input-Kapazitäten bis 2030/2035

Ausblick 2030 und 2035: Prognose chemischer Recyclinganlagen in Deutschland (gesamt)

Prognose zukünftiger Kapazitäten chemischer Recyclinganlagen für Post-Consumer Altkunststoffe und -Reifen¹⁾



Es wurden drei Szenarien erstellt:

- ◆ **Konservatives Szenario** (unterer schwarzer Balken)
 - ◆ Konservative Abschätzung der Kapazitätsentwicklung, die nur Anlagen in Bau enthält
 - ◆ ~105 kt Input Kapazität in 2035 (CAGR: 12%)
- ◆ **Realistisches Szenario** (mittlerer grüner Balken)
 - ◆ Subjektive Abschätzung der Kapazitätsentwicklung, die Wahrscheinlichkeiten zur Fertigstellung (z.B. Stand des Genehmigungsverfahrens) berücksichtigt
 - ◆ ~300 kt Input Kapazität in 2035 (CAGR: 23%)
- ◆ **Progressives Szenario** (oberer schwarzer Balken)
 - ◆ Ambitionierte Abschätzung, in der alle angekündigten Pyrolyse-Anlagen realisiert werden und zusätzlich weitere Solvolyse- und Gasifizierungsanlagen gebaut werden
 - ◆ ~840 kt Input Kapazität in 2035 (CAGR: 36%)

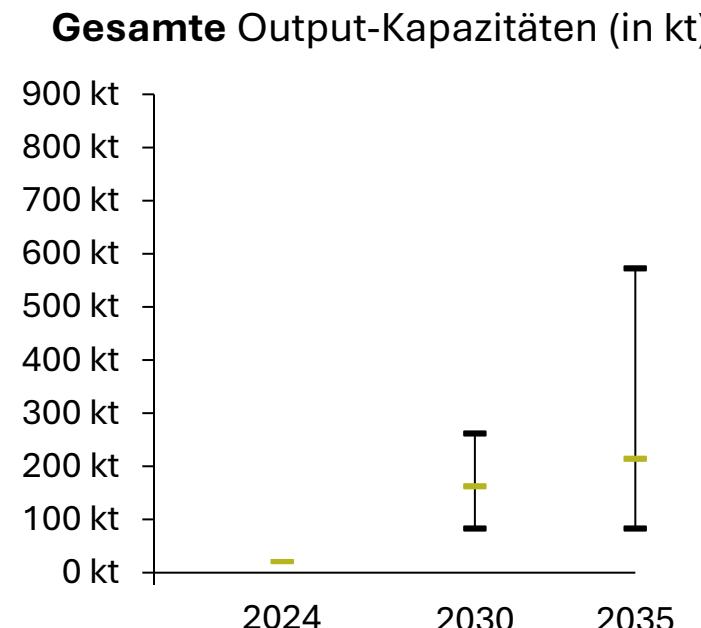
- ◆ Verzögerungen, Änderungen oder Stopp von Planung, Genehmigung oder Bau chemischer Recyclinganlagen können dazu führen, dass nicht alle geplanten Projekte bis 2030/2035 umgesetzt werden.

¹⁾ Abschätzung basierend auf angekündigten Anlagen mit definiertem Standort und Daten zum Status der geplanten Anlagen (z.B. in Bau, Genehmigung erteilt/ausstehend, Förderung erteilt, Verzögerungen aufgetreten) aus Pressemitteilungen und Interviews. Kapazitätsangaben sind nicht mit realen Massenflüssen zu verwechseln, da Anlagen insbesondere in der ramp-up-Phase nicht zu 100% ausgelastet sind.

Prognose von Output-Kapazitäten bis 2030/2035

Ausblick 2030 und 2035: Prognose chemischer Recyclinganlagen in Deutschland (gesamt)

Prognose zukünftiger Kapazitäten chemischer Recyclinganlagen für Post-Consumer Altkunststoffe und -Reifen¹⁾



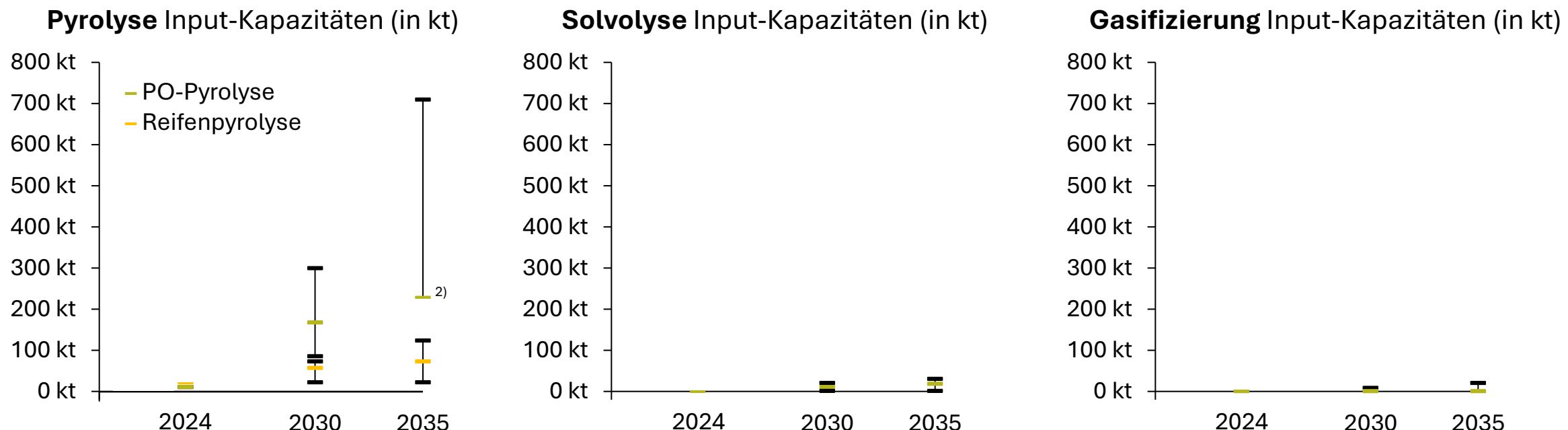
- ◆ 2024 beträgt die Output-Kapazität chemischer Recyclinganlagen 21,2 kt und steigt bis 2030 und 2035 stark.
- ◆ Die Entwicklung der Output-Mengen variiert je nach Szenario
 - ◆ Im **konservativen Szenario** (unterer schwarzer Balken) erreicht die gesamte Output-Kapazität chemischer Recyclinganlagen ~80 kt in 2030 und 2035 (CAGR: 13%)
 - ◆ Im **realistischen Szenario** (mittlerer grüner Balken) erreicht die gesamte Output-Kapazität chemischer Recyclinganlagen ~160 kt in 2030 (CAGR 20%) und ~210 kt in 2035 (CAGR: 23%)
 - ◆ Im **progressiven Szenario** (oberer schwarzer Balken) erreicht die gesamte Output-Kapazität chemischer Recyclinganlagen ~260 kt in 2030 und ~570 kt in 2035 (CAGR: 35%)

¹⁾ Abschätzung basierend auf angekündigten Anlagen mit definiertem Standort und Daten zum Status der geplanten Anlagen (z.B. in Bau, Genehmigung erteilt/ausstehend, Förderung erteilt, Verzögerungen aufgetreten) aus Pressemitteilungen und Interviews. Kapazitätsangaben sind nicht mit realen Massenflüssen zu verwechseln, da Anlagen insbesondere in der ramp-up-Phase nicht zu 100% ausgelastet sind.

Prognose von Input-Kapazitäten bis 2030/2035 nach Technologie

Ausblick 2030 und 2035: Prognose chemischer Recyclinganlagen in Deutschland (nach Technologie)

Prognose zukünftiger Kapazitäten chemischer Recyclinganlagen für Post-Consumer Altkunststoffe und -Reifen nach Technologie¹⁾



- Für die Pyrolyse von Altkunststoffen und –reifen sind sehr starke Kapazitätszuwächse erwartet, weil viele Unternehmen große Anlagen angekündigt haben und bereits bauen.
- Zuwächse in Solvolyse und Gasifizierung werden gering ausfallen, da Unternehmen sich mit Ankündigungen in diesem Bereich sehr zurück halten.

¹⁾ Abschätzung basierend auf angekündigten Anlagen mit definiertem Standort und Daten zum Status der geplanten Anlagen (z.B. in Bau, Genehmigung erteilt/ausstehend, Förderung erteilt, Verzögerungen aufgetreten) aus Pressemitteilungen und Interviews. Kapazitätsangaben sind nicht mit realen Massenflüssen zu verwechseln, da Anlagen insbesondere in der ramp-up-Phase nicht zu 100% ausgelastet sind.

²⁾ Untere Grenze bei 85 kt der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt.