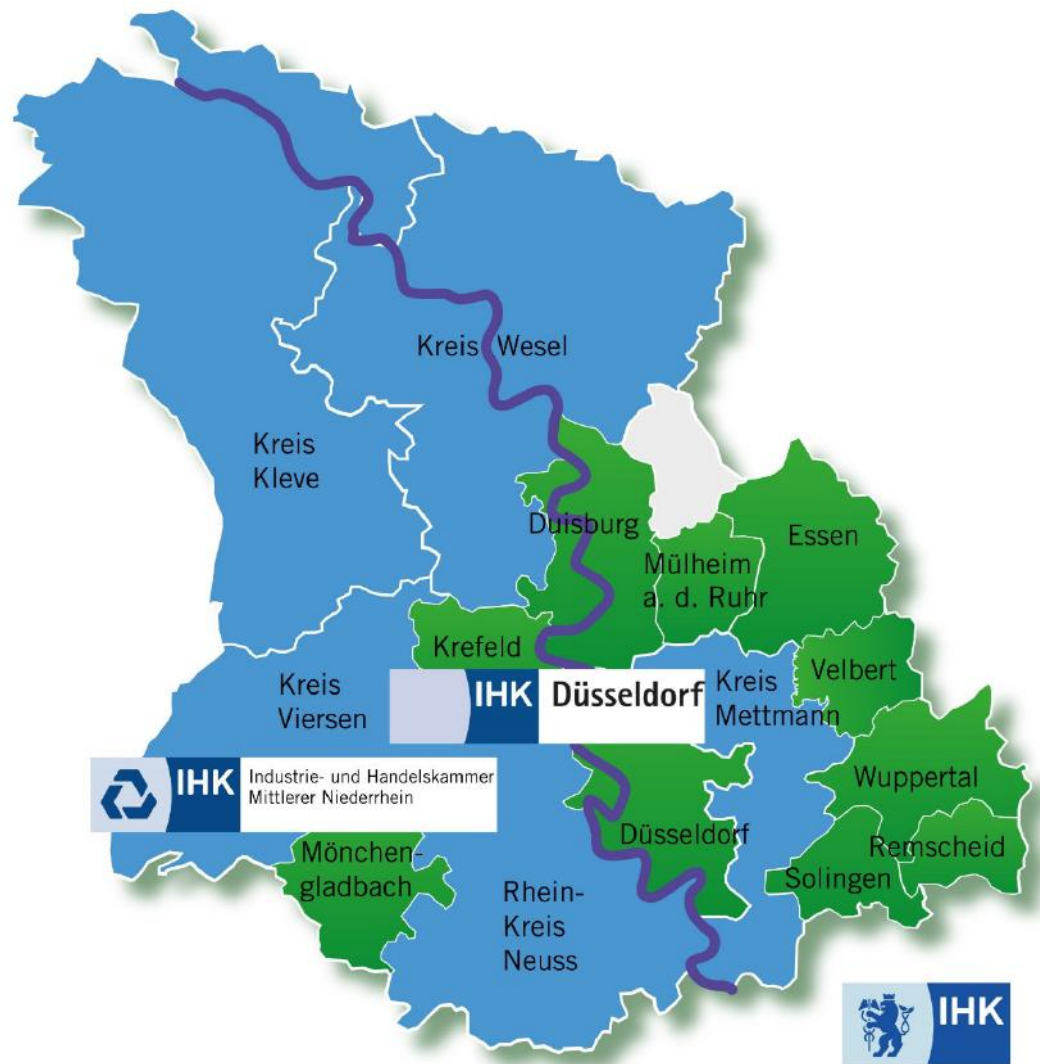




Verfahren zum Kunststoffrecycling

Stand: 04.2022



Bergische Industrie- und Handelskammer
Wuppertal-Solingen-Remscheid



Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	5
2	Einleitung.....	6
3	Kunststoffarten und Anwendungen	8
4	Mengenaufkommen und Behandlungswege	11
5	Verfahrensbeschreibungen	14
5.1	Werkstoffliches Recycling.....	16
5.1.1	Trocken- und nassmechanische Aufbereitung	17
5.1.1.1	Verfahrensbeschreibung	17
5.1.1.2	Vor- und Nachteile des Verfahrens	19
5.1.1.3	Stand des Verfahrens	20
5.1.2	Lösemittelbasierte Verfahren.....	21
5.1.2.1	Verfahrensbeschreibung	21
5.1.2.2	Vor- und Nachteile des Verfahrens	23
5.1.2.3	Stand des Verfahrens	24
5.2	Chemisches Recycling.....	24
5.2.1	Pyrolyse	25
5.2.1.1	Verfahrensbeschreibung	25
5.2.1.2	Vor- und Nachteile des Verfahrens	27
5.2.1.3	Stand des Verfahrens	28
5.2.2	Katalytisches Cracking	29
5.2.2.1	Verfahrensbeschreibung	29
5.2.2.2	Vor- und Nachteile des Verfahrens	31
5.2.2.3	Stand des Verfahrens	32
5.2.3	Hydrocracking.....	32
5.2.3.1	Verfahrensbeschreibung	32
5.2.3.2	Vor- und Nachteile des Verfahrens	33
5.2.3.3	Stand des Verfahrens	34
5.2.4	Solvolyse	34
5.2.4.1	Verfahrensbeschreibung	35
5.2.4.2	Vor- und Nachteile des Verfahrens	37
5.2.4.3	Stand des Verfahrens	37
5.2.5	Gasifizierung.....	38
5.2.5.1	Verfahrensbeschreibung	38
5.2.5.2	Vor- und Nachteile des Verfahrens	41
5.2.5.3	Stand des Verfahrens	41
5.3	Thermische Behandlung.....	42
5.3.1	Verfahrensbeschreibung	42
5.3.2	Vor- und Nachteile des Verfahrens	44
5.3.3	Stand des Verfahrens	45
6	Ausblick.....	46
7	Quellen	51



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Biologisch abbaubare Kunststoffe	9
Abbildung 2: Aufkommen und Verbleib der Kunststoffabfälle in Deutschland im Jahr 2019	11
Abbildung 3: Kunststoffverbrauch und Kunststoffabfallaufkommen seit 2003.....	12
Abbildung 4: Entwicklung der Abfallverwertung von Kunststoffen	13
Abbildung 5: Verwertungswege der Kunststoffe in den Ländern Europas 2018	14
Abbildung 6: Möglichkeiten des chemischen Recyclings im Lebenszyklus von Kunststoffprodukten .	15
Abbildung 7: Verfahren der werkstofflichen Verwertung von Kunststoffen	16
Abbildung 8: Vereinfachte schematische Darstellung der trocken-/ nassmechanischen Aufbereitung	17
Abbildung 9: Aufarbeitungsprodukte des mechanischen Recyclings (links: Mahlgut; Mitte: Agglomerat; rechts: Regranulat)	19
Abbildung 10: Verfahrensschema des lösemittelbasierten Recyclings.....	22
Abbildung 11: CreaSolv®-Prozess	23
Abbildung 12: Schematisches Blockfließbild des Hamburger Verfahrens	26
Abbildung 13: Schematisches Blockfließbild des ReOil®-Prozesses	27
Abbildung 14: Verfahrensschema beim katalytischen Cracken.....	30
Abbildung 15: Synthesegas-Verwertungswege zur Herstellung von chemischen Grundstoffen	39
Abbildung 16: Schema des Enerkem-Prozesses	40
Abbildung 17: Schema einer Hausmüllverbrennungsanlage (Beispiel Würzburg)	43
Abbildung 18: Verfahrensschema EBS-Kraftwerk Scheringen	44
Abbildung 19: Stoffflussbild Kunststoffe 2019	46
Abbildung 20: Kunststoffkreislauf	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wichtige Kunststoffe und Anwendungsbeispiele.....	8
Tabelle 2: Vor- und Nachteile mechanischer Recyclingverfahren	19
Tabelle 3: Vor- und Nachteile lösemittelbasierter Verfahren.....	23
Tabelle 4: Vor- und Nachteile der Pyrolyse.....	28
Tabelle 5: Kommerzielle Anlagen zur Pyrolyse	28
Tabelle 6: Vor- und Nachteile des katalytischen Crackings.....	31
Tabelle 7: Kommerzielle Anlagen zum katalytischen Cracken	32
Tabelle 8: Vor- und Nachteile des Hydrocrackings.....	33
Tabelle 9: Kommerzielle Anlagen zum Hydrocracken.....	34
Tabelle 10: Vor- und Nachteile der Solvolyse	37
Tabelle 11: Vor- und Nachteile der Gasifizierung.....	41
Tabelle 12: Anlagen zur Gasifizierung	41
Tabelle 13: Vor- und Nachteile der thermischen Behandlung.....	44



Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
CA	Celluloseacetat
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EAG	Elektroaltgeräte
EBS	Ersatzbrennstoffe
EP	Epoxidharz
EU	Europäische Union
kJ/ kg	Kilojoule/ Kilogramm
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
MVA	Müllverbrennungsanlage/n
NIR	Nah-Infrarot
PA	Polyamid
PCL	Polycaprolacton
PE	Polyethylen
PE-HD	Polyethylen-High Density
PE-LD	Polyethylen-Low Density
PET	Polyethylenterephthalat
PF	Phenol-Formaldehyd-Harz
PLA	Polymilchsäure
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PS-E	Polystyrol-Expandierbar
PTFE	Polytetrafluorethylen (Teflon)
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
UP	Ungesättigte Polyesterharze
VerpackG	Verpackungsgesetz



1 Zusammenfassung

Die Erstellung des vorliegenden Textes geht auf den Wunsch des Vorstandes des Abfallwirtschaftsvereins zurück, Informationen zu den verschiedenen Verfahren zum Kunststoffrecycling zu erhalten. Aktueller Anlass sind dabei die derzeitigen Diskussionen um das Recycling von Kunststoffabfällen.

Kapitel 2 gibt eine Einleitung in die Thematik, die auch eine rechtliche Einordnung des chemischen Recyclings enthält. In Kapitel 3 erfolgt eine kurze Darstellung der hauptsächlich zum Einsatz kommenden Kunststoffarten, ihrer Anwendungen und Einteilung, da diese für das weitere Verständnis bei der Vorstellung der Verfahren und deren Anwendungsgrenzen wichtig ist.

Daran schließt sich eine Zusammenstellung des Mengenaufkommens von Kunststoffen bzw. der Kunststoffabfälle in Deutschland (aktueller Stand: Jahr 2019) sowie der Behandlungswege der Abfälle und deren zeitlichen Verlaufs an (s. Kapitel 4).

Das nachfolgende Kapitel 5 bildet den Hauptbestandteil des Textes. In diesem werden die einzelnen Verfahren, die bei der Verwertung von Kunststoffen zur Anwendung kommen, vorgestellt. Dies beginnt jeweils mit einer Beschreibung des Verfahrens. Anschließend erfolgt eine Darstellung ihrer Vor- und Nachteile in tabellarischer Form sowie schließlich des derzeitigen Standes der Umsetzung des Verfahrens.

Das Kapitel 6 gibt einen Ausblick auf die kommenden Entwicklungen.

Die Angabe der Quellen, aus denen die Informationen für die Erstellung dieses Textes stammen, bildet den Abschluss.



2 Einleitung

Zurzeit wird von unterschiedlichen Seiten ein Streit darüber geführt, wie die gesetzlich geforderten (Recycling)-Quoten erreicht werden können und welche Behandlungsverfahren dabei zum Einsatz kommen sollen. Dabei befeuern die einzuhaltenden Klimaziele zusätzlich die Diskussion.

Unstrittig ist, dass die derzeitig eingesammelten Kunststoffabfälle, z. T. aufgrund von Verschmutzungen, aber auch wegen ihres komplexen Aufbaus und ihrer Zusammensetzung, nicht ausschließlich mit rein werkstofflichen Verfahren einer Aufbereitung und einer erneuten Verwendung/Verwertung zugeführt werden können.

Dennoch haben die Anlagenbetreiber, die Kunststoffe für eine werkstoffliche Verwertung aufbereiten, die Sorge, dass ihnen durch „neue“ Verfahren, wie dem chemischen Recycling, Stoffmengen zukünftig entzogen werden.

Nicht nur Umweltschutzverbände sehen zudem das chemische Recycling aufgrund der bislang unklaren Datenlage bzgl. Aufwand und Nutzen solcher Verfahren kritisch. Sie befürchten, dass damit eine größere Klimabelastung einhergehen wird, als wenn die vorhandenen Mittel für Vermeidungsmaßnahmen verwendet werden. So kommt auch das Umweltbundesamt zu der Einschätzung, dass neue Verfahren sich folglich mit den beiden etablierten Verfahrenswegen (werkstoffliches Recycling, energetische Verwertung) messen und Nachweise für ihre ökologische Vorteilhaftigkeit sowie die wirtschaftliche Darstellbarkeit erbringen müssen.¹

Betreiber von Müllverbrennungsanlagen (MVA) verarbeiten derzeit einen nicht kleinen Teil der Kunststoffabfallmengen. Die hochkalorischen Kunststoffe müssen zwar gut mit niederkalorischen Abfällen vermischt werden, um sie überhaupt in den MVA behandeln zu können, aber sie tragen auch einen guten Teil zur Energieausbeute und damit der Wirtschaftlichkeit einer MVA bei.

Umgekehrt stecken die chemischen Recycling-Verfahren noch „in den Kinderschuhen“. „Neue Verfahren“ haben es immer schwer und werden bei den anderen Marktteilnehmern Befürchtungen ob ihrer eigenen Marktstellung auslösen. Aber sie alleine deswegen nicht weiter zu untersuchen und voranzutreiben, verhindert auf Dauer neue und bessere Lösungen. Vollkommen neu ist das chemische Recycling jedoch nicht. Es gibt darüber schon seit einigen Jahrzehnten Erkenntnisse. Aber bisher waren die gesellschaftlichen und vor allem die wirtschaftlichen Randbedingungen so, dass es sich nicht lohnte, in diese zu investieren.

Rechtlich gesehen fällt das chemische Recycling unter den Begriff „stoffliche Verwertung“ bzw. „Recycling“. Dies ergibt sich aus den Begriffsbestimmungen des § 3 Kreislaufwirtschaftsgesetz (s. nachstehende Definitionen in den Absätzen 23, 23a, und 25):

(23) Verwertung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis die Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen. Anlage 2 enthält eine nicht abschließende Liste von Verwertungsverfahren.

¹ Umweltbundesamt (Hrsg.): „Chemisches Recycling“, Juli 2020, S. 10



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

(23a) Stoffliche Verwertung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verwertungsverfahren mit Ausnahme der energetischen Verwertung und der Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder als anderes Mittel der Energieerzeugung bestimmt sind. Zur stofflichen Verwertung zählen insbesondere die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling und die Verfüllung.

(25) Recycling im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.

Weitere Vorgaben zum Umgang mit Kunststoffen sind dem Verpackungsgesetz (VerpackG) zu entnehmen. Im § 16 Abs. 2 VerpackG werden diese explizit angesprochen. Kunststoffverpackungen sind zu mindestens 90 Masseprozent einer Verwertung zuzuführen. *Dabei sind mindestens 65 Prozent und ab dem 01.01.2022 70 Prozent dieser Verwertungsquote durch werkstoffliche Verwertung sicherzustellen.* Eine Definition der werkstofflichen Verwertung ist im § 3 Abs. 19 VerpackG enthalten. Demnach ist eine werkstoffliche Verwertung definiert als *die Verwertung durch Verfahren, bei denen stoffgleiches Neumaterial ersetzt wird oder das Material für eine weitere stoffliche Nutzung verfügbar bleibt.*

Über den zweiten Teilsatz („oder das Material ...“) könnte das chemische Recycling unter den Begriff „werkstoffliche Verwertung“ fallen. Denn auch die sich aus dem chemischen Recycling ergebenden Produkte lassen sich nach entsprechenden Umwandlungsverfahren stofflich verwerten bzw. verwenden. Das Umweltbundesamt grenzt aber das werkstoffliche Recycling eindeutig vom chemischen Recycling ab und ordnet das chemische Recycling dem stofflichen oder rohstofflichen Recycling zu ².

² Umweltbundesamt (Hrsg.): „Chemisches Recycling“, Juli 2020, S. 7 bzw. S. 8



3 Kunststoffarten und Anwendungen

Die in dieser Ausarbeitung verwendete Definition von Kunststoffen entspricht der vom Umweltbundesamt verwendeten. Darunter werden feste Werkstoffe gefasst, die hauptsächlich aus synthetisch hergestellten oder chemisch bzw. biologisch modifizierten natürlichen Makromolekülen bzw. Polymeren bestehen. Sie enthalten weitere Stoffe wie Additive (z. B. Antioxidantien, Flammschutzmittel, Verarbeitungshilfsstoffe) oder Füllstoffe (z. B. Kalk, Glasfasern), die zugegeben werden, um die funktionalen Eigenschaften der verschiedenen Polymere zu optimieren. Flüssige Polymere fallen nicht unter diese Definition.³

Die Grundbestandteile von Kunststoffen werden synthetisch oder halbsynthetisch aus monomeren organischen Molekülen hergestellt. Kunststoffe lassen sich grob nach den drei Hauptgruppen Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere unterscheiden, wobei die beiden erstgenannten Polymerfamilien von besonderer Relevanz in Bezug auf die Kunststoffproduktion und -verarbeitung sind. Elastomere finden z. B. Verwendung als Reifen, Dichtungsringe und Gummibänder. Als Einsatzprodukt für Elastomere spielt Naturkautschuk eine große Rolle. Elastomere werden, etwa in amtlichen Statistiken, getrennt von anderen Kunststoffen behandelt. Aufgrund ihrer Sonderstellung wird im Folgenden nicht weiter auf Elastomere eingegangen.⁴

Tabelle 1: Wichtige Kunststoffe und Anwendungsbeispiele⁴

Hauptgruppe	Wichtige Eigenschaften	Bedeutende Kunststoffe	Anwendungsbeispiel
Thermoplaste	Thermoplaste können durch Wärmezugabe verformt werden. Solange die Zersetzungstemperatur nicht überschritten wird, handelt es sich um einen reversiblen Vorgang.	PE-LD	Folien (primär Verpackungen)
		PE-HD	Flaschen, Rohre
		PP	Batteriegehäuse, Becher, Verpackungen, Armaturenbretter
		PS	Isolierfolien, Verpackungen
		PS-E	Verpackungen, Schallschutzplatten
		PVC	Bodenbelag, Rohre, Profile, Kabelummantelungen und -kanäle
		PET	Flaschen
		ABS	Armaturen, Schutzhelme
		PA	Druckschläuche, Dichtungen
Duroplaste	Duroplaste sind nicht thermisch verformbar. Duroplaste sind spröde und meist hart.	PUR	Klebstoffe, Autoinnenverkleidungen
		EP	Klebstoffe, elektrische Isolierungen
		PF	Schalter, Bremsbeläge
		PTFE	Beschichtungen, Dichtungen
		UP	Textilien, Harze

³ Umweltbundesamt (Hrsg.): „Chemisches Recycling“, Juli 2020, S. 6

⁴ Text entnommen aus Lindner, C.; Hoffmann, O.: „Analyse/Beschreibung der derzeitigen Situation der stofflichen und energetischen Verwertung von Kunststoffabfällen in Deutschland“, Stand 19.11.2015, S. 11



Bzgl. der in Deutschland im Jahr 2019 verarbeiteten Kunststoffe hatten die Thermoplaste einen Marktanteil von etwa 84 % [davon allein die Polyolefine (= PE-LD, PE-HD und PP): etwa 45 %] und die Duroplaste einen Anteil von rund 16 %⁵.

In den letzten Jahren werden biologisch abbaubare Kunststoffe verstärkt im Zusammenhang mit dem Thema Nachhaltigkeit diskutiert. In diesem Zusammenhang wird auch oft der Begriff der bio-basierten Kunststoffe verwendet. Dabei ist zu unterscheiden, dass bio-basierte Kunststoffe solche sind, die auf Basis nachwachsender Rohstoffe erzeugt werden. Dies ist **nicht** deckungsgleich mit dem Begriff „biologisch-abbaubar“. Denn biogene Herkunft und biologische Abbaubarkeit gehen nicht zwangsläufig miteinander einher. Denn es gibt biobasierte Kunststoffe, die biologisch abbaubar (z. B. Polymilchsäure = PLA) oder auch nicht biologisch abbaubar (z. B. Celluloseacetat = CA) sind. Aber auch aus fossilen Rohstoffen stammende Kunststoffe können biologisch abbaubar sein (z. B. Polycaprolacton = PCL). Die nachstehende Abbildung veranschaulicht die Zusammenhänge.

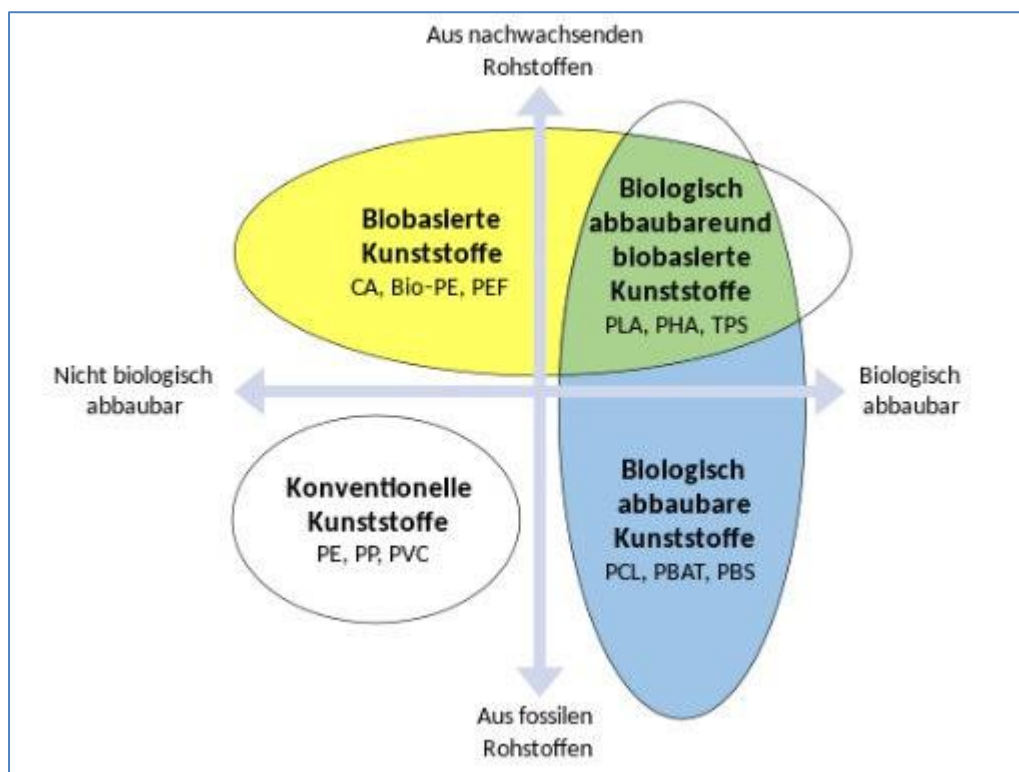


Abbildung 1: Biologisch abbaubare Kunststoffe⁶

Wenig bekannt ist, dass die ersten Massenkunststoffe, die industriell hergestellt wurden, biobasierte Kunststoffe waren. So der thermoplastische Kunststoff Celluloid auf Basis von Cellulose, der vor allem für Filme, Brillenfassungen, Spielzeug, Käämme und Tischtennisbälle eingesetzt wurde. Auch das Cellophan (ebenfalls auf Cellulosebasis), für das die Massenproduktion im Jahr 1923 startete, wird bis heute für vor allem für Verpackungen sowie als Einsatz in Briefumschlägen genutzt. Durch die Entdeckung von Kunststoffen auf der Basis von Mineralölen entstand schnell eine Konkurrenz, bei der

⁵ Lindner, C.; Schmitt, J.; Hein, J.: „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019“, Kurzfassung der Conversio Studie, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff 2020

⁶ Graphik entnommen aus Wikipedia „Bio-basierter Kunststoff“ vom 14.04.2022



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

die ersten biobasierten weitestgehend verdrängt wurden. Standardkunststoffe werden heute überwiegend aus Erdöl hergestellt, weniger oft aus Erdgas oder anderen Rohstoffen. Bislang können Biokunststoffe preislich noch kaum mit konventionellen Kunststoffen konkurrieren. Trotzdem nimmt ihr Marktanteil stark zu. Ein Grund dafür ist das wachsende Umweltbewusstsein bei Industrie und Endverbrauchern, die zum Beispiel für Bio-Lebensmittel auch entsprechende Verpackungen wünschen.

2018 lag die Produktionskapazität von biobasierten und teil-biobasierten Kunststoffen insgesamt ca. 19 Millionen Tonnen und damit bei knapp 6 % an der Produktionskapazität aller Kunststoffe. Bis 2023 wird mit einem Wachstum auf einen Anteil von 10 % gerechnet ⁷.

Ganz aktuell tauchen biologisch abbaubare Kunststoffe in der frisch verabschiedeten Bioabfallverordnung auf, in dem dort biologisch abbaubare Kunststoff-Sammelbeutel unter bestimmten Voraussetzungen für die Erfassung von Bioabfällen im Haushalt und gemeinsamer biologischer Behandlung mit den Bioabfällen zugelassen wurden. Auch die biologisch-abbaubaren Kunststoffe sind in der oben genannten Systematik der Einteilung der Kunststoffe enthalten.

Das Umweltbundesamt steht biologisch abbaubaren Kunststoffen aus fossilen Quellen gänzlich ablehnend und biobasierten biologisch abbaubaren Kunststoffen zurückhaltend bis ablehnend gegenüber. Es ist der Auffassung, dass es keine nachgewiesenen Umweltvorteile durch biologisch abbaubare Kunststoffe gebe und das Bewerben solcher Kunststoffe als umweltfreundlich unterbleiben solle, bis es Beweise dafür gebe ⁸. Weiterhin wird angeführt, dass die mehrfache Nutzung und das Recycling von stabileren Produkten ökologische Vorteile gegenüber abbaubaren Kunststoffen habe. Auch die Eignung für Lebensmittelkontakt wird kritisch gesehen, da befürchtet wird, dass die abbauenden Mikroorganismen zu Kontamination der Lebensmittel führen ⁹.

Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass bei einer angestrebten Kompostierung im Vergleich zur Müllverbrennung ¹⁰ die chemische Energie in den Stoffen nicht sinnvoll genutzt werde. Darüber hinaus wäre die CO₂-Problematik – anders als bei konventionellen Kunststoffen – bei einer Verbrennung von biobasierten Kunststoffen gänzlich anders zu bewerten. Denn diese wäre aktuell bis auf den Herstellungsprozess und die Logistikabläufe nahezu klimaneutral.

⁷ Text entnommen und angepasst aus Wikipedia „Bio-basierter Kunststoff“ vom 14.04.2022

⁸ Umweltbundesamt (Hrsg.): „Biologisch abbaubare Kunststoffe“, August 2009, S. 9

⁹ Umweltbundesamt: „Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe“, 04.02.2020

¹⁰ Behr, A.; Seidensticker, T.: „Einführung in die Chemie nachwachsender Rohstoffe – Vorkommen, Konversion, Verwendung“, Springer Spektrum, 2018, ISBN 978-3-662-55254-4, S. 317–335



4 Mengenaufkommen und Behandlungswege

Die aktuellsten Daten bzgl. des Mengenaufkommens an Kunststoffen in Deutschland stammen aus dem Jahre 2019 und wurden von der Conversio Market & Strategy GmbH zusammengestellt ¹¹.

Die Rohstoffmenge betrug insgesamt 20,2 Mio. t, die zur Herstellung von Kunststoffwerkstoffen als Neuware (10,3 Mio. t), von Rezyklaten (2,0 Mio. t) sowie sonstigen Kunststoffen, z. B. für Kleber, Farben, Lacke, Fasern etc., (7,9 Mio. t) verwendet wurde.

Im Folgenden konzentrierte sich die Studie auf die Betrachtung des Verbleibs der Kunststoffwerkstoffe aus Neuware und der Rezyklate. Der Verbleib der sonstigen Kunststoffe wurde nicht weiter untersucht.

Bereinigt um Im- und Exporte gelangten rund 12,3 Mio. t als Neuware und 1,9 Mio. t an Rezyklaten in die Verarbeitung zu Kunststoffprodukten in den Branchen Verpackung, Bau, Fahrzeuge, Elektro, Haushalt, Möbel, Landwirtschaft und Sonstige.

Unter Berücksichtigung der Im- und Exporte wurden 12,1 Mio. t an verarbeiteten Kunststoffen von privaten und gewerblichen Endverbrauchern verwendet.

Aus diesen verarbeiteten Mengen, aber auch aus denen der Vorjahre, entstanden rund 6,3 Mio. t an Abfällen, von denen etwa 6,2 Mio. t bzw. 99,4 % einer Verwertung (stofflich, rohstofflich oder energetisch) sowie weniger als 0,1 Mio. t bzw. 0,6 % einer Beseitigung (Deponie oder Verbrennung ohne hinreichende Energieauskopplung) zugeführt wurden.

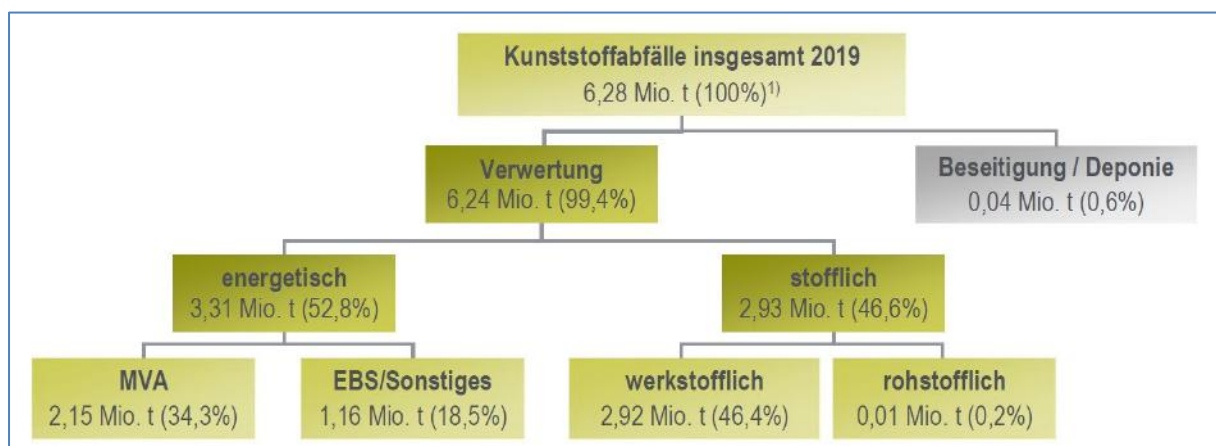


Abbildung 2: Aufkommen und Verbleib der Kunststoffabfälle in Deutschland im Jahr 2019 ¹¹

Von den verwerteten Mengen gelangte der etwas überwiegende Teil (rd. 53 %) in die energetische Verwertung, die zu fast 2/3 in Müllverbrennungsanlagen und dem Rest in Ersatzbrennstoff- oder sonstigen Anlagen (Zementwerke etc.) erfolgte. Knapp 47 % der verwerteten Abfälle wurden einer stofflichen Verwertung zugeführt, die zu über 99% aus einer werkstofflichen Verwertung bestand. Der Rest gelangte in die rohstoffliche Verwertung.

¹¹ Lindner, C.; Schmitt, J.; Hein, J.: „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019“, Kurzfassung der Conversio Studie, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff 2020



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

Aus früheren Studien ¹² lassen sich die Zahlen zum Kunststoffverbrauch und den entstandenen Kunststoffabfallmengen für Deutschland herausholen. Die Abbildung 3 gibt die Entwicklung seit 2003 wieder.

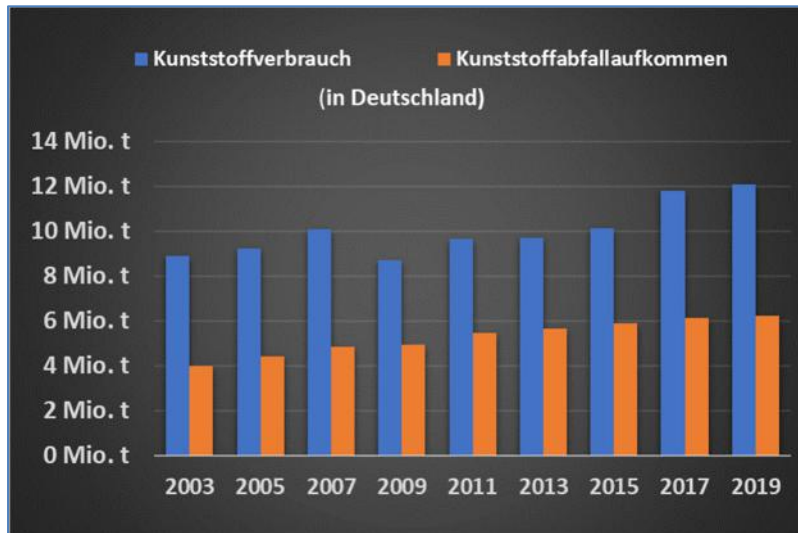


Abbildung 3: Kunststoffverbrauch und Kunststoffabfallaufkommen seit 2003

Hierbei wird deutlich, dass im Mittel eine Differenz von rund 4,7 Mio. t zwischen dem Verbrauch und der entstehenden Menge an Kunststoffabfällen auftritt. Diese rund 4,7 Mio. t pro Jahr werden zum allergrößten Anteil dem anthropogenen Lager zugeführt, also als Gebrauchsgegenstände (z. B. Elektrogeräte, Autos, Möbel, Teppichböden, Matratzen) mehr- bzw. langjährig genutzt oder in Form von Bauteilen (z. B. Rohre, Rollläden) beim Hoch- oder Tiefbau verwendet. Damit erfolgt der Aufbau eines großen „Lagers“, das allein in den Jahren von 2003 bis 2019 um etwa 80,7 Mio. t vergrößert wurde, während im gleichen Zeitraum ungefähr 90 Mio. t an Kunststoffabfällen angefallen und behandelt worden sind.

Betrachtet man alleine den zeitlichen Verlauf der verwerteten Kunststoffabfälle (hier in den Jahren von 1994 bis 2019), so zeigt sich in diesem Zeitraum ein deutlicher Anstieg der Verwertungsmenge (s. Abbildung 4). Dabei weist etwa ab dem Jahre 2005 die energetische Verwertung stets den größten Anteil auf. Dies ist auch auf das Ende der Übergangszeit der Technischen Anleitung Siedlungsabfall zurückzuführen, die ab 2005 zu einem Verbot der Deponierung von unbehandelten Siedlungsabfällen führte. Zusätzlich kam die Anerkennung der thermischen Behandlung in Müllverbrennungsanlagen als Verwertungsalternative hinzu. Allerdings hat auch seitdem die werkstoffliche Verwertung fast durchweg stetig zugenommen und die Beseitigung von Kunststoffabfällen sehr stark abgenommen.

¹² Studien der Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH für die Jahre 2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015 sowie Studien der Conversio Market & Strategy GmbH für die Jahre 2017, 2019

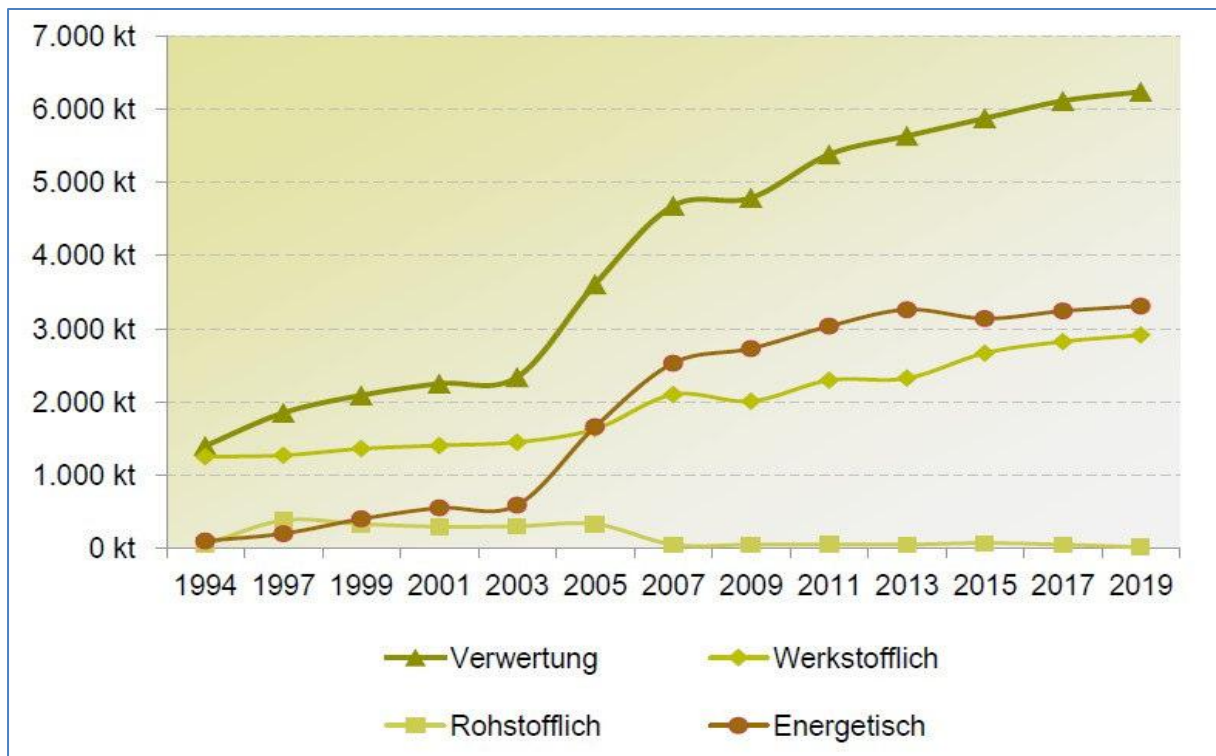


Abbildung 4: Entwicklung der Abfallverwertung von Kunststoffen ¹³

¹³ Lindner, C.; Schmitt, J.; Hein, J.: „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019“, Kurzfassung der Conversio Studie, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff 2020



5 Verfahrensbeschreibungen

Zu den derzeit durchgeführten Behandlungsverfahren gehören neben dem Recycling auch die thermische Behandlung in einer Ersatzbrennstoff- oder Müllverbrennungsanlage. In geringen Mengen gelangen Kunststoffe auch auf Deponien. Da die Deponierung jedoch kein Verwertungsverfahren ist, wird sie hier nicht weiter behandelt.

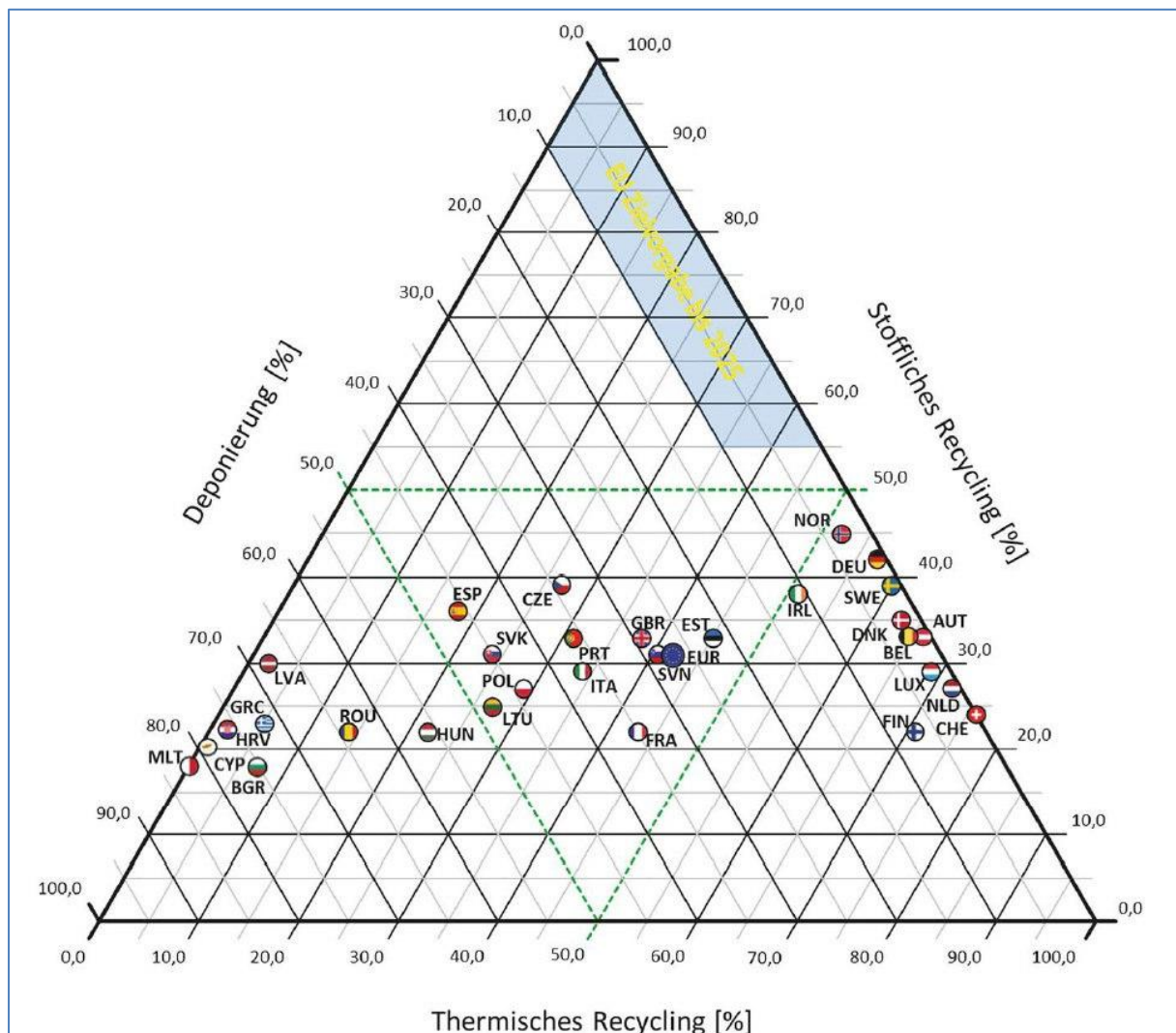


Abbildung 5: Verwertungswege der Kunststoffe in den Ländern Europas 2018¹⁴

Der Abbildung 5 ist die Verteilung der Behandlungswege innerhalb der EU im Jahre 2018 zu entnehmen. Darin lässt sich gut ablesen, welche Länder alle ein Verbot der Ablagerung von reaktiven Abfällen bisher ausgesprochen haben. Alle diese Länder befinden nahe der rechten Dreieckskante. Darunter ist auch Deutschland. Aber es wird ebenso deutlich, dass alle – auch diese – Länder noch ein gutes Stück weit entfernt sind von der Erfüllung der EU-Vorgaben für das Jahr 2025. Die EU-Vorgaben sind als Fläche im Diagramm blau unterlegt. Ab dann muss das stoffliche Recycling mindestens 55 %

¹⁴ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“, 2020, S. 49



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

betragen bzw. darf eine Deponierung nur noch für maximal 10 % der Kunststoffabfälle erfolgen bzw. ist der Rest der thermischen Verwertung zuzuführen.

Sowohl das werkstoffliche Recycling als auch das chemische Recycling gehören beide zu den stofflichen Recyclingverfahren. Sie unterscheiden sich jedoch nicht nur in der Verfahrensart, sondern auch dadurch, dass sie im Lebenszyklus von Kunststoffprodukten an verschiedenen Stellen angreifen.

Demnach führt das werkstoffliche Recycling dazu, dass es zu einem späteren Zeitpunkt eine Rückführung von Materialien in den Lebenszyklus vornimmt. Dies ist möglich, weil das werkstoffliche Recycling den Werkstoff in seiner Produktform bzw. – aus chemischer Sicht gesprochen – die Kettenlängen der Kunststoffe bzw. der Polymere erhält. Daraus ergibt sich der ökologische und wirtschaftliche Vorteil gegenüber dem chemischen Recycling, dass alle bis dahin erfolgten Behandlungs- und Veredlungsschritte zur Erzeugung der Endprodukte nicht noch einmal durchlaufen werden müssen. Dieser prinzipielle ökologische Vorteil ist auch der Grund, warum der Gesetzgeber das chemische Recycling bisher nicht gleichrangig zum werkstofflichen Recycling eingestuft hat.

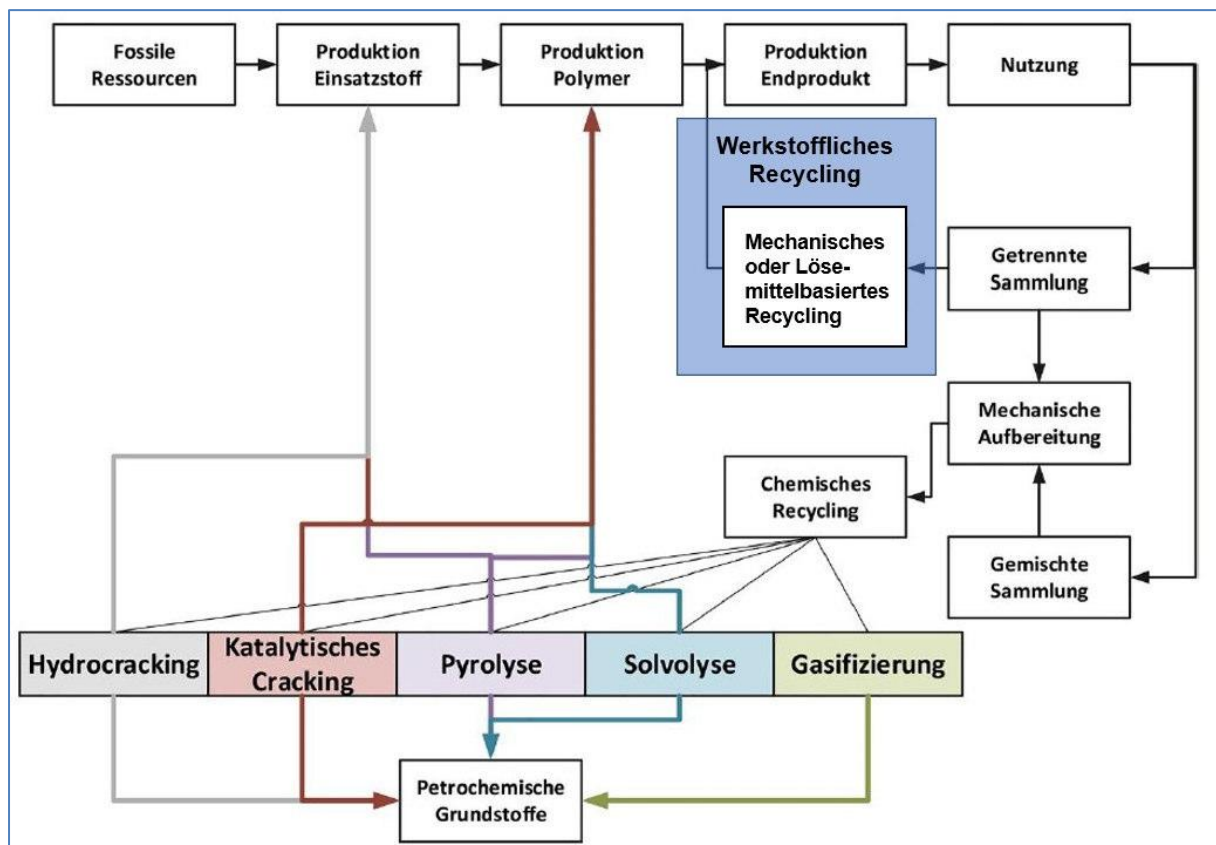


Abbildung 6: Möglichkeiten des chemischen Recyclings im Lebenszyklus von Kunststoffprodukten¹⁵

Dennoch ist auch das werkstoffliche Recycling nicht ohne Umweltbelastungen (Transportprozesse, Energieverbrauch, Materialverluste etc.) durchführbar und hat darüber hinaus seine eigenen Grenzen in der Anwendbarkeit. Darauf wird im nächsten Kapitel eingegangen.

¹⁵ Übernommen und angepasst aus Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 47–60



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

Das chemische Recycling führt im Gegensatz dazu, dass die zu recycelnden Kunststoffe je nach Art des Verfahrens und der eingesetzten Kunststoffe in unterschiedliche Vorprodukte mit unterschiedlich langen Molekülketten aufgebrochen werden. Es ist damit aber auch toleranter gegenüber der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe. Allerdings bedarf es auch einer z. T. aufwändigen Vorbehandlung und Störstoffentfrachtung. Näheres ist den zugehörigen Kapiteln zu entnehmen.

Im Vergleich dazu ist die thermische Verwertung in Verbrennungsanlagen (insbesondere den Müllverbrennungsanlagen) das, was die Zusammensetzung des Inputs angeht, robusteste Verfahren. Allerdings erfolgt hier, unter Rückgewinnung eines großen Teils des energetischen Inhalts der Kunststoffe, eine nahezu vollständige Umsetzung in CO₂, wenn nicht weitere Schritte durchgeführt werden. Auch hier ist Weiteres dem zugehörigen Kapitel zu entnehmen.

5.1 Werkstoffliches Recycling

Bei der stofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen hat sich bislang das werkstoffliche Recycling durchgesetzt. Hierunter werden Verfahren gefasst, bei denen die Polymerstruktur nicht wesentlich verändert wird und der Kunststoff als Material erhalten bleibt. Somit findet werkstoffliches Recycling hinsichtlich seiner Komplexität auf einer niedrigeren technischen Ebene als das chemische Recycling statt. Damit verbunden ist auch ein deutlich niedrigerer Aufbereitungsaufwand.

Damit lässt sich nur die Gruppe der thermoplastischen Kunststoffe, die allerdings den größten Marktanteil hat, verarbeiten. Duroplaste können aufgrund ihrer vernetzten Struktur generell nicht werkstofflich verwertet werden. Ein erneutes Einschmelzen und eine anschließende Formgebung sind für diese nicht möglich.



Abbildung 7: Verfahren der werkstofflichen Verwertung von Kunststoffen ¹⁶

¹⁶ Umweltbundesamt (Hrsg.): „Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes“, Juni 2021, S. 73



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches werkstoffliches Recycling ist eine bestmögliche Trennung der einzelnen Kunststoffsorten voneinander, um eine hohe Qualität des zurückgewonnenen Sekundärkunststoffes gewährleisten zu können. Diese erfolgt in der Praxis durch trocken- und nassmechanische Aufbereitungsverfahren oder durch Extraktion bestimmter Polymere unter Einsatz selektiv wirkender Lösemittel.

Die Abbildung 7 gibt wieder, welche Verfahren unter das werkstoffliche Recycling gefasst werden. Während sich das trocken-/ nassmechanische Verfahren in der Praxis etabliert hat, konnten sich die lösemittelbasierten Trennverfahren (hierzu zählen z. B. das Vinyloop-, das CreaSolv- und das Newcycling-Verfahren), insbesondere aufgrund der Kosten für diese Technologie, in Deutschland bislang nicht im großtechnischen Maßstab durchsetzen.

5.1.1 Trocken- und nassmechanische Aufbereitung

5.1.1.1 Verfahrensbeschreibung

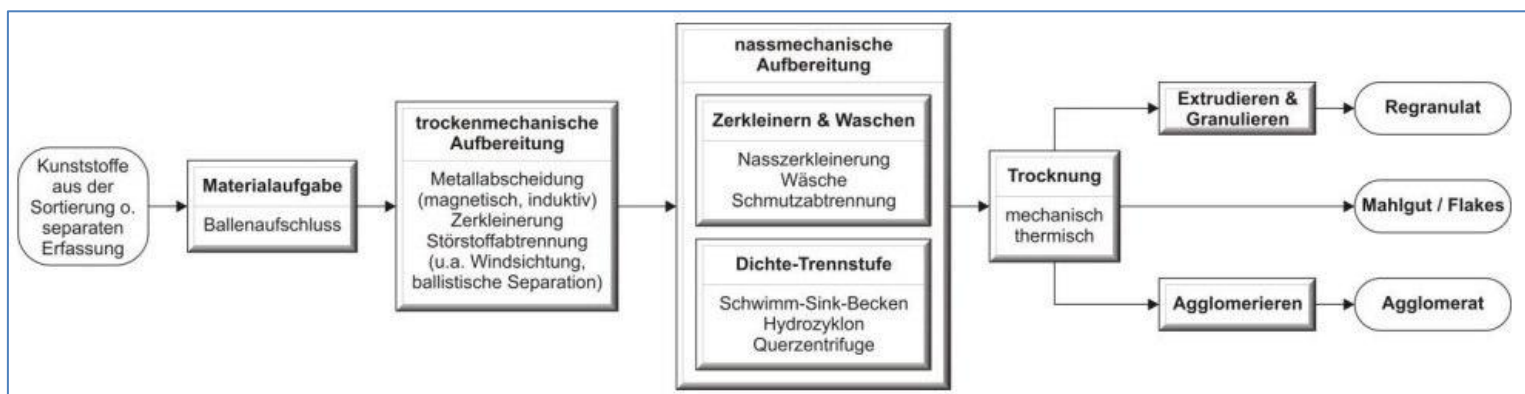


Abbildung 8: Vereinfachte schematische Darstellung der trocken-/ nassmechanischen Aufbereitung¹⁷

Die Kunststoffe werden als Schüttgut in Big Bags oder als Ballen angeliefert. Im Anschluss an die Materialaufgabe und die manuelle oder mechanische Öffnung der Ballen folgt die trockenmechanische Aufbereitung des Inputmaterials. Zunächst werden die Kunststoff-Vorprodukte auf eine Größe von ca. 10 bis 100 mm teilweise in mehreren Stufen mittels Schneidmühlen, Rotorscheren oder Schreddern zerkleinert. Bereits vorzerkleinerte Kunststoffkonzentrate aus der EAG-Aufbereitung werden sogleich trockenmechanisch aufbereitet. Magnet- und Wirbelstromscheider trennen im Mahlgut enthaltene Eisen- und Nichteisenmetalle ab. Für die trockenmechanische Abtrennung weiterer loser Verunreinigungen (z. B. Papier) kommen Windsichter (teilweise mit Zick-Zack- oder Kegelsichter), Ballistikseparatoren oder NIR-Trenner zum Einsatz.

Die sich anschließende nassmechanische Aufbereitung umfasst teilweise mehrstufige Wasch- und Trennprozesse. Dabei dient die Wäsche der Entfernung noch anhaftender Verunreinigungen, wie beispielsweise Fette, Lebensmittelreste, Kosmetikbestandteile, Etiketten, Klebstoffanhaftungen oder Sand. Für stark verschmutzte Kunststoffe (maßgeblich Verpackungskunststoffe) kommen hierfür Nassmühlen in Kombination mit Friktionswäschern zum Einsatz.

¹⁷ Umweltbundesamt (Hrsg.): „Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes“, Juni 2021, S. 16



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

Zunächst wird der Materialstrom in der Nassschneidmühle unter Zugabe von Wasser und bei hoher Drehzahl auf eine Korngröße von < 12 mm nachzerkleinert. Dabei entstehende Reibungseffekte bewirken eine Reinigung des Mahlgutes. Die Verunreinigungen werden im Anschluss mit Hilfe des Friktionswäschers abgetrennt. Der Friktionswäscher besteht aus einem schrägstehenden, schnelllaufenden Paddelrotor, der von einem Sieb (3 bis 10 mm) und einem Trog umgeben ist. Für diesen Prozessschritt wird abermals Wasser zugeführt. In Kombination mit der entstehenden Friktionswärme bewirkt der Friktionswäscher eine intensive Reinigung und entfernt Organik- und Papieranhaftungen sowie Kleberreste weitestgehend. Der Einsatz von Chemikalien ist nicht erforderlich.

Das gereinigte Mahlgut enthält neben dem Zielpolymer noch immer andere Kunststoffe und Störstoffe (z. B. Holz, Gummi, Glas), die mit den vorhergehenden Verfahrensschritten noch nicht abgetrennt wurden. Die Rückgewinnung bestimmter Kunststoffsorten erfolgt mit Hilfe der Dichtentrennung im nassen Medium. Dieses Verfahren macht sich das unterschiedliche spezifische Gewicht der enthaltenen Komponenten zunutze. Stand der Technik sind Schwimm-Sink-Becken, Hydrozyklone und Sortierzentrifugen. Im Fall sich überlappender Dichtebereiche einzelner Kunststoffsorten sind weitere trockene Aufbereitungsschritte erforderlich. Hierfür kommt die Nahinfrarot-Technik oder alternativ bei rußgefärbten schwarzen Kunststoffen beispielsweise die elektrostatische Separation zum Einsatz.

Nach dem nassmechanischen Prozessschritt muss das Material für nachfolgende Verarbeitungsschritte getrocknet werden. Für die Trocknung kommen mechanische und/ oder thermische Verfahren (Umluft-, Gegenstrom- oder Infrarottrockner) zum Einsatz. Bei der mechanischen Trocknung wird dem Material die Feuchtigkeit mittels trocken arbeitender Zentrifugen entzogen. Im Fall der thermischen Trocknung durchströmt erwärmte Luft das feuchte Material. Der dabei entstehende Wasserdampf wird von der Luft aufgenommen und abgeführt. Für eine anschließende Extrusion liegt der Restfeuchtegehalt des gereinigten Mahlgutes idealerweise unter 3 %.

Das getrocknete Mahlgut wird je nach Anforderung des Rezyklatabnehmers als Mahlgut/ Flakes bereitgestellt oder in einem abschließenden Prozessschritt zu Agglomeraten oder sogenannten „Technische Potenzialanalyse Kunststoffrecycling Regranulaten“ aufbereitet. Beim Agglomerieren werden die Kunststoffpartikel mit dem Ziel der Erzeugung höherer Schüttdichten und der Vereinheitlichung der Korngröße und -form durch oberflächliches Anschmelzen miteinander verbunden. Zum Einsatz kommen Topfagglomeratoren oder Matrizenpressen.

Das Umschmelzen in rieselfähiges Regranulat umfasst die Extrusion und Granulierung. Zunächst wird das Kunststoffmahlgut in einem Extruder unter dem Einfluss von Wärme und Druck kontinuierlich aufgeschmolzen und zu einer homogenen Masse plastifiziert. Die flüssige Masse wird dabei in einer Schnecke homogenisiert. Diese dient ferner zum Materialtransport zwischen der Sieb- und der Entgasungs- sowie Granuliereinheit. Zum Einsatz kommen Ein-, Doppel- oder Mehrwellenextruder. Restfeuchte und flüchtige Bestandteile werden in der Entgasungseinheit mittels Unterdrucks entfernt. Dieser Unterdruck wird durch Vakuumpumpen erzeugt (Vakuumentgasung). In der Kunststoffschmelze noch enthaltene Verunreinigungen, wie beispielsweise Holz-, Papierfasern oder nicht schmelzbare Kunststoffe, werden mit sogenannten Schmelzefiltern abgetrennt. In Abhängigkeit von den enthaltenen Verunreinigungen und dem Qualitätsziel werden Filterfeinheiten zwischen $60 \mu\text{m}$ (z. B. PET-Verarbeitung) und $250 \mu\text{m}$ (z. B. Spritzgussanwendungen) eingesetzt. Es werden diskontinuierliche und kontinuierliche Schmelzefilter unterschieden, wobei letztere bei stärkeren Verschmutzungen zum Einsatz kommen und damit häufige Produktionsunterbrechungen vermeiden. Vakuumentgasung und Schmelzefiltration tragen zur Verbesserung der Produktqualität bei. Das gesiebte und entgaste



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

Material gelangt anschließend zur Granuliereinheit. Am Ausstoß des Extruders wird die Schmelze durch eine Lochplatte gepresst und mittels Wasserring-, Strang- oder Unterwassergranulierung in die typische Form (Linsen, Zylinder, Kugel) gebracht.¹⁸

Beispiele für Aufarbeitungsprodukte sind in der nachfolgenden Abbildung 9 dargestellt.



Abbildung 9: Aufarbeitungsprodukte des mechanischen Recyclings (links: Mahlgut; Mitte: Agglomerat; rechts: Regranulat)¹⁹

Sowohl die mechanische Behandlung wie auch die thermische Belastung, denen die Materialien im Zuge der Behandlungsschritte (Mahlen, Pressen, Trocknen, Extrudieren, Umschmelzen etc.) ausgesetzt werden, führen zu einem gewissen Anteil zu einer Schädigung der Polymerketten. Sie verkürzen bzw. verzweigen sich, so dass ein Alterungsprozess einsetzt, der die Materialeigenschaften dauerhaft verändert²⁰. Somit führt diese Art der Verwertung dazu, dass ein vollständig geschlossener Kreislauf prinzipiell nicht möglich ist, sondern ein gewisser Anteil der Kunststoffe einem Downcycling zugeführt und schließlich aus dem Kreislauf ausgeschleust werden muss, wenn nicht mit einem anderen Verfahren ein Upcycling gelingt.

5.1.1.2 Vor- und Nachteile des Verfahrens

Die Vor- und Nachteile des Verfahrens werden in der nachfolgenden Tabelle gegenübergestellt.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile mechanischer Recyclingverfahren

Verfahren: Trocken- und nassmechanische Aufbereitung	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Weitestgehender Erhalt der Polymerstruktur • Im Vergleich zu anderen Verfahren geringerer Ressourcenverbrauch • Bewährte Technik (Stand der Technik) • Relativ kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> • Schädigung der Polymerketten durch mechanische und thermische Behandlung (Mahlen, Pressen, Trocknen, Extrudieren, Umschmelzen etc.), dadurch keine unbegrenzte Anzahl von Recyclingdurchläufen möglich

¹⁸ Der Text wurde dem Abschlussbericht Umweltbundesamt (Hrsg.): „Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes“, Juni 2021, S. 73 - 77 entnommen.

¹⁹ Umweltbundesamt (Hrsg.): „Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes“, Juni 2021, S. 77

²⁰ Herklotz, Anne Maria: „Entwicklung eines teilkontinuierlichen Thermolyseverfahrens zum rohstofflichen Recycling von polyolefinischen Kunststoffabfällen in einer Rührkesselkaskade“, Dissertation, 20.07.2016



<ul style="list-style-type: none"> • Große Behandlungskapazitäten vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Reinheitsgrade notwendig • Fremdstoffe (andere Kunststoffe, Metalle, Füllstoffe, Verunreinigungen durch Produktreste etc.) verbleiben in mehr oder weniger großem Anteil im Aufbereitungsprodukt und verhindern so hohe Rezyklateanteile in der Neuware • Keine separate Ausschleusung von problematischen Inhaltsstoffen (z. B. Additive) möglich und damit Verschleppung in das Produkt • Vor allem Farbe und Geruch können die Einsetzbarkeit der Aufbereitungsprodukte einschränken • i. d. R. müssen die Aufarbeitungsprodukte mit geeigneten Additiven dem Anforderungsprofil des Kunden angepasst werden (sogenannte Kompatibilisierung) • kein Einsatz der wiedergewonnenen Kunststoffe für den Kontakt mit Lebensmitteln
--	---

5.1.1.3 Stand des Verfahrens

Die trocken- und nassmechanische Aufbereitung stellt, was die Kunststoffverwertung angeht, den Stand der Technik dar. Für die dort eingesetzten Behandlungsschritte wird zumeist auf altbekannte und bewährte Technik zurückgegriffen, so dass hier langjährige Erfahrungen bestehen. Damit können auch ökologische Bewertungen aufgrund einer recht guten Datenbasis vorgenommen werden. Die Weiterentwicklung der Sensorik (z. B. Nahinfrarottechnik) hat bereits die Sortenreinheit der abzutrennenden Kunststofffraktionen verbessert und ihr Vorantreiben sowie die Nutzung der Digitalisierung und elektronischen Datenverarbeitung (z. B. Einsatz künstlicher Intelligenz bei einer automatisierten Sortierung) stellen weitere Verbesserungspotenziale dar.

Die schon mehrfach zitierte, aktuelle Studie des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2021²¹ bescheinigt den mechanischen Aufbereitungsverfahren ein hochwertiges Recycling, wenn die verfügbare Technik eingesetzt wird. Allerdings „besteht jedoch vielfach eine erhebliche Diskrepanz zwischen dem Stand der Technik und dem Stand der Praxis“. Somit können allein mit der vollständigen Anwendung der verfügbaren Technik noch erhebliche Verbesserungen erzielt werden.

Darüber hinaus kommt die Studie zu dem Schluss, dass die Umsetzung dieser Verbesserungspotenziale – auch wenn sie zunächst einen zusätzlichen Ressourcenverbrauch mit sich bringen – auch aus ökologischer Sicht sehr sinnvoll sind. Die Ergebnisse sind in ihrer Aussage über alle in der Studie diskutierten Umweltwirkungskategorien (Gesundheitsrisiken durch Feinstaub, Krebsrisikopotenzial, Treibhauseffekt, fossiler kumulierter Energieaufwand, Versauerungspotenzial, terrestrische und aquatische Eutrophierung) gleichgerichtet. Die umweltpolitische Zielsetzung der verstärkten werkstofflichen Verwertung wird durch die Ergebnisse der Ökobilanzen gestärkt. Hierbei ist

²¹ Umweltbundesamt (Hrsg.): „Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes“, Juni 2021, S. 144 - 146



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

insbesondere die Verwertung mit der Zielrichtung Kunststoffgranulat gemeint. Der Nutzen und damit die erzielbaren Substitutionserfolge für die Herstellung von Agglomeraten, die zur Produktion einfacher dickwandiger Kunststoffprodukte, wie z. B. der Parkbank, genutzt werden können, sind deutlich geringer.

Allerdings listet die Studie folgende, weitere Faktoren zur insgesamten Verbesserung des Recyclings auf:

- Bisher fehlt teilweise die Bereitschaft der Hersteller von Kunststoffprodukten, bei der Herstellung zumindest in Anteilen auf sekundäre Rohstoffe im Sinne der Rezyklate zurückzugreifen. Es gibt keine objektive Notwendigkeit in der Industrie, sich mit dieser Frage ernsthaft zu beschäftigen oder sich gar über die Möglichkeiten und Rahmenbedingungen zu informieren.
- Dies gilt noch weit mehr für die Frage des Produktdesigns. Das Design eines Produktes/ einer Verpackung muss auf zahlreiche Anforderungen und Zielsetzungen ausgelegt werden. Die (umweltpolitischen) Rahmenbedingungen sind so gesetzt, dass eine recyclinggerechte Gestaltung des Produktes einen nur sehr geringen Stellenwert hat, wenn dieser Aspekt überhaupt in der Produktentwicklung eine Rolle spielt.
- Das System der Verwertung (Aufbereitung und Einsatz der Rezyklate) muss sich in seiner Ausrichtung und Philosophie deutlich umstellen. Vor dieser Herausforderung stehen nicht nur die Entsorger von Kunststoffabfällen, sondern alle Abfallbranchen. Die Abfallverwertung muss sich auf die Erfordernisse der Industrie, in diesem Falle die Kunststoff-verarbeitende Industrie, ausrichten. Dies ist im direkten Austausch zwischen Aufbereiter, der Regranulate herstellt, und Produzent und damit für den Einzelfall zu erreichen. Für den Aufbereiter ergibt sich im zweiten Schritt, dass er seine Prozesse auf dieses Produktionsziel ausrichten muss. Dies bedeutet eine Optimierung der Technik, aber auch eine Definition der Zusammensetzung und Eigenschaften der Materialien, die er zur Aufbereitung übernimmt. Damit sind die Spezifikationen beschrieben, die gegenüber dem vorgelagerten Akteur, dem Sortierer, kommuniziert werden müssen. Es müssen, in Abhängigkeit der technischen Möglichkeiten, Spezifikationen definiert werden, die die Lieferanten für die Anlieferung von Sortierfraktionen einhalten müssen, um den Verwertungserfolg nicht zu gefährden.

Eine Untergrenze der vorhandenen Behandlungskapazitäten für die mechanische Aufbereitung von Kunststoffabfällen lässt sich aus dem „*Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019*“²² ablesen. Demnach wurden rund 2,34 Mio. t an Kunststoffabfällen als Input in Recyclinganlagen in Deutschland behandelt. Das Statistische Bundesamt führte in der Fachserie 19 Reihe 1 zum Thema „Abfallentsorgung“ im Jahr 2017 (danach wurde die Berichtsserie eingestellt) auf, dass es allein für Sortieranlagen für gemischte Verpackungen einen Input von etwa 3,4 Mio. t gab²³.

5.1.2 Lösemittelbasierte Verfahren

5.1.2.1 Verfahrensbeschreibung

In manchen Veröffentlichungen werden die nachfolgend vorgestellten lösemittelbasierten Verfahren auch unter dem Oberbegriff „chemisches Recycling“ geführt. Sie unterscheiden sich, was die grundsätzlichen Verfahrensschritte angeht, nicht wesentlich von den anderen, dort unter dem Begriff

²² Lindner, C.; Schmitt, J.; Hein, J.: „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019“, Kurzfassung der Conversio Studie, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff 2020, S. 11

²³ Statistisches Bundesamt: Fachserie 19, Reihe 1, 2017, S. 119



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

„Solvolyse“ aufgeführten Verfahren. Der eigentliche Unterschied ist, dass bei den lösemittelbasierten Verfahren die Polymerstruktur bzw. die Kettenlänge der herauszulösenden Kunststoffe erhalten bleibt. Bei den anderen, unter die Solvolyse einsortierten Verfahren werden die Polymerstrukturen aufgebrochen und in Bestandteile (i. d. R. Monomere) zerlegt, die wieder nach Durchlaufen einer Polykondensation zu den gleichen Kunststoffen verarbeitet werden. Auch gibt es Unterschiede, was die Reaktionsbedingungen angeht. Da das Umweltbundesamt die lösemittelbasierten Verfahren dem werkstofflichen Recycling zuschlägt, wird diese Systematisierung übernommen.

Beim werkstofflichen lösemittelbasierten Verfahren werden Kunststoffe mit Hilfe von speziell angepassten Lösemitteln gezielt (selektiv) in Lösung gebracht. Es folgt ein mehrstufiger Prozess zur Trennung von flüssigen und festen Bestandteilen. Dabei können Fremdkunststoffe, Additive oder ggf. enthaltene Schadstoffe abgetrennt werden. Anschließend wird der Zielkunststoff ausgefällt, vom Lösemittel befreit und getrocknet. Zuletzt werden die zurückgewonnenen Kunststoffe zu Regranulaten extrudiert. Mit diesem physikalischen Verfahren bleiben die Polymerstrukturen bzw. die Kettenlängen der eingebrachten Kunststoffe erhalten.



Abbildung 10: Verfahrensschema des lösemittelbasierten Recyclings

Anders als beim mechanischen Recycling lassen sich beim lösemittelbasierten Verfahren Kunststoffe auch aus Verbunden oder schadstoffhaltigen Kunststoffabfällen in sehr reiner Qualität zurückgewinnen. Bisher sind diese Verfahren in Deutschland nur in begrenztem Umfang verfügbar.

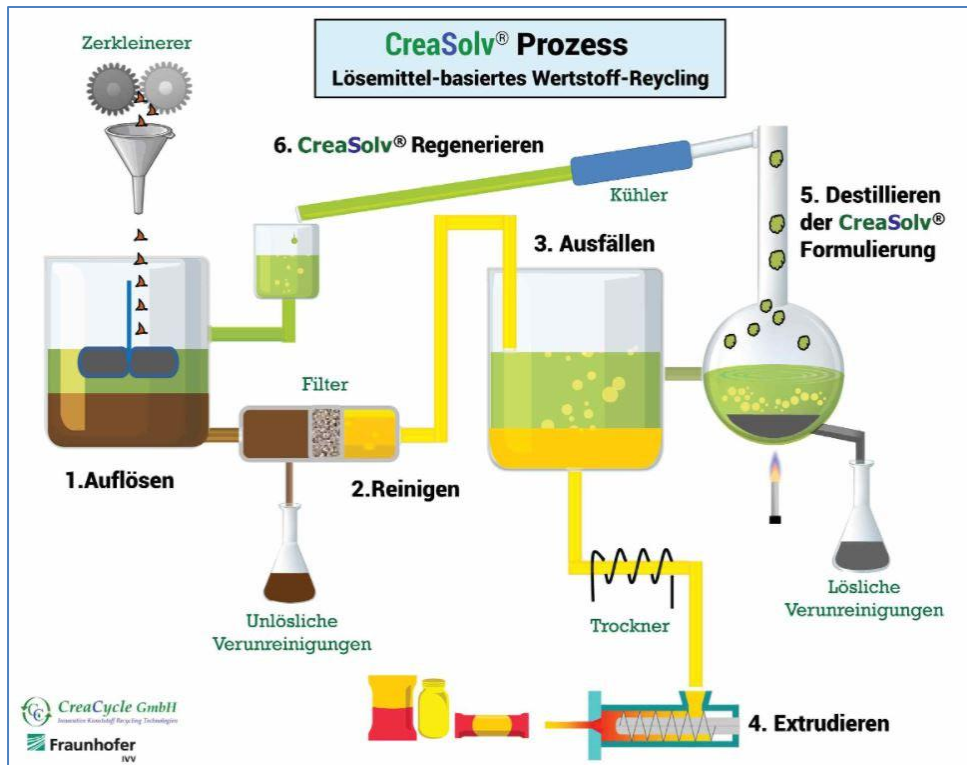


Abbildung 11: CreaSolv®-Prozess ²⁴

Umgesetzt wurden sie in den Verfahren Vinyloop, Newcycling® und CreaSolv®. Dabei wird das Newcycling®-Verfahren auf Multilayerfolien bestehend aus Polyethylen (PE) und Polyamid (PA) angewendet bzw. das CreaSolv®-Verfahren derzeit auf expandiertes Polystyrol (= Styropor) sowie auf PE-Folien. Das Vinyloop-Verfahren ist zur Aufarbeitung von PVC-Abfällen eingesetzt worden. Als ein Beispiel für den Verfahrensablauf ist darüber der vom Fraunhofer Institut entwickelte CreaSolv®-Prozess dargestellt.

5.1.2.2 Vor- und Nachteile des Verfahrens

Die Vor- und Nachteile des Verfahrens werden in der nachfolgenden Tabelle gegenübergestellt.

Tabelle 3: Vor- und Nachteile lösemittelbasierter Verfahren

Verfahren: Lösemittelbasierte Verfahren	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Weitestgehender Erhalt der Polymerstruktur • Auch stärker verschmutztes Inputmaterial einsetzbar • Abtrennung von problematischen Inhaltsstoffen (z. B. Additive) sowie von Fremdstoffen (andere Kunststoffe, Metalle, 	<ul style="list-style-type: none"> • Schädigung der Polymerketten durch mechanische und thermische Behandlung (Extrudieren, Umschmelzen etc.), dadurch keine unbegrenzte Anzahl von Recyclingdurchläufen möglich • Nur jeweils für bestimmte Kunststoffarten einsetzbar, weil das Lösemittel sowie die

²⁴ CreaCycle GmbH: https://www.creacycle.de/images/stories/2021.03.10_CreaSolv_Prozess_D.jpg



<p>Füllstoffe, Verunreinigungen durch Produktreste etc.) nahezu vollständig möglich</p> <ul style="list-style-type: none">• Sehr hohe Reinheitsgrade der wiedergewonnenen Kunststoffe möglich (annähernd Neuwarequalität)	<p>Prozessführung auf diese abgestimmt werden muss</p> <ul style="list-style-type: none">• Kein Stand der Technik ²⁵• Hoher Aufwand ²⁵• Wirtschaftlichkeit aktuell fraglich ²⁵
---	---

5.1.2.3 Stand des Verfahrens

Das Vinyloop-Verfahren ist das „älteste“ der drei aufgeführten Verfahren. Es ist von der Firma Solvay in einer Anlage im Jahre 2002 umgesetzt worden. Allerdings ist die Anlage im italienischen Ferrara mit 15.000 t Jahreskapazität im Jahre 2018 wieder außer Betrieb genommen worden. Als Grund wurde angegeben, dass in weichen PVC-Mischungen aus lange zurückliegenden Produktionsjahren noch substantielle Mengen von Phthalaten enthalten sind, die auch mit dem Vinyloop-Verfahren nicht wirtschaftlich abzutrennen waren ^{26 27}. Für die beiden anderen Verfahren sind Pilotanlagen erst nach 2010 entstanden.

Damit sind alle diese Verfahren kein Stand der Technik.

Wie die Einstellung des Vinyloop-Verfahrens zeigt, war die Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren fraglich. Für das Vinyloop-Verfahren wurden im Jahre 2002 Kosten des Verfahrens zwischen 250 € und 450 € pro t PVC-Abfall genannt ²⁸.

Für das CreaSolv[®]-Verfahren ist seit 2018 die erste Anlage, die täglich bis zu drei Tonnen Verpackungsabfall recyceln kann, bei der Firma Unilever in Betrieb ²⁹.

Die AKP AG aus Merseburg entwickelte gemeinsam mit weiteren Investoren im Jahr 2008 das Newcycling[®]-Verfahren. Der Testbetrieb der Anlage startete im Jahre 2013. Ab 2016 wurden nach Firmenangaben erfolgreich erste pre-kommerzielle Mengen an Polyethylen und Polyamid im industriellen Maßstab produziert. Danach erfolgte ein Ausbau der Anlage, so dass ab 2018 die Kapazität der lösemittelbasierten Anlage eine Verarbeitung von 8.000 t Input im Jahr zulässt ³⁰.

5.2 Chemisches Recycling

Das chemische Recycling wird auch oft als rohstoffliches Recycling bezeichnet. Es zielt, anders als das werkstoffliche oder mechanische Recycling, auf die Rückgewinnung der Bausteine des Werkstoffes ab. Durch die Einwirkung von Wärme, Katalysatoren, Lösemittel und Wasserstoff sowie in teiloxidativer Atmosphäre werden die Polymerketten in kürzere Kohlenwasserstoffe zerteilt. Somit lassen sich Monomere, petrochemische Grundstoffe und Synthesegas aus Abfallströmen gewinnen, wobei die Einteilung je nach einwirkender Triebkraft zur Kettenspaltung erfolgt. Man unterscheidet hierbei zwischen

²⁵ Quicker, P.: „Rohstoffliche Kunststoffverwertung: Kritische Würdigung potentieller Ansätze“, Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, 03.02.2020 – 04.02.2020

²⁶ ingenieur.de: „PVC - fast wie neu“, 08.03.2002

²⁷ Kunststoff.web.de: „VinyLoop: PVC-Recyclingbetrieb ist eingestellt“, 04.07.2018

²⁸ ingenieur.de: „PVC - fast wie neu“, 08.03.2002

²⁹ Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung: <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/recycling-umwelt/optimierung-kunststoffrecyclinganlagen.html>

³⁰ APK AG: <https://www.apk-ag.de/ueber-uns/historie/>



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

- Hydrocracking,
- katalytischem Cracken oder thermokatalytischer Konversion,
- Pyrolyse oder thermischer Konversion,
- Solvolyse oder chemischer Depolymerisation und
- Gasifizierung oder Vergasung,

die jeweils absteigende Ansprüche an den Reinheitsgrad der Einsatzfraktionen stellen ³¹.

Unter das rohstoffliche Recycling von Kunststoffen wird auch der Einsatz von Kunststoffen als Reduktionsmittel im Hochofenprozess gefasst. Dabei wird Eisenoxid zu Eisen reduziert und die eingesetzten Kunststoffe vollständig zu CO₂ oxidiert. Die dabei freigesetzte Wärme wird als zusätzliche Energiequelle für den Hochofenprozess genutzt. Eine Rückgewinnung des CO₂ und Verwendung für die Erzeugung neuer Kunststoffe erfolgt nicht. Daher wird dieses Verfahren hier nicht weiter beschrieben. Es hatte aber mengenmäßig – zumindest bis zum Jahre 2005 – den größten Anteil des rohstofflichen Recyclings von Kunststoffen in Deutschland mit etwa 300.000 t pro Jahr ausgemacht ³².

5.2.1 Pyrolyse

Die Pyrolyse ist ein schon seit Jahrhunderten, beispielsweise bei der Holzkohleherstellung oder der Verkokung von Steinkohle, erprobtes Verfahren, bei dem unter Ausschluss von Sauerstoff organische Materialien thermisch zersetzt werden. Dabei entstehen, in Abhängigkeit vom Einsatzstoff, sowohl gasförmige, flüssige als auch feste Reaktionsprodukte.

Der Einsatz von gemischten Siedlungsabfällen in der Pyrolyse hat sich aufgrund der Heterogenität der Einsatzstoffe und der daraus resultierenden minderwertigen Produkte am Ende des Prozesses nicht durchgesetzt. Die Pyrolyse von Kunststoffabfällen mit dem Ziel des Recyclings ist beim Einsatz von homogeneren Kunststofffraktionen eher erfolgversprechend ³³. Inwieweit stärker verschmutzte, gemischte Kunststofffraktionen eingesetzt werden können, ist bisher nicht abschließend geklärt.

Die Produkte der Pyrolyse sind Öle und Wachse, die ggf. nach weiteren Aufreinigungsschritten als Grundstoff in der chemischen Industrie eingesetzt werden können. ³⁴

5.2.1.1 Verfahrensbeschreibung

Abfallkunststoffe können durch das Verweilen bei einer Temperatur über 300 °C unter Sauerstoffabschluss bei der Pyrolyse zu kürzeren Kohlenwasserstoffbestandteilen zerteilt werden. Dieser beim Recycling bewusst induzierte thermische Zerfall von Kunststoffen zeichnet sich durch ein breites Produktspektrum aus, welches durch den eingesetzten Ausgangsstoff, die Prozessbedingungen und den Reaktortyp, beziehungsweise das grundsätzliche Verfahrensdesign, bestimmt wird. Dementsprechend ist auch die Verwendung der Produkte vielseitig und reicht über die Verarbeitung in einer konventionellen Raffinerie hin zur Erzeugung von Monomereinheiten für die Polymerisation

³¹ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 50

³² Lindner, C.; Schmitt, J.; Hein, J.: „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019“, Kurzfassung der Conversio Studie, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff 2020, S. 21

³³ Quicker, P.; Neuerburg, F.; Noël, Y.; Huras, A.: Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen, Texte 17/2017, Dessau-Roßlau, 2017

³⁴ Text entnommen aus Hrsg. Umweltbundesamt: „Chemisches Recycling“, Juli 2020, S. 9



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

bis zu Grundchemikalien für die Petrochemie und Treibstoffen. Bei einigen Kunststoffsorten, wie z.B. Polystyrol, wird auch bei der Pyrolyse von einer Depolymerisation gesprochen, da das Polymer bei gewissen Bedingungen durch die gegenläufige Reaktion der Polymerisation in seine Monomere zerfällt. Bei den meisten Massenkunststoffen wird aber ein Gemisch aus unterschiedlich langen Kohlenwasserstoffketten gewonnen.

Die thermische Zersetzung von Kunststoffen läuft bei hohen Temperaturen ab und die Unterteilung der Pyrolyse erfolgt nach der Prozesstemperatur, wobei zwischen langsamer Pyrolyse bei unter 400 °C, moderater Pyrolyse von 400 °C bis 600 °C und Schnellpyrolyse über 600 °C differenziert wird. Dementsprechend muss die Verweilzeit angepasst werden, welche von Sekunden bis zu vielen Stunden variieren kann. Die Temperatur beeinflusst nicht nur die notwendige Verweildauer des Kunststoffs bis zum vollständigen Umsatz, sondern auch die Produktausbeuten. Grundsätzlich gilt die Regel, dass, je höher die Temperatur im Reaktor ist, desto leichtere Produkte (z. B. Gas und Koks) entstehen, wobei bei niedrigeren Temperaturen mehr Wachse und schwerere Öle entstehen. Der Prozessdruck wird meist unter atmosphärischen Bedingungen gehalten. Der Druckeinfluss ist bisher nicht vollends geklärt, da mehrere Arbeiten zu unterschiedlichen Erkenntnissen kommen. Allerdings hängt dies auch vom Reaktortyp ab, da zum Beispiel der Druck auch Auswirkung auf den Gasphasenanteil hat und dadurch die Verweilzeit signifikant beeinflusst.

Bei der Pyrolyse muss Energie zugeführt werden, da es sich um einen endothermen Prozess handelt. Der thermische Energieeintrag stellt eine der größten Herausforderungen des thermochemischen Kunststoffrecyclings dar, da Kunststoff eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweist und die Schmelze sehr zähflüssig ist. Aus diesem Grund verfolgt man unterschiedliche Lösungsansätze, wodurch sich unterschiedliche Anlagenkonzepte und Reaktortypen etabliert haben.

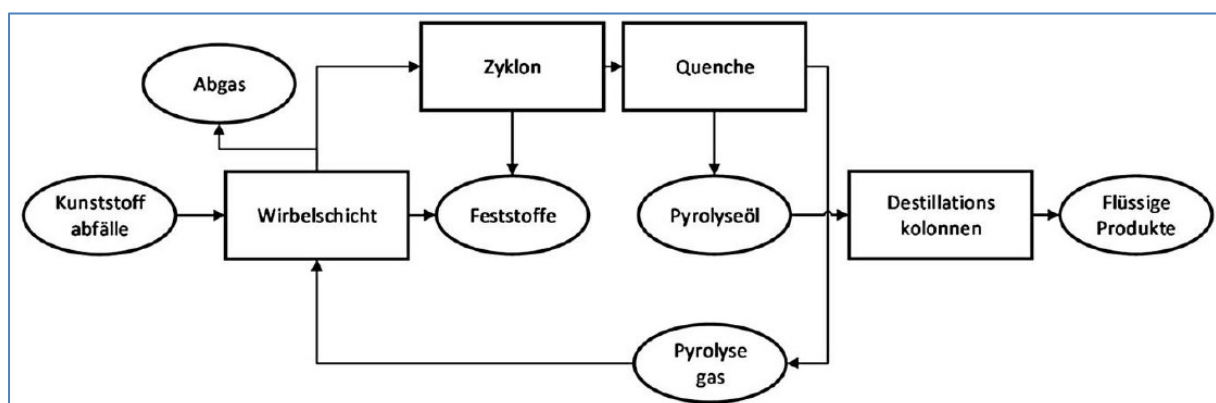


Abbildung 12: Schematisches Blockfließbild des Hamburger Verfahrens ³⁵

Eine einfache und stabile Möglichkeit bieten Drehrohröfen, wie beispielsweise der Berliner Prozess für Kunststoffe aus Elektro- und Elektronikabfällen, wohingegen auch reaktive Extrusionsanlagen in Frage kommen. Prozesstechnisch ist es jedoch vorteilhaft, die Oberfläche des Kunststoffs möglichst zu vergrößern, um den Wärmeübergang sowie den Stofftransport zu verbessern und so den Kunststoff schnell zu pyrolysieren. Dazu werden Wirbelschichtreaktoren verwendet, wie zum Beispiel im Hamburger Verfahren, welches auch katalytisch betrieben werden kann. In der chemischen Industrie

³⁵ Scheirs, J., Kaminsky, W.: „Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: Converting waste plastics into diesel and other fuels“, Wiley series in polymer science. J. Wiley & Sons, Chichester, UK, Hoboken, NJ, 2006



ist vermehrt der konventionelle Rührkessel in Verwendung. Als Beispiel dafür ist das BASF-Verfahren anzugeben.

Das sogenannte Hamburger Verfahren verwendet Quarzsand, um mit einem von unten kommenden Stickstoff- oder anderem Inertgasstrom ein Wirbelbett zu bilden. Der Kunststoff wird über eine Schnecke in den Reaktionsraum der Wirbelschicht eingebracht, welche bei über 400 °C betrieben wird. Je nach Art des Kunststoffs und der Reaktionstemperatur werden dabei aus dem Altkunststoff Monomere wie Styrol oder Methylmethacrylat, Wachse oder Aromaten wie Xylol, Benzol und Toluol gewonnen.

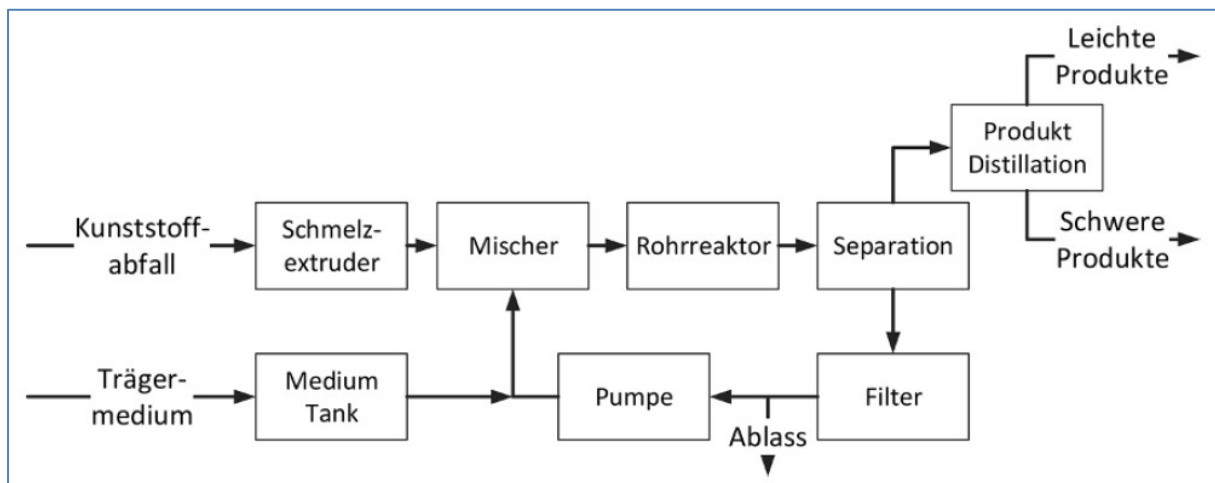


Abbildung 13: Schematisches Blockfließbild des ReOil®-Prozesses³⁶

Ein anderes Beispiel für einen Pyrolyseprozess ist das ReOil®-Verfahren. Dabei fungiert ein flüssiges, hochsiedendes Raffinerienebenprodukt als Lösungsmittel, um die Viskosität und Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffschmelze zu verbessern. Der Kunststoff wird in einem Extruder in die Schmelzphase übergeführt und so einem Trägermediumkreislauf beigemischt. Diese Mischung wird in einem Rohrreaktor auf rund 400 °C erhitzt und der Kunststoff in kurzkettenige Kohlenwasserstoffe gespalten, welche anschließend destillativ entfernt werden. Schwere Produktanteile, unkonvertierter Kunststoff und das Trägermedium verbleiben im Kreislauf und werden mit einer Pumpe erneut zur Mischstelle geführt. Die Hauptprodukte sind flüssige Kohlenwasserstoffe unterschiedlicher Siedecharakteristik, welche als synthetisches Rohöl direkt in der Raffinerie weiterverarbeitet werden. Es entstehen auch geringe Anteile an Nebenprodukten wie Gas und Koks.³⁷

5.2.1.2 Vor- und Nachteile des Verfahrens

Die Vor- und Nachteile des Verfahrens werden in der nachfolgenden Tabelle gegenübergestellt.

³⁶ Schubert, T., Lehner, M., Karner, T., Hofer, W., Lechleitner, A.: „Influence of reaction pressure on co-pyrolysis of LDPE and a heavy petroleum fraction“, Fuel Processing Technology 193, 2019. S. 204–211

³⁷ Text entnommen und leicht angepasst aus Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 47–60 (2020), S. 50, 53, 54, 57



Tabelle 4: Vor- und Nachteile der Pyrolyse

Verfahren: Pyrolyse	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> Breites Kunststoffspektrum als Input einsetzbar (allerdings können bei bestimmten Kunststoffen, wie z. B. PVC, Säuren im Prozess entstehen, die entweder im Prozess abgetrennt werden müssen oder der Eintrag dieser Kunststoffe im Input vermieden werden muss)³⁹ Besonders geeignet für die in großen Mengen anfallenden Polyolefine (PE, PP)³⁹ Stärker verschmutztes Inputmaterial einsetzbar, da eine Zersetzung von problematischen Inhaltsstoffen (z. B. Additive) oder von Verunreinigungen durch Produktreste sowie eine Abtrennung von Fremdstoffen (z. B. Metalle, Verunreinigungen durch Produktreste etc.) nahezu vollständig möglich ist.³⁹ Einfaches Anlagendesign³⁹ Die entstehenden Produkte (Pyrolyseöle, -wachse) lassen sich wieder zu den verschiedensten Kunststoffen aufarbeiten. Dadurch auch ein Up-Cycling möglich. 	<ul style="list-style-type: none"> Erzeugung von qualitativ minderwertigen Vorprodukten, die noch zu dem gewünschten Kunststoff oder anderen Endprodukten aufgearbeitet werden müssen³⁸ Da die Pyrolyse ein endothermer Prozess ist, muss Energie zugeführt werden.³⁹ Verkokungsneigung³⁹ Kein Stand der Technik³⁸ Hoher Aufwand³⁸ Wirtschaftlichkeit aktuell fraglich³⁸

5.2.1.3 Stand des Verfahrens

Der Literatur sind weltweit nur wenige Anlagen zu entnehmen, die sich in einem kommerziellen oder industriellen Stadium befinden³⁷. Darüber hinaus weisen die bekannten Daten bis auf eine Anlage nur geringe Kapazitäten aus. Der nachfolgenden Tabelle sind die Anlagendaten bis 2019 zu entnehmen.

Tabelle 5: Kommerzielle Anlagen zur Pyrolyse³⁹

Prozess	Unternehmen	Einsatz	Status	Kapazität [t/a]
BlueAlp™ Technology	BlueAlp	Polyolefine	Kommerzielles Patent	20.000
ReOil®	OMV	Polyolefine	Pilotanlage	800

³⁸ Quicker, P.: „Rohstoffliche Kunststoffverwertung: Kritische Würdigung potentieller Ansätze“, Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, 03.02.2020 – 04.02.2020

³⁹ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 54, 58



Thermal Anaerobic Conversion	Plastic Energy	Kunststoffabfälle	-	200.000 (ab 2020)
Vadxx Prozess	Vadxx	Kunststoffabfälle	Kommerzielle Anlage	20.000
Clariter's chemical process	Clariter	PE, PP, PS	Industrielle Anlage	10.000
Mehrere Prozesse (Pyrolyse und Vergasung)	Klean Industries	Kunststoffabfälle	Kommerzielle Anlage	
RT7000	Recycling Technologies	Kunststoffabfälle		9.000

5.2.2 Katalytisches Cracking

Eine weitere Möglichkeit, Kunststoffabfälle in kürzere Kohlenwasserstoffe zu Recyclingzwecken zu konvertieren und Polymerketten zu brechen, ist die thermische Spaltung in der Anwesenheit eines katalytisch wirkenden Stoffes.

Im Gegensatz zur rein thermischen Pyrolyse hat die katalytische Umsetzung mehrere Vorteile: Die Aktivierungsenergie der Crackingreaktionen wird durch die Anwesenheit des Katalysators verringert, dadurch kann die Temperatur niedriger gehalten werden. Bei gleichbleibenden Bedingungen wird die Reaktion durch den Katalysator beschleunigt. Dadurch ergeben sich Energieeinsparungen und kleinere Reaktoren, was wirtschaftlich vorteilhaft sein kann.

Nachteilig ist, dass eine Abtrennung und Rückführung sowie eventuell eine Regeneration des Katalysators nötig sind. Dies bedeutet einen höheren apparativen und betrieblichen Aufwand für die Katalysatorbehandlung.

Im Vergleich zur Pyrolyse entstehen mehr verzweigte, ringförmige und aromatische Verbindungen, die je nach Verwertung einen höheren Wert darstellen.⁴⁰

Das katalytische Cracken wird schon seit langem zur Erzeugung von Gasen, Flüssiggasen und Benzinkomponenten aus dem schweren Vakuumdestillat einer Raffinerie eingesetzt. Damit erzeugt man kürzerkettige Kohlenwasserstoffe, die man für die Herstellung von Benzin sowie Flugbenzin benötigt.

5.2.2.1 Verfahrensbeschreibung

Die thermokatalytischen Prozesse werden in heterogene und homogene Systeme eingeteilt. Heterogene Katalysatoren sind Feststoffe, welche beispielsweise in einem Festbett- oder Wirbelschichtreaktor verwendet werden können. Vielverwendete Katalysatoren sind zum Beispiel

⁴⁰ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 54, 58



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

Zeolithe, es werden aber auch andere Stoffe wie Metalloxide, Reinmetalle oder metallbeschichtete Kohle eingesetzt. Homogene Katalysatoren sind weniger weit verbreitet und basieren meist auf ionischen Flüssigkeiten.

Der typische Temperaturbereich thermokatalytischer Prozesse liegt zwischen 300 °C und 900 °C, je nach eingesetztem Reaktortyp, Druck und gewünschten Produkten. Dementsprechend muss die Verweilzeit der Reaktionstemperatur angepasst werden, sodass diese von Millisekunden bis zu Stunden betragen kann. Neben den Verfahrensbedingungen, die bei der Pyrolyse als Stellschrauben für die Produkte dienen, ist der Katalysator ein weiterer Prozessparameter, durch den das Produktspektrum beeinflusst werden kann ⁴¹. Wie bei der Pyrolyse wird der Prozess unter Sauerstoffabschluss durchgeführt.

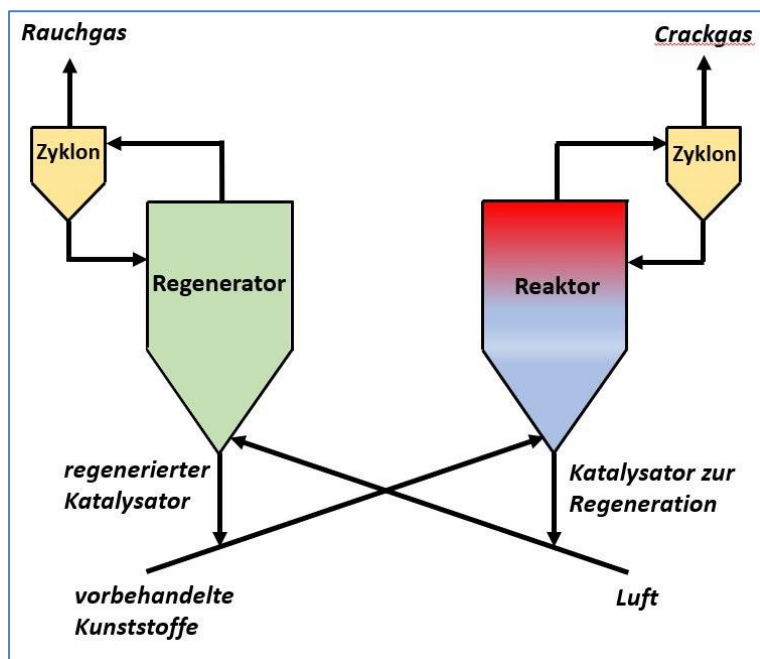


Abbildung 14: Verfahrensschema beim katalytischen Cracken

Bei der Einflussnahme auf Ausbeute und Spektrum spielt nicht nur das Katalysatormaterial und dessen Selektivität eine Rolle, auch die Oberfläche bzw. Porenstruktur haben große Auswirkungen. Die Verwendung eines Katalysators setzt jedoch auf der anderen Seite auch eine höhere Qualität des verarbeitbaren Einsatzes voraus. Durch spezielle Kunststoffsorten und Verunreinigungen können bestimmte Stoffe, wie Stickstoff oder Schwefel, in den Prozess gelangen, welche als Katalysatorgifte fungieren können und den Umsatz durch Katalysatorinaktivierung mindern. Des Weiteren können auch andere Störstoffe, wie mineralische Füllstoffe oder sich bildender Koks, den Katalysator durch Ablagerungen oder chemische Reaktionen deaktivieren. Dies kann durch eine geeignete Regeneration mit zusätzlichen Aggregaten rückgängig gemacht werden (s. Abbildung 14).

Nicht zuletzt muss auch darauf geachtet werden, dass Katalysatorrückstände gänzlich aus dem Produkt entfernt werden, was zusätzlichen apparativen Aufwand bedeutet und die Gefahr erhöht, vor allem

⁴¹ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 47–60 (2020), S. 54



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

feinen Katalysatorabrieb im Produkt wiederzufinden⁴². Das Crackgas erfährt anschließend noch eine Nachbehandlung (z. B. Destillation), um die verschiedenen Crackprodukte voneinander zu trennen.

Ein Beispiel für ein industrielles, thermokatalytisches Recyclingverfahren ist der Thermofuel-Prozess, in dem die Reaktion in einem Konverterturm stattfindet, welcher nickellegierte Platten als katalytische Einbauten besitzt.

Auch das Hamburger Verfahren (s. Beschreibung im Kapitel 5.2.1.1) wird für das katalytische Cracken eingesetzt, in dem katalytisch aktive Materialien wie Zeolithe als Wirbelbettbestandteil verwendet werden. Jedoch wurden die Projekte wegen Problemen bei der Maßstabsvergrößerung der Wirbelschicht beendet.

Hinweise auf andere Prozesse und aktuelle Entwicklungen weiterer Verfahren lassen sich der Literatur entnehmen⁴².

5.2.2.2 Vor- und Nachteile des Verfahrens

Die Vor- und Nachteile des Verfahrens werden in der nachfolgenden Tabelle gegenübergestellt.

Tabelle 6: Vor- und Nachteile des katalytischen Crackings

Verfahren: Katalytisches Cracking	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• Breites Spektrum der einzusetzenden Kunststoffe möglich (mit eventueller Einschränkung durch die Verwendung bestimmter Katalysatoren)• Geringerer Wärmebedarf durch Katalysator• Abtrennung/ Eliminierung von problematischen Inhaltsstoffen (z. B. Additive) sowie von Fremdstoffen (Metalle, Füllstoffe, Verunreinigungen durch Produktreste etc.) nahezu vollständig möglich• Breite Anwendung der Produkte• Produktspektrum teilweise steuerbar	<ul style="list-style-type: none">• Hoher Energieaufwand notwendig• Zusätzlicher Aufwand durch Einsatz von Katalysatoren• Katalysator empfindlich gegenüber speziellen Stoffen wie Stickstoff oder Schwefel⁴³• Zum Ausschluss einer Vergiftung des Katalysators sind eventuell die dafür verantwortlichen Kunststoffe vorab abzutrennen• Katalysatorabtrennung prozesstechnisch aufwendig⁴³• Verkokungsneigung⁴³• Qualitativ minderwertige Produkte, die noch sehr aufwändig aufbereitet werden müssen⁴⁴• Kein Stand der Technik⁴⁴• Wirtschaftlichkeit aktuell fraglich⁴⁴

⁴² Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 54

⁴³ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 57, 58

⁴⁴ Quicker, P.: „Rohstoffliche Kunststoffverwertung: Kritische Würdigung potentieller Ansätze“, Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, Berlin, 03.02.2020 – 04.02.2020



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

5.2.2.3 Stand des Verfahrens

Obwohl das katalytische Cracken in der Erdölraffination schon seit langem angewendet wird, sind der Literatur weltweit nur wenige Anlagen zu entnehmen, die Kunststoffabfälle verarbeiten und sich in einem kommerziellen Stadium befinden⁴⁵. Darüber hinaus weisen die bekannten Daten nur geringe Kapazitäten aus. So kommt die in Dänemark liegende Anlage der Firma Quantafuel, an der sich auch die BASF beteiligt hat, auf eine Kapazität von 18.000 t pro Jahr. Der nachfolgenden Tabelle sind die Anlagendaten bis zum Jahre 2019 zu entnehmen.

Tabelle 7: Kommerzielle Anlagen zum katalytischen Cracken⁴⁵

Prozess	Unternehmen	Einsatz	Status	Kapazität [t/a]
Cassandra Oil's technology	Cassandra Oil	Reifen, Kunststoffabfall ohne PVC	Kommerzielles Patent	-
DeFuel	Demont	Kunststoffabfälle	-	-
GreenMantra Technologies	GreenMantra	Polyolefine	-	-
Quantafuel Prozess	Quantafuel	Kunststoffabfälle	Kommerzielle Anlage	18.000

5.2.3 Hydrocracking

Auch das Hydrocracking ist – wie das katalytische Cracking – eine Sonderform der Pyrolyse. Allerdings erfolgt dieses Mal das Cracking unter dem Beisein von Wasserstoff, was dem Prozess seinen Namen gibt, und oft auch eines Katalysators.

Hydrocracker sind schon lange in der Erdölraffination im Einsatz, um schwefel- und stickstoffarme Dieselkraftstoffe herzustellen bzw. um Schweröle aufzuarbeiten. Im Jahr 2001 waren weltweit über 150 Hydrocracker mit einer Kapazität von mehr als 500.000 t pro Tag (!) installiert⁴⁶.

5.2.3.1 Verfahrensbeschreibung

Wie in den zuvor genannten Prozessen werden die Kunststoffketten erhöhten Temperaturen ausgesetzt, um Bindungen zu spalten. Dabei wird noch zusätzlich Wasserstoff unter hohen Drücken, oft in Anwesenheit eines biofunktionellen Katalysators, zur Verfügung gestellt. Der Katalysator besteht aus Zeolithen (Aluminiumsilikaten) und darauf aufgebracht Metallen (z. B. Nickel, Molybdän, Wolfram bzw. Kombinationen von diesen). Temperatur, Druck und Katalysator unterbinden die Bildung von Mehrfachbindungen zwischen den Kohlenstoffatomen, so dass somit hauptsächlich Alkane (= gesättigte Kohlenwasserstoffe) und wenig Alkene und Aromaten im Produkt gebildet und dadurch höhere Produktqualitäten und stabilere Verbindungen erreicht werden. Allerdings wird dieser Vorteil mit dem Nachteil erkauft, dass die Polymerisationsneigung der gesättigten Kohlenwasserstoffe

⁴⁵ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 57, 58

⁴⁶ s. Wikipedia: „Hydrocracken“ vom 07.02.2022



zur erneuten Kunststoffsynthese vermindert ist. Der Katalysator hat zwei Aufgaben: Zum einen sorgt er für die Aufspaltung der Molekülketten (diesen Part übernehmen die Zeolithe). Zum anderen bewirkt er die Hydrierung (Bindung von zusätzlichen Wasserstoffatomen an die Kohlenstoffatome), was auf die Wirkung der aufgebrachtten Metalle zurückzuführen ist. Die Zersetzungsreaktionen laufen wie beim thermokatalytischen Cracken bei tieferen Temperaturen als bei einer alleinigen Pyrolyse ab. Als optimale Bedingungen werden für einen bifunktionellen Katalysator 400 °C, 20 bis 60 bar und eine Verweilzeit von unter 60 Minuten vorgeschlagen. Der Wärmebedarf ist nicht nur durch die niedrigen Temperaturen beim Hydrocracking vermindert, sondern auch deshalb, weil die Hydrierung exotherm vonstattengeht und die freiwerdende Wärme für die Spaltung der Polymerketten verwendet werden kann.⁴⁷

Ein Beispiel für ein kommerzielles Hydrocracking-Verfahren ist das RWE-Verfahren. Es stellt eine „langsame Pyrolyse“ mit anschließender Hydrierung dar. Dagegen bedienen sich der Hiedrierwerke-Prozess, der Freiberg-Prozess, der Böhlen-Prozess und das ITC-Verfahren einer simultanen Wasserstoffzufuhr und thermokatalytischen Spaltung für unterschiedliche Kunststoffabfallfraktionen. Ein interessantes, zweistufiges Verfahren stellt der Veba- bzw. VCC-Prozess dar, der ursprünglich zum Einsatz für Kohle entwickelt, jedoch kurz vor der Jahrtausendwende für Vakuumrückstand und Kunststoffabfälle adaptiert wurde. Dabei erfolgte die Mischung von Vakuumgasöl mit den Kunststoffabfällen, die in einem Kreislauf bei milden Bedingungen von 400 °C und atmosphärischem Druck thermisch crackten. Die Produkte wurden anschließend aus dem Kreislauf entfernt und hydriert. 1999 erfolgte die Realisierung dieses Prozesses in einer großtechnischen Anlage, welche aber stillgelegt wurde, da sie zum damaligen Zeitpunkt gegen die energetische Verwertung nicht wettbewerbsfähig war⁴⁷.

5.2.3.2 Vor- und Nachteile des Verfahrens

Die Vor- und Nachteile des Verfahrens werden in der nachfolgenden Tabelle gegenübergestellt.

Tabelle 8: Vor- und Nachteile des Hydrocrackings

Verfahren: Hydrocracking	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Breites Spektrum der einzusetzenden Kunststoffe möglich (mit eventueller Einschränkung durch die Verwendung bestimmter Katalysatoren) • Geringere Koksbildung durch Wasserstoff⁴⁸ • Geringerer Wärmebedarf durch exotherme Hydrierung und den Einsatz eines Katalysators⁴⁸ • Stabilere, gesättigte Produkte⁴⁸ 	<ul style="list-style-type: none"> • Energiebedarf zur Wasserstoffbereitstellung notwendig⁴⁸ • Zusätzlicher Aufwand durch Einsatz von Katalysatoren

⁴⁷ Text entnommen und angepasst aus Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 55

⁴⁸ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 57



<ul style="list-style-type: none"> • Abtrennung/ Eliminierung von problematischen Inhaltsstoffen (z. B. Additive) sowie von Fremdstoffen (Metalle, Füllstoffe, Verunreinigungen durch Produktreste etc.) nahezu vollständig möglich • Breite Anwendung der Produkte • Produktspektrum teilweise steuerbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Katalysator empfindlich gegenüber speziellen Stoffen wie Stickstoff oder Schwefel ⁴⁹ • Polymerisationsneigung der gesättigten Produkte geringer ⁴⁹ • Zum Ausschluss einer Vergiftung des Katalysators sind eventuell die dafür verantwortlichen Kunststoffe vorab abzutrennen • Komplexe Anlagentechnik ⁴⁹ • Hohe Kosten für den bifunktionalen Katalysator ⁴⁹ • Qualitativ minderwertige Produkte, die noch aufwändig aufbereitet werden müssen ⁵⁰ • Kein Stand der Technik ⁵⁰ • Wirtschaftlichkeit aktuell fraglich ⁵⁰
--	--

5.2.3.3 Stand des Verfahrens

Wie unter 5.2.3.1 beschrieben, wird das Hydrocracken in großer Kapazität in der Erdölverarbeitung eingesetzt. Dennoch gibt es weltweit nur sehr wenige Anlagen, die Kunststoffabfälle verarbeiten und sich in einem kommerziellen Stadium befinden ⁴⁹. Eine Anlage, die u. a. auch Kunststoffabfälle nach diesem Prinzip aufarbeitet, weist allerdings eine Anlagenkapazität von 700.000 t/a aus. Der nachfolgenden Tabelle sind die Anlagendaten bis zum Jahre 2019 zu entnehmen.

Tabelle 9: Kommerzielle Anlagen zum Hydrocracken ⁴⁹

Prozess	Unternehmen	Einsatz	Status	Kapazität [t/a]
Cat-HTR™	Licella Holdings Ltd	Biomasse, Kunststoffabfälle, Altöl	Kommerzielle Anlagen	-
IH ²	Illinois-based Gas Technology Institute/CRI Catalyst/ Shell	Siedlungsabfall, Biomasse, Kunststoffabfälle	Industrielle Anlage	700.000
Handerek Prozess	Handerek	Polyolefine, PS	-	-

5.2.4 Solvolyse

Bei der chemischen Depolymerisation, die auch Solvo- oder Chemolyse genannt wird, werden die Polymere des Kunststoffabfalls mithilfe von chemischen Reagenzien in ihre Monomer-Bestandteile

⁴⁹ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 50 - 52, 55 - 58.

⁵⁰ Quicker, P.: „Rohstoffliche Kunststoffverwertung: Kritische Würdigung potentieller Ansätze“, Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, Berlin, 03.02.2020 - 04.02.2020



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

zerteilt, welche entweder zur erneuten Erzeugung desselben Werkstoffs oder als Ausgangsstoff für andere chemische Synthesen dienen können. Chemisch gesehen läuft dabei die Umkehrreaktion der Polykondensation oder eine artverwandte Reaktion dieser durch Einbau von kleinen Molekülen ab. Daraus wird geschlossen, dass diese Technologie ausschließlich für Polykondensationskunststoffe, wie Polyester und Polyamide, Anwendung finden kann, da diese durch Abspaltung von Wasser oder anderen Verbindungen synthetisiert werden. Der Hauptteil der Kunststoffabfälle besteht jedoch aus Polyolefinen, welche nicht mit den herkömmlichen Methoden der Solvolyse dem wertstofflichen Recycling zugeführt werden können⁵¹.

Andererseits gibt es neuere Verfahren, mit denen auch die deutlich schwerer zu brechenden Kohlenstoff-Verbindungen in Polyolefinen (= PE und PP) aufgespalten werden können. So wird davon berichtet, dass im Unterschied zu gewöhnlichen Solvolysebedingungen mit überkritischen Flüssigkeiten (z. B. H₂O) sogar Polyolefine depolymerisiert werden können. Dieses Verfahren wird dann oft als Pyrolyse mit überkritischen Flüssigkeiten bezeichnet. Auch sind Polyolefine mithilfe der sauren Hydrolyse unter Einfluss von Mikrowellen zu Verbindungen umgewandelt worden, die zu Weichmachern weiterverarbeitet werden können⁵².

5.2.4.1 Verfahrensbeschreibung

Für die Solvolyse kommen unterschiedliche Lösungsmittel zum Einsatz, wodurch dieser Ansatz in die vorherrschenden Wege der

- Glykolyse,
- Methanolyse,
- Hydrolyse sowie
- Ammonolyse und Aminolyse

unterteilt werden kann.

Der Einsatz unterschiedlicher Lösemittel führt jeweils zu verschiedenen Recyclingprodukten, wobei auch Kombinationen der gelisteten Strategien zur Anwendung kommen können.

Die Glykolyse von PET, die älteste und einfachste Chemolyse-Technologie, setzt unterschiedliche Glykole (Ethylenglykol, Diethylenglykol, Propylenglykol, Dipropylenglykol) zur Aufspaltung der Polymere bei Temperaturen zwischen 180 °C und 240 °C ein. Durch den Einsatz von Katalysatoren (z. B. Zeolithe, Metallverbindungen) kann die Trennung beschleunigt und verbessert werden.

Bei der Methanolyse, die bei ähnlichen Temperaturen (180 °C bis 280 °C) aber auch höheren Drücken von 20 bar bis 40 bar abläuft, wird die Polyesterstruktur durch Methanol meist in Anwesenheit eines Katalysators wie Zink-, Magnesium- oder Cobaltacetat aufgespalten. Dabei werden gleichermaßen Rohstoffe zur erneuten PET-Synthese, in diesem Fall Dimethylterephthalat und Ethylenglykol, zurückgewonnen, wobei diese Grundstoffe eine höhere Reinheit als bei der Glykolyse aufweisen, allerdings nicht solch breite Anwendungsfelder bedienen können. Die hohen Drücke in der

⁵¹ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 50 – 52, 55 – 56, 58.

⁵² Vollmer, Ina, Jenks, Michael, J. F., Roelands, Mark C. P., White, Robin J., van Harmelen, Toon, de Wild, Paul, van der Laan, Gerard P., Meirer, Florian, Keurentjes, Jos T. F. und Weckhuysen, Bert M.: „Die nächste Generation des Recyclings – neues Leben für Kunststoffmüll“, Angewandte Chemie International Edition 2020, 59, S. 15402–15423



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

Reaktionszone erschweren jedoch im Vergleich die Einbringung der Einsatzstoffe bei kontinuierlicher Prozessführung, wodurch meist die Nachteile des Batchbetriebs bei der Methanolyse in Kauf genommen werden müssen. Zudem erfordert diese Technologie höhere Reinheiten der Abfallfraktionen und die Investitionskosten fallen höher aus, da der Einsatz von überhitztem Methanol strenge Sicherheitsmaßnahmen fordert.

Durch Hydrolyse bei neutralen, sauren und basischen Bedingungen, durch Zugabe von zum Beispiel Schwefelsäure oder Natriumhydroxid zu Wasser, wird PET in Terephthalsäure und Ethylenglykol aufgespalten. Da die gewonnene Terephthalsäure eine niedrige Reinheit aufweist und weitere Reinigungsschritte für eine erneute Polykondensation erforderlich macht, sowie die Zersetzung vergleichsweise langsam vonstattengeht, kommt der Hydrolyse geringere Bedeutung zu, obwohl der Energieeinsatz geringer ist als bei Glykolyse und Methanolyse.

Ammonolyse mit Ammoniak und Aminolyse in Anwesenheit von primären Aminen stellen die am wenigsten erforschten und entwickelten Verfahren dar. Durch die Umsetzung mit zum Beispiel Methylamin, Ethylamin oder Ethanolamin entstehen Verbindungen, die mannigfaltig als Grundstoff für Additive, in der Pharmazie sowie für Textilfarben dienen können. Dennoch gibt es keine kommerziellen Bestrebungen zum PET-Recycling auf diesem Weg, da eine vollständige Umsetzung von PET schwierig ist. Auch ist zu beachten, dass, unter sauren und basischen Bedingungen, die entstehenden Prozessabwässer durch ihren Gehalt an anorganischen Salzen entsprechend nachbehandelt werden müssen.

Neben PET können auch Polyurethane (PUR) durch die Solvolyse recycelt werden. Dabei kommen ebenso Wasser und Glykol als chemisches Lösungsmittel zur Anwendung. Darüber hinaus können Polyamid-Kunststoffabfälle (PA), wie zum Beispiel die unter dem Trivialnamen Nylon bekannten Verbindungen, durch Solvolyse, hauptsächlich hydrolytisch, verwertet und dadurch Monomere zurückgewonnen werden. Vor allem auch die Möglichkeit der Auftrennung und Verwertung von Verbundwerkstoffen wie carbon- oder glasfaserverstärktes PA durch die Solvolyse sei an dieser Stelle erwähnt. Näheres lässt sich entnehmen ⁵³.

Noch jünger ist das Verfahren der enzymatischen Depolymerisation. Die Aufspaltung der Ketten wird durch den Einsatz von Enzymen, die die Funktion eines Katalysators haben, bewirkt. Damit erfolgt die Umsetzung unter deutlich geringeren Temperaturen und Drücken als bei anderen Solvolyse-Verfahren, was prinzipiell Kostenersparnisse im Betrieb mit sich bringt. ⁵⁴

Weitere Entwicklungen jüngerer Datums, bei denen zum Teil ionische Flüssigkeiten als Lösemittel verwendet werden oder auch überkritische Flüssigkeiten für die Hydrolyse und Methanolyse zum Einsatz kommen, um Kunststoff und Lösemittel in engere Interaktion zu bringen, sind einem Übersichtsartikel aus dem Jahre 2020 zu entnehmen ⁵⁵.

⁵³ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 50 - 52

⁵⁴ Quicker, P.: „Rohstoffliche Kunststoffverwertung: Kritische Würdigung potentieller Ansätze“, Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, Berlin, 03.02.2020 - 04.02.2020

⁵⁵ Vollmer, Ina, Jenks, Michael, J. F., Roelands, Mark C. P., White, Robin J., van Harmelen, Toon, de Wild, Paul, van der Laan, Gerard P., Meirer, Florian, Keurentjes, Jos T. F. und Weckhuysen, Bert M.: „Die nächste Generation des Recyclings – neues Leben für Kunststoffmüll“, Angewandte Chemie International Edition 2020, 59, S. 15402–15423



5.2.4.2 Vor- und Nachteile des Verfahrens

Die Vor- und Nachteile des Verfahrens werden in der nachfolgenden Tabelle gegenübergestellt.

Tabelle 10: Vor- und Nachteile der Solvolyse

Verfahren: Solvolyse	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Weitestgehender Erhalt der Polymerstruktur • Auch stärker verschmutztes Inputmaterial einsetzbar • Abtrennung von problematischen Inhaltsstoffen (z. B. Additive) sowie von Fremdstoffen (andere Kunststoffe, Metalle, Füllstoffe, Verunreinigungen durch Produktreste etc.) nahezu vollständig möglich • Sehr hohe Reinheitsgrade der wiedergewonnenen Kunststoffe möglich (annähernd Neuwarequalität) • Bedenkenloser Einsatz der wiedergewonnenen Kunststoffe für den Kontakt mit Lebensmitteln 	<ul style="list-style-type: none"> • Derzeit nur auf für einen kleinen Teil des anfallenden Kunststoffaufkommens anwendbar (PET, PA, PUR) • Kein Stand der Technik ^{56, 57} • Hoher Aufwand (Lösungsmittelabtrennung und -handhabung) ^{56, 57} • Wirtschaftlichkeit aktuell fraglich ⁵⁶

5.2.4.3 Stand des Verfahrens

Viele der hier vorgestellten Verfahren sind zwar schon lange bekannt, aber haben sich bisher am Markt nicht behaupten können. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von neueren Verfahren und Verfahrenskombinationen, die sich noch in der Laborphase befinden. Diese bedürfen einer längeren Zeit der Entwicklung, ehe sie – wenn überhaupt - für eine Behandlung im industriellen Maßstab zur Verfügung stehen.

Derzeit befinden sich sowohl glykolytische als auch methanolytische Verfahren bereits in industrieller Anwendung zum PET Recycling und werden zum Beispiel von Unternehmen wie DuPont und Eastman realisiert sowie im Zuge des UnPET-Prozesses eingesetzt. Allerdings sind die Behandlungskapazitäten derzeit noch sehr gering und nur an wenigen Stellen auf der Welt vorhanden.

Das industrielle Interesse von Konzernen wie etwa Coca-Cola an neuartigen Verfahren, wie zum Beispiel einer hydrolytischen Depolymerisation mithilfe von Mikrowellen zeigt jedoch, dass in diesem Bereich Bedarf für Recyclingalternativen gegeben ist ⁵⁷.

⁵⁶ Quicker, P.: „Rohstoffliche Kunststoffverwertung: Kritische Würdigung potentieller Ansätze“, Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, Berlin, 03.02.2020 - 04.02.2020

⁵⁷ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 50 - 52



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

5.2.5 Gasifizierung

Unter Gasifizierung oder Vergasung versteht man allgemein die nicht vollständige Oxidation von kohlenstoffhaltigen Materialien, die mittels Luft, Sauerstoff, Dampf oder Mischungen daraus vollzogen wird.

Vergasungsverfahren haben das Ziel, aus festen (z. T. auch flüssigen) Stoffen, beispielsweise auch aus Kunststoffabfällen, ein Synthesegas zu erzeugen, welches dann einer hochwertigen Nutzung zugeführt werden kann. In der chemischen Industrie kann Synthesegas (Wasserstoff und Kohlenmonoxid-Gemisch) als Grundstoff für die Herstellung vieler chemischer Produkte genutzt werden. Allerdings ist die Zusammensetzung und damit die Qualität des erzeugten Synthesegases stark vom Einsatzstoff abhängig. Je heterogener der Einsatzstoff, desto aufwändiger werden im Allgemeinen die Aufreinigungsverfahren, um ein hochwertiges Synthesegas zu erzeugen.

Die Kohlevergasung wurde in Europa lange Zeit zur Herstellung von Stadtgas, das in der Straßenbeleuchtung Verwendung fand, eingesetzt. Bei der Vergasung kommen verschiedene Techniken zum Einsatz. Auch heute sind sie u. a. in China, aber auch Europa, noch weit verbreitet.

Für den Einsatzstoff Abfall, insbesondere Siedlungsabfall, konnten sich die Techniken jedoch nicht etablieren, auch wenn in den vergangenen Jahrzehnten immer wieder Versuche in diese Richtung unternommen wurden⁵⁸.

5.2.5.1 Verfahrensbeschreibung

Die Gasifizierung wird bei Temperaturen zwischen 700 °C und 1.600°C und Drücken zwischen 10 bar und 90 bar durchgeführt.

Während der Vergasung laufen eine Reihe unterschiedlicher chemischer Reaktionen ab, wobei sich meist im ersten Schritt der Einsatzstoff thermisch ohne Einwirkung von Sauerstoff oder Wasserdampf zersetzt und erst anschließend teiloxidiert wird. Nähere Einzelheiten zu den Reaktionsschritten ist⁵⁹ zu entnehmen.

Altkunststoffe und kunststoffhaltige Abfallfraktionen eignen sich ebenfalls für die Vergasung. Wenn das erzeugte Synthesegas zur Erzeugung von chemischen Grundstoffen oder Ausgangsmaterialien für Synthesen eingesetzt wird, ist diese Technologie dem rohstofflichen Recycling zuzurechnen.

⁵⁸ Quicker, P.; Neuerburg, F.; Noël, Y.; Huras, A.: „Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen“, Texte 17/2017, Dessau-Roßlau, 2017

⁵⁹ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 56

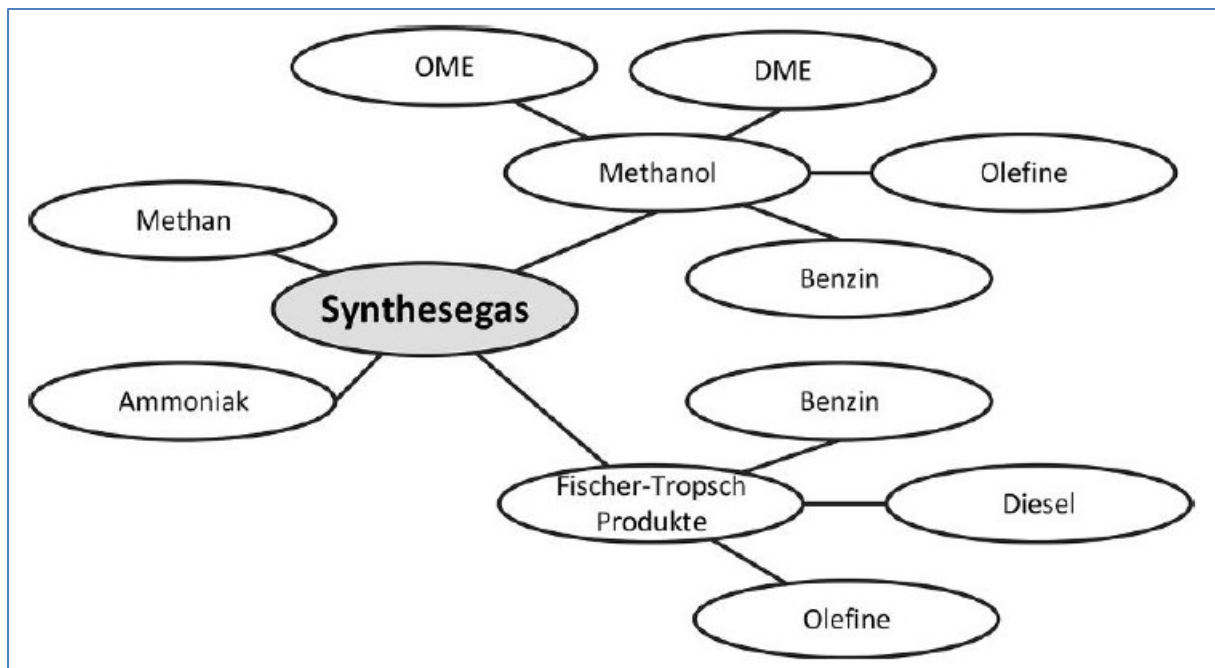


Abbildung 15: Synthesegas-Verwertungswege zur Herstellung von chemischen Grundstoffen⁶⁰

So können zum Beispiel CO und CO₂ katalytisch mit Wasserstoff verbunden werden, um Methanol zu gewinnen, das Synthesegas zur Ammoniakherstellung genutzt oder über Fischer-Tropsch-Synthese Kohlenwasserstoffe generiert werden. Über weitere bekannte Verfahren (Oxosynthese, Dampfvergasung) lassen sich für etwaige chemische Synthesen hierfür günstige Ausgangsprodukte herstellen.

Da für all diese Prozesse der Einsatz von Katalysatoren erforderlich ist, die empfindlich auf Verunreinigungen im Eduktgas reagieren, kommt der Gasreinigung nach der Gasifizierung große Bedeutung zu. Im Falle von Kunststoffen als Einsatzstoff sind vor allem chlor- und stickstoffhaltige Komponenten sowie Teere und partikuläre Verunreinigungen zu entfernen.

Ein großer Vorteil der Gasifizierung von Kunststoffabfällen sind die geringen Reinheitsanforderungen an das Einsatzmaterial, wodurch der Sortieraufwand auch gegenüber der pyrolytischen Wiederverwertung erheblich verringert werden kann. Dabei ist zu erwähnen, dass nicht nur eine sortengemischte Aufgabe von Altkunststoffen, sondern auch eine gleichzeitige Verarbeitung mit anderen, festen Abfallstoffen, zum Beispiel in Form von biogenen Reststoffen in gemischten Siedlungsabfällen möglich ist, worauf sich auch der Hauptteil der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten konzentriert.⁶⁰

⁶⁰ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 56

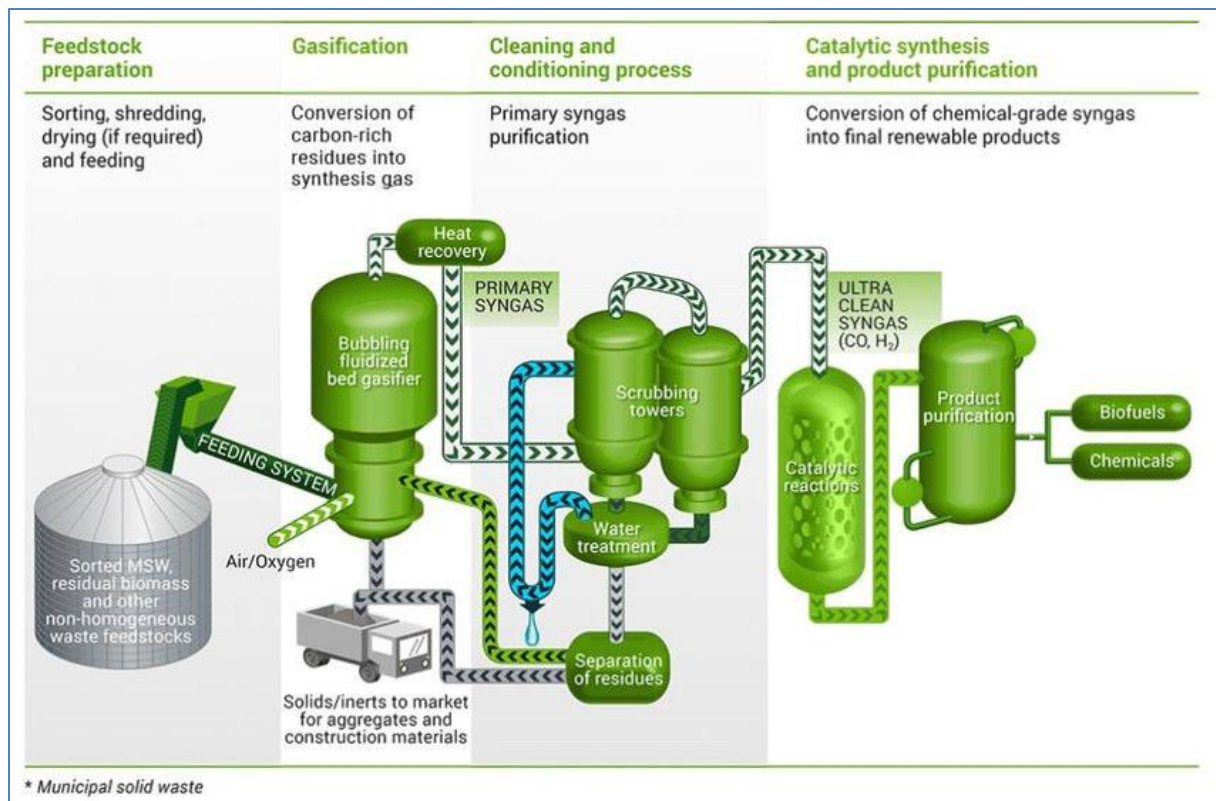


Abbildung 16: Schema des Enerkem-Prozesses⁶¹

Eine Möglichkeit zur Reduktion von Störstoffen ist der Einsatz von Kalk zur Bindung von Chlor und Schwefel. Dieser Ansatz wird zum Beispiel durch einen Kalkkreislauf in einem Schachtreaktor im Verfahren der Firma ecoloop angewandt, die eine 32-MW-Anlage in Traunstein betreibt, um Synthesegas aus Kunststoffabfällen und anderen Reststoffen zu gewinnen.

In der Technologie von Texaco zur Gasifizierung von gemischten Kunststoffen, die in den 1990er-Jahren in einer Pilotanlage für 10 t/ d getestet wurde, erfolgt die Vergasung in einem zweistufigen Verfahren, wobei im ersten Verflüssigungsschritt chlorhaltiges Gas ausgetrieben wird und abgeschieden werden kann. Der entstehende, flüssige Rückstand wird anschließend zur Produktgasgewinnung vergast und enthält somit wesentlich geringere Störstoffgehalte. Eine kommerzielle Anlage war ursprünglich in Dänemark angedacht, wurde jedoch aufgrund von fehlenden Übereinkommen nie realisiert.

Darüber hinaus betreibt das kanadische Unternehmen Enerkem eine industrielle Vergasungsanlage für gemischte, feste Abfälle in der Bioraffinerie in Alberta, Kanada. In einer blasenbildenden Wirbelschicht wird Synthesegas aus sortierten, behandelten Siedlungsabfällen erzeugt, was aufgrund der Zusammensetzung zu geringeren Teergehalten führt, und anschließend katalytisch zu Ethanol und Methanol sowie weiteren Folgeprodukten umgesetzt. Im Prozess-Schema (s. o.) werden die einzelnen Prozessschritte wiedergegeben.⁶²

⁶¹ Enerkem: https://www.researchgate.net/figure/ENERKEM-process-scheme-source-https-enerkemcom_fig6_338740428 <https://enerkem.com>

⁶² Text entnommen und angepasst aus Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 57



5.2.5.2 Vor- und Nachteile des Verfahrens

Die Vor- und Nachteile des Verfahrens werden in der nachfolgenden Tabelle gegenübergestellt.

Tabelle 11: Vor- und Nachteile der Gasifizierung

Verfahren: Gasifizierung	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Auch stark verschmutztes Inputmaterial bzw. auch Gemische aus Kunststoffen und vorbehandelten Siedlungsabfällen einsetzbar • Zersetzung von problematischen Inhaltsstoffen (z. B. Additive und Produktverunreinigungen) nahezu vollständig möglich • Bedenkenloser Einsatz der wiedergewonnenen Kunststoffe für den Kontakt mit Lebensmitteln • Die entstehenden Produkte (Synthesegase) lassen sich wieder zu den verschiedensten Kunststoffen oder anderen Chemiegrundstoffen aufarbeiten. Dadurch auch ein Up-Cycling möglich. 	<ul style="list-style-type: none"> • Weitestgehender Abbau der Polymerstruktur • Dadurch bedingt geringer Wert der Produkte ⁶⁴ • Hoher (auch energetischer) Aufwand für die Wiederaufarbeitung zu Kunststoffen • Gasreinigung sehr aufwändig ⁶³ • Technisch sehr komplex ⁶³ • Kein Stand der Technik ⁶³ • Wirtschaftlichkeit aktuell fraglich ⁶³

5.2.5.3 Stand des Verfahrens

Ähnlich wie das Hydrocracking oder das katalytische Cracking sind Vergasungsverfahren schon lange in der technischen Anwendung. Allerdings ist der Einsatz von Kunststoffen als Input recht neu. Daher gibt es weltweit nur wenige Anlagen, in denen dieses Verfahren mit dem Input Kunststoffabfälle umgesetzt wird. Der nachstehenden Tabelle sind die Anlagendaten bis zum Jahre 2019 zu entnehmen.

Tabelle 12: Anlagen zur Gasifizierung ⁶⁴

Prozess	Unternehmen	Einsatz	Status	Kapazität [t/a]
Enerkem Prozess	Enerkem	Biomasse, Siedlungsabfall, Kunststoff	Kommerzielle Anlagen	360.000
Fulcrum Prozess	Fulcrum	Fester Siedlungsabfall	Demoanlage	175.000

⁶³ Quicker, P.: „Rohstoffliche Kunststoffverwertung: Kritische Würdigung potentieller Ansätze“, Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, Berlin, 03.02.2020 – 04.02.2020

⁶⁴ Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“ Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 2020, S. 57



Mehrere Prozesse (Pyrolyse und Vergasung)	Klean Industries	Kunststoffabfälle	Kommerzielle Anlagen	-
---	------------------	-------------------	----------------------	---

5.3 Thermische Behandlung

Unter die thermische Behandlung wird in diesem Kapitel die energetische Verwertung in Ersatzbrennstoff- oder Müllverbrennungsanlagen (MVA) gefasst. Sowohl in Ersatzbrennstoff- wie auch in Müllverbrennungsanlagen laufen, was das Aufbrechen der Kohlenstoffverbindungen im Input angeht, ähnliche chemische Vorgänge ab, wie in Anlagen, in denen eine Gasifizierung erfolgt. Allerdings ist gerade bei Müllverbrennungsanlagen der Input deutlich inhomogener und in seiner Zusammensetzung vielfältiger, so dass auch die bei der Behandlung entstehenden flüchtigen (Gase wie Wasserdampf und CO₂ sowie als Spurenstoffe CO, Schwefeloxide, Stickoxide, Ammoniak, Salzsäure, Flusssäure, Quecksilber, andere Schwermetalle und weitere zum Teil toxische Kohlenwasserstoffverbindungen), flüssigen (bei Anlagen mit Abgaswäschen) sowie festen Bestandteile (Schlacke und schwermetallhaltige Stäube) in ihrer Zusammensetzung ein deutlich breiteres Spektrum aufweisen, als die bei einer Ersatzbrennstoffanlage.

Die Folge ist, dass die Abreinigung der in einer Müllverbrennungsanlage entstehenden Gase in der Regel aufwändiger ist, als die in einer Ersatzbrennstoffanlage (EBS-Anlage).

Die MVA sind so ausgelegt, dass in ihnen Abfälle mit einem Energieinhalt (unterer Heizwert) von etwa 9.000 kJ/ kg - 11.000 kJ/ kg verarbeitet werden können. Die EBS-Anlagen hingegen verarbeiten einen Input mit einem Energieinhalt von 11.000 kJ/ kg - 20.000 kJ/ kg.

5.3.1 Verfahrensbeschreibung

Der angelieferte Restmüll aus verschiedenen Fuhren und Quellen wird zum Teil vorbehandelt, zumeist aber direkt in den Müllbunker der Verbrennungsanlage eingebracht und mit Hilfe von Greifern gemischt. Dies trägt zu einer Verstetigung des Brennwertes des Mülls bei. Danach erfolgt die Aufgabe des Mülls in den Aufgabetrichter der Müllverbrennungsanlage. In der überwiegenden Mehrzahl der Müllverbrennungsanlagen kommt die Rostfeuerung zum Einsatz, mit von Anlage zu Anlage unterschiedlichen Rosttypen (Walzenroste, Vor- oder Rückschubroste, seltener auch Wanderroste). In der ersten Zone findet eine Trocknung des Mülls statt, der bei Temperaturen über 100 °C eine Verdampfung des Wasseranteils folgt. In der nächsten Zone erfolgt im Temperaturbereich von 250 °C - 900 °C eine Entgasung des Mülls. Mit Erreichen des Flammpunktes der Entgasungsprodukte setzt die Verbrennung ein, die unvollständig bei Temperaturen von 800 °C - 1.150 °C abläuft. Auf der letzten Rostzone erfolgt der Restausbrand.

Die von unterhalb des Rostes zugeführte Primärluft und die oberhalb zugeführte Sekundärluft haben einen wesentlichen Einfluss auf die Verbrennung und die Bildung der Reaktionsprodukte. Mit der Primärluft wird eine unvollständige Verbrennung auf dem Rost eingeleitet. Die Luftmenge wird so dosiert, dass ein guter Ausbrand bei geringer Stickoxidbildung erreicht wird. Die Nachverbrennung findet in der Nachverbrennungszone durch Zuführung der Sekundärluft statt. Die Verbrennungsluftvolumenströme können zonenweise und entsprechend der Rauchgasanalyse geregelt werden. Die Verbrennungsrückstände fallen am Rostende in ein Wasserbad (Entschlacker), aus dem sie über Stößel oder Kettenkratzer ausgetragen werden, und gelangen über Förderbänder zur Schlackenaufbereitung.

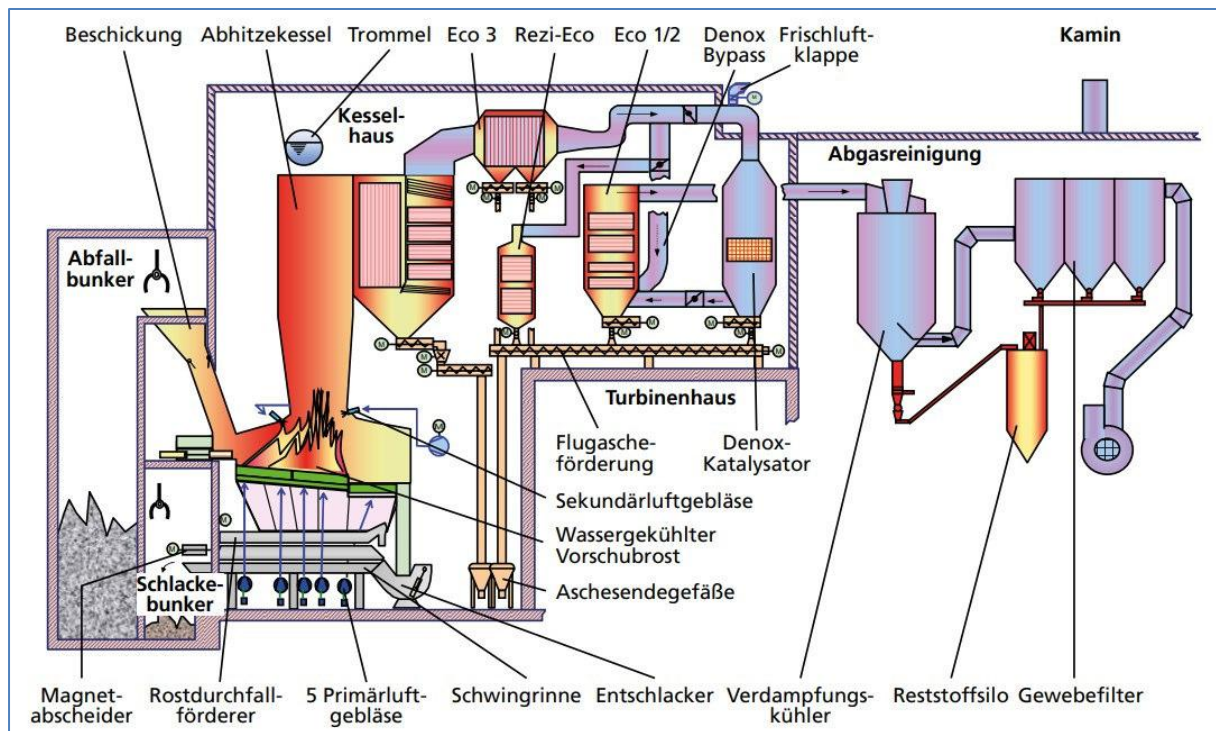


Abbildung 17: Schema einer Hausmüllverbrennungsanlage (Beispiel Würzburg)⁶⁵

Die Temperatur im Verbrennungsraum kann je nach System mehr als 1.000 °C betragen. Aufgrund der 17. BImSchV müssen die Rauchgase nach der letzten Verbrennungsluftzufuhr eine Temperatur von mindestens 850 °C für mindestens zwei Sekunden aufweisen. Es sind geringere Temperaturen im Verbrennungsraum zulässig, wenn die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte nachgewiesen wird. Um die Freisetzung unerwünschter toxischer Verbindungen zu verhindern, werden die Rauchgase nochmals „nachverbrannt“.⁶⁶

Daran schließt sich eine aufwändige Rauchgasreinigung an, um die gesetzlichen Vorgaben einhalten zu können. Im Abgas einer MVA sind als Hauptbestandteile Stickstoff (56 % - 77 %), Wasserdampf (10 % - 18 %), Sauerstoff (7 % - 14 %) sowie CO₂ (6 % - 12 %) enthalten.⁶⁷

Demgegenüber sind die EBS-Anlagen auf die Verarbeitung von gering belasteten Abfällen ausgelegt. In der Regel wird der Input in die EBS-Anlagen in speziellen Anlagen durch eine mechanische oder mechanisch-biologische Aufbereitung aus Haushalts- und Gewerbeabfällen hergestellt. In EBS-Anlagen in Deutschland kommt zumeist eine Rostfeuerung, in wenigen Fällen auch eine Wirbelschichtfeuerung zur Anwendung. Die Auslegung der Anlagen auf gering belastete Abfälle und das Bestreben, die Energie des verbrannten Abfalls möglichst effizient zu nutzen, bedingt eine Bauart der EBS-Anlage mit einer eher einfachen Abgasreinigung. Grundsätzlich müssen aber sowohl die MVA als auch die EBS-Anlagen die Vorgaben der 17. BImSchV einhalten. Allerdings sind EBS-Anlagen zumeist so ausgelegt, dass sie die Grenzwerte der 17. BImSchV knapper einhalten als die MVA.

⁶⁵ Neuss, Andreas und Suchomel, Horst: „Rolle der Sonderabfallverbrennung in der Kreislaufwirtschaft – Schadstoffsенke und energetische Verwertung –, Energie aus Abfall, Band 14, 2017, S. 519-540

⁶⁶ Text entnommen und angepasst aus Wikipedia „Müllverbrennung“ vom 10.02.2022

⁶⁷ Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.): „Müllverbrennung: Die thermische Behandlung von Abfällen“, September 2002

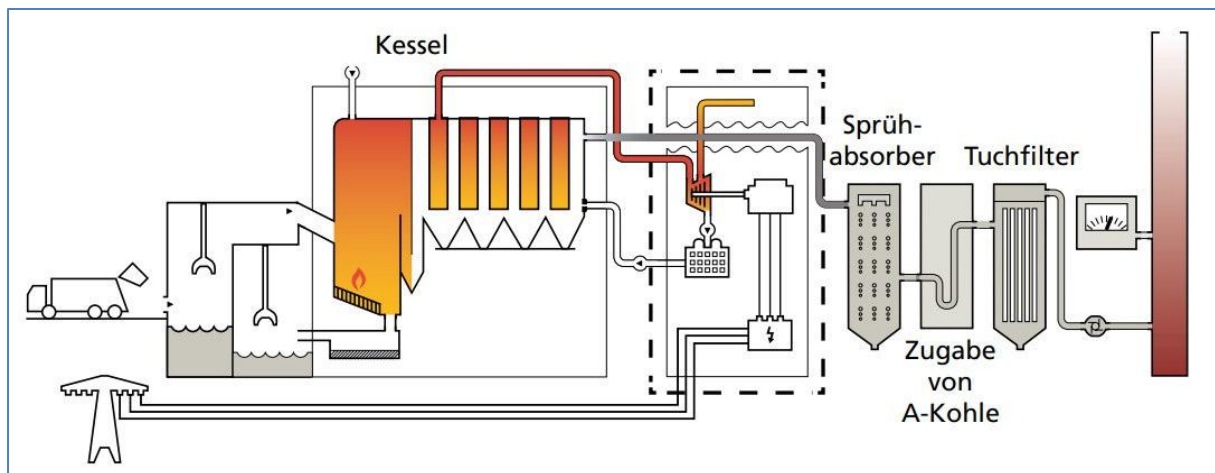


Abbildung 18: Verfahrensschema EBS-Kraftwerk Scheringen ⁶⁸

Je nach gewählter Bauart der Feuerung werden Brennkammertemperaturen von 1.200 °C - 1.400 °C (Rostfeuerung) bzw. 800 °C - 950 °C (Wirbelschichtfeuerung) erreicht.

5.3.2 Vor- und Nachteile des Verfahrens

Die Vor- und Nachteile des Verfahrens werden in der nachfolgenden Tabelle gegenübergestellt.

Tabelle 13: Vor- und Nachteile der thermischen Behandlung

Verfahren: Thermische Behandlung	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • MVA können fast alle Kunststoffe ohne weitere Vorbehandlung verarbeiten • Zersetzung von problematischen Inhaltsstoffen (z. B. Additive und Produktverunreinigungen) nahezu vollständig möglich • Stand der Technik 	<ul style="list-style-type: none"> • EBS benötigen eine Vorbehandlung der Kunststoffe, um diese verarbeiten zu können • Weitestgehender Abbau der Polymerstruktur • CO₂-Vwertung nur in Kombination mit einer CO₂-Abscheidung möglich, die aufgrund der dafür benötigten Energie den Wirkungsgrad deutlich senken würde • Verschiedene Abtrennverfahren (Waschverfahren) befinden sich erst in der Erprobung ⁶⁹

⁶⁸ Neuss, Andreas und Suchomel, Horst: „Rolle der Sonderabfallverbrennung in der Kreislaufwirtschaft – Schadstoffsenske und energetische Verwertung –, Energie aus Abfall, Band 14, 2017, S. 519-540

⁶⁹ Wikipedia „CO₂-Abscheidung und -Speicherung“ vom 09.02.2022



5.3.3 Stand des Verfahrens

MVA wie auch EBS-Anlagen sind seit vielen Jahren Stand der Technik, was die thermische Behandlung von Abfällen, darunter auch Kunststoffabfälle, angeht. Allein in Deutschland beträgt die jährliche Kapazität der 79 MVA rund 23,9 Mio. t⁷⁰ und der der 23 EBS-Anlagen rund 3,5 Mio. t⁷¹.

Vermeehrt wird in den letzten Jahren darüber diskutiert, um unvermeidbare Emissionen von CO₂ zu verringern oder zu vermeiden, das CO₂ abzuscheiden und anschließend sicher und dauerhaft in tiefliegenden geologischen Gesteinsschichten zu speichern (engl. Carbon Capture and Storage, CCS) oder statt der Speicherung eine anschließende Nutzung des Gases als Kohlestoffquelle in industriellen Prozessen vorzusehen (engl. Carbon Capture and Utilization, CCU). Hier ließen sich sogar negative Emissionen erzeugen, wenn das CO₂ aus der Verbrennung von Biomasse stammt.

Als Abscheideverfahren kommen Verfahren „vor der Verbrennung“ (Pre-Combustion) oder „nach der Verbrennung“ (Post-Combustion) in Frage. Als weiteres Verfahren wird der Einsatz von reinem Sauerstoff anstelle von Luft genannt (Oxy-Combustion). Von allen Verfahren ist alleine das Post-Combustion-Verfahren für die Nachrüstung in bestehende MVA, EBS-Anlagen oder Kraftwerke geeignet. Dieses entnimmt das CO₂ aus dem bei der Verbrennung entstehenden Rauchgas. Das Rauchgas würde nach der üblichen Rauchgasreinigung zur Entstaubung, Entstickung und Entschwefelung einem zusätzlichen Waschverfahren unterzogen. Dabei lagert sich zunächst das CO₂ an fein verteilte Tröpfchen eines Waschmittels in einer Waschkolonne an und wird in einem zweiten Schritt in einem Abscheider (Stripper) in konzentrierter Form wieder freigegeben. Das vom CO₂ befreite Waschmittel kann erneut verwendet werden und wird „im Kreis“ gefahren. Als Waschmittel kommen Amin, Hydrogencarbonat oder auch organische Lösungsmittel wie z. B. Methanol in Frage. Allen Waschverfahren ist gemeinsam, dass für die Prozessführung große Energiemengen benötigt werden, die den Gesamtwirkungsgrad der Anlagen deutlich verringern⁷².

Auch befinden sich die Verfahren noch im Versuchsstadium und vor allem muss die Speicherung von CO₂ in tiefliegenden Gesteinsschichten noch untersucht werden. Und selbst wenn dies alles geklärt ist, wird ein wirtschaftlicher Betrieb davon abhängen, eine Logistikkette über Pipelines oder Schiffstransport aufzubauen. Insofern ist derzeit dieses Verfahren noch recht weit von einer Umsetzung entfernt, geschweige denn Stand der Technik.

⁷⁰ ITAD Jahresbericht 2018

⁷¹ Wikipedia „Ersatzbrennstoffkraftwerk“ vom 09.02.2022

⁷² Wikipedia „CO₂-Abscheidung und -Speicherung“ vom 09.02.2022



6 Ausblick

Derzeit ist der Materialfluss bzgl. der Kunststoffwerkstoffe so ausgestaltet, dass in Deutschland pro Jahr fast die Hälfte des Verbrauchs (gut 48 %) in das anthropogene Lager gelangt. D. h. diese Kunststoffwerkstoffe werden als Gebrauchsgegenstände mehr- bzw. langjährig genutzt oder in Form von Bauteilen beim Hoch- oder Tiefbau verwendet.

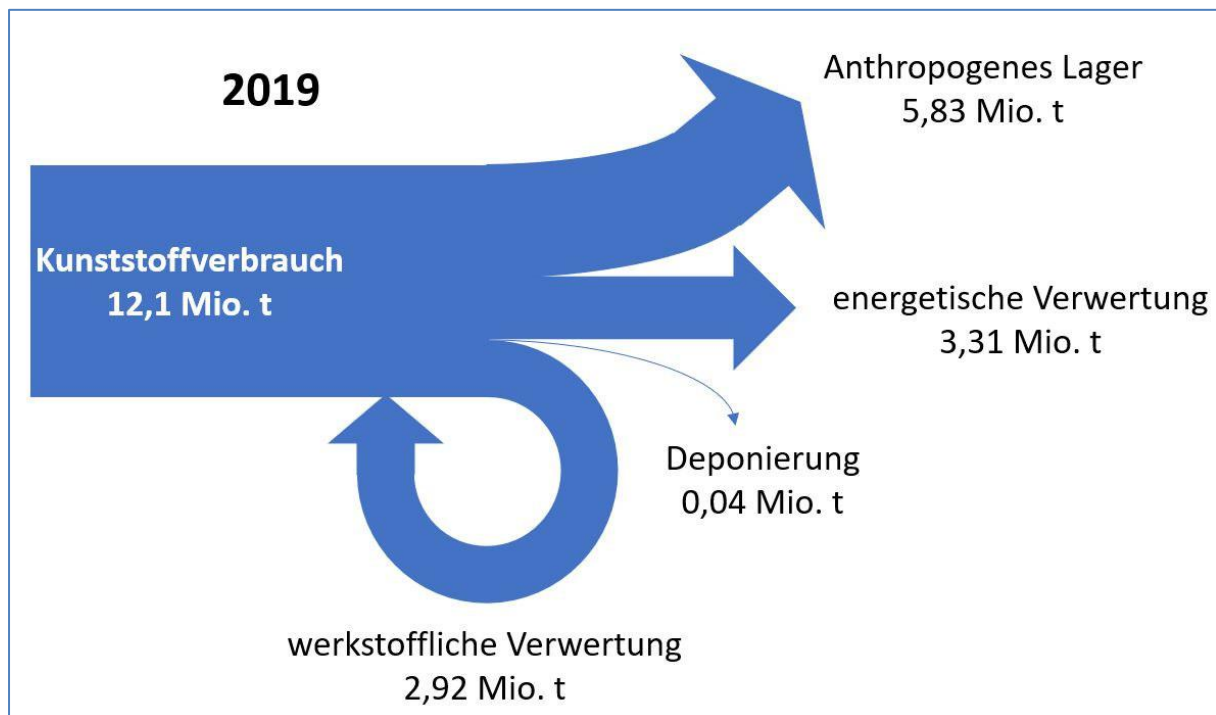


Abbildung 19: Stoffflussbild Kunststoffe 2019⁷³

Für etwas mehr als ein Viertel (ca. 27 %) erfolgt eine energetische Verwertung in MVA oder EBS-Anlagen und weniger als ein Viertel (rd. 24 %) werden über eine werkstoffliche Verwertung im Kreis geführt. Dabei ist noch zu bedenken, dass nur der kleinere Teil davon tatsächlich im gleichen Einsatzzweck wie vorher Verwendung findet. Die Beseitigung von Kunststoffen auf Deponien (zumeist untrennbar verbunden mit mineralischen Abfällen) fällt dagegen kaum ins Gewicht (etwa 0,3 %). Damit ist man noch sehr weit von einer echten Kreislaufführung der Kunststoffe entfernt.

Längerfristig gesehen muss und wird sich ein stärker kreislauforientierter Ablauf einstellen. Hierzu tragen sowohl die politischen und rechtlichen Vorgaben aus der EU und dem Bund (Stichworte: Circular Economy, Green-Deal), aber auch die Entwicklung der Rohstoffmärkte und damit auch die der Preise bei. Die längerfristig eintretende Verknappung der fossilen Rohstoffe, wie auch sicherlich vorher schon die von der EU bzw. vom Bund festgesetzten preislichen Anreize (Plastikabgabe, CO₂-Preis) werden den Verbrauch von fossilen Rohstoffen gegenüber den recycelten Produkten verteuern. In Kombination mit der Vorgabe von Rezyklatanteilen für die Produktion wird eine Entwicklung verstärkt, die den Einsatz von fossilen Rohstoffen für die Kunststoffproduktion deutlich verringern wird.

⁷³ Daten stammen aus Lindner, C.; Schmitt, J.; Hein, J.: „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019“, Kurzfassung der Conversio Studie, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff 2020



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

Dies kann aber nur funktionieren, wenn genügend Anlagen zum Recycling von Kunststoffen zur Verfügung stehen werden. Allein nur die Menge, die in 2019 für die Herstellung von Kunststoffwerkstoffen benötigt wurde (12,1 Mio. t) im Vergleich zur als Kunststoffabfälle behandelten Menge (6,28 Mio. t, s. Kapitel 4) zeigt, dass auf Dauer noch große Kapazitäten aufgebaut werden müssen. Selbst wenn man davon ausgeht, dass die derzeit vorhandenen Kapazitäten noch nicht vollständig ausgelastet sind.

Idealtypisch werden die Kunststoffe über die Rohstoffverarbeitung/ Kunststoffproduktion, die sich daran anschließende Nutzung, die Sammlung und schließlich die Zuführung zu Recyclingverfahren im Kreislauf gehalten (s. Abbildung 20).

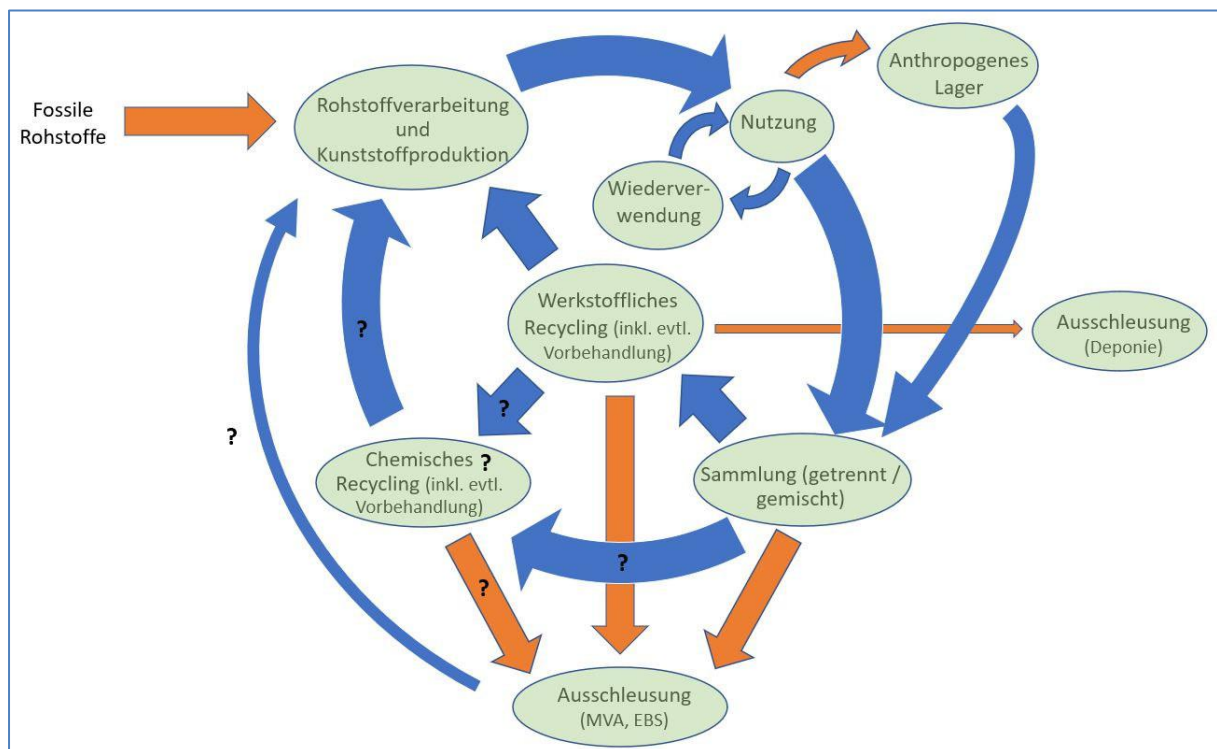


Abbildung 20: Kunststoffkreislauf

Als oberste Priorität gilt dabei, Stoffe möglichst durch eine Wiederverwendung direkt einer erneuten Nutzung zuzuführen. Die bisherige Erfahrung zeigt, dass sich über diesen Weg recht begrenzte Mengen zurückführen lassen. Produktinnovationen führen dazu, dass sich nur wenige „alte Produkte“ an die Frau oder den Mann bringen lassen. Eine deutliche Stärkung der Wiederverwendung wird nur dann eintreten, wenn statt der Produkte der Produktnutzen von den Herstellern verkauft wird. Die Folge wäre ein „sauberer“ Rücklauf dieser Produkte an den Hersteller. Damit steigt bei diesen der Anreiz, die Produkte langlebig und reparierbar zu gestalten und langlebigere Bauteile womöglich mehrfach zu verwenden. Aufgrund des damit verbundenen Aufwands für die Rückholung und Reparatur bzw. des Austauschs von Bauteilen wird dies sich aber nur für höherpreisige Produkte lohnen.

Derzeit trägt nur das werkstoffliche Recycling im nennenswerten, aber bei weitem noch nicht ausreichenden Maße zur Kreislaufführung bei. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund des Alterungsprozesses beim werkstofflichen Recycling auf Dauer immer eine bestimmte Menge ausgeschleust werden muss, um die benötigten Materialeigenschaften zu erhalten.



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

Auch wird es verfahrensbedingt sowie durch eine nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand zu erreichende Abtrennung von mineralischen Bestandteilen und daran anhaftenden Kunststoffen zu einer ständigen – wenn auch geringeren – Ausschleusung von Kunststoffmengen in Richtung von Deponien kommen. Neuere Erkenntnisse über die Gefährlichkeit von früher als unbedenklich angesehenen Inhaltsstoffen und Zusätzen werden auch zukünftig dazu führen, diese Materialien aus dem Kreislauf entfernen zu müssen. Dies gilt vor allem für die Mengen, die nach und nach in einem größeren Maße aus dem anthropogenen Lager in den Kreislauf zurückkehren.

Alle diese „Verluste“ können nur durch Einbringung von Neuware oder durch Herausholen von Mengen aus dem anthropogenen Lager und Zuführung in den Kreislauf ausgeglichen werden.

Eine Alternative bringt hier das chemische Recycling mit sich. Denn über diesen Weg kann ein echtes Upcycling von Kunststoffen erfolgen, so dass auch stark verschmutzte oder von einer zu starken Alterung betroffene Kunststoffe wieder in den Kreislauf zurückgeführt werden können.

Allerdings steht derzeit dieser Weg noch unter einigen Fragezeichen. Bisher haben sich solche Anlagen in kaum nennenswerten Umfang am Markt durchsetzen können. Dies lag auch daran, dass die dort gewonnenen Kunststoffvorprodukte mit denen aus einer Neuware stammenden konkurrieren müssen. Der Rohölpreis war bislang fast immer so günstig, dass die daraus im großtechnischen, industriellen Maße hergestellte Neuware preislich nicht zu unterbieten war. Im Vergleich dazu sind die bestehenden Anlagen für ein chemisches Recycling viel zu klein und damit auch die Herstellungskosten relativ teuer. Zudem bestehen verfahrensbedingt zusätzliche Schwierigkeiten, weil z. B. die für den Prozess benötigte Wärme sich nicht leicht den nur schlecht wärmeleitenden Kunststoffen zuführen lässt. Auch liegen für viele der aktuell bekannten Verfahren noch keine langjährigen Erfahrungen vor. Dies erhöht für die Firmen, die solche Anlagen aufbauen wollen, das finanzielle Risiko. Ein solches Risiko werden sie nur eingehen, wenn die Rahmenbedingungen so sind, dass das Risiko nicht unkalkulierbar wird.

Aufgrund der sich ändernden Rahmenbedingungen (EU-Plastikabgabe, CO₂-Steuer, Imagevorteile für den Einsatz von Recyclingmaterialien, Vorgabe von Rezyklatquoten) scheint sich aber eine Entwicklung anzudeuten, die vermehrt Firmen dazu bringt, in den Aufbau von Anlagen zum chemischen Recycling zu investieren. So ist dem EUWID im letzten Jahr zu entnehmen, dass BASF, Remondis und Quantafuel eine Kooperation beim chemischen Recycling prüfen⁷⁴. Auch der Autobauer Audi zieht ein chemisches Recycling in Betracht⁷⁵. Die Chemiefirma Covestro forscht an Recycling von PUR-Hartschäumen⁷⁶ und BP plant eine Pyrolyseanlage zum chemischen Recycling in Gelsenkirchen⁷⁷. Im aktuellen Jahr 2022 berichtet EUWID darüber, dass die Demo-Anlage von des österreichischen Ölkonzerns OMV Anfang 2023 ihren Betrieb aufnehmen soll⁷⁸. Auch kündigt die Fa. Eastman an, in Frankreich bis zu eine Mrd. Dollar in chemisches Recycling investieren zu wollen⁷⁹. Darüber hinaus haben die Firmen Plastic Energy und Total vor, eine weitere Anlage für das chemische Recycling zu bauen⁸⁰. BASF und der Schaumstoffspezialist Neveon möchten mit Hilfe eines nasschemischen Verfahrens das Recycling von

⁷⁴ EUWID Recycling und Entsorgung 17/2021 „BASF, Remondis und Quantafuel prüfen Kooperation beim chemischen Recycling“

⁷⁵ EUWID Recycling und Entsorgung 25/2021 „Audi sieht chemisches Recycling als gute Alternative zur Verbrennung“

⁷⁶ EUWID Recycling und Entsorgung 42/2021 „Covestro forscht an Recycling von PU-Hartschäumen“

⁷⁷ EUWID Recycling und Entsorgung 49/2021 „Chemisches Recycling: BP plant Pyrolyseanlage in Gelsenkirchen“

⁷⁸ EUWID Recycling und Entsorgung 01/2022 „Demo-Anlage von OMV soll Anfang 2023 laufen“

⁷⁹ EUWID Recycling und Entsorgung 03/2022 „Eastman will in Frankreich bis zu eine Mrd. Dollar in chemisches Recycling investieren“

⁸⁰ EUWID Recycling und Entsorgung 03/2022 „Plastic Energy und Total wollen weitere Anlage bauen“



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

Matratzen vorantreiben⁸¹. Auch haben der Öl-Multi Total und der US-amerikanische Mischkonzern Honeywell vor, beim chemischen Recycling von Kunststoffabfällen zusammenzuarbeiten⁸². Amazon beteiligt sich an Forschungen zum chemischen Recycling und ist deswegen in ein amerikanisches Konsortium des US-Energieministeriums eingetreten⁸³. OMV und der Entsorger Alba planen eine gemeinsame Sortieranlage mit einer jährlichen Kapazität von 200.000 t, mit der Mischkunststoffe aus dem dualen System für das chemische Recycling aufbereitet werden sollen⁸⁴. Der Verpackungsproduzent Südpack und die niederländische Firma Clean Cycle haben sich an dem deutschen Recycler Carboliq beteiligt, der mittels der Carboliq-Technologie (= Direktverflüssigung unter Einsatz von zeolithischen Katalysatoren) ein Pyrolyseöl erzeugt⁸⁵. Auch wird das Start-Up Greencycling Technologies GmbH eine erste Demonstrationsanlage mit einer Jahreskapazität von 4.000 t im Industriepark Frankfurt-Hoechst zur Verarbeitung von gemischtem Kunststoffabfall im April in Betrieb nehmen, die auf einem Pyrolyseverfahren beruht⁸⁶.

Andererseits sieht der Veolia-Konzern das chemische Recycling sehr kritisch und wird insbesondere die Pyrolyse nicht weiterverfolgen. Begründet wird dies mit einem vergleichsweise niedrigen Ertrag bei hohem Aufwand und größeren Umweltbelastungen⁸⁷. Und aus wirtschaftlichen Gründen musste der niederländische Kunststoffrecycler Polystyrene Loop seinen Betrieb einstellen. In seiner Demonstrationsanlage mit 3.300 Jahreskapazität kam das Creasolv®-Verfahren zur Anwendung. Neben Anlagenproblemen haben die Auswirkungen der Corona-Pandemie wie auch steigende Energiepreise dazu geführt, dass die Liquidität der Firma nicht mehr ausreichend war⁸⁸.

Noch steht die Klärung aus, welcher Weg für welche Kunststoffe beschritten werden soll und ob dieser Weg auch ökologisch sinnvoll ist. Das Umweltbundesamt kommt in einer seiner Veröffentlichungen aus dem Jahre 2020 zu folgendem Schluss: *„Die tatsächliche Eignung der einzelnen Verfahren für das chemische Kunststoffrecycling [...] steht in der großtechnischen Umsetzung noch aus, auch wenn die Verfahren als solche für andere Einsatzstoffe bereits erprobt sind. Insbesondere ist bisher noch ungeklärt, welche Techniken am besten geeignet und welche Kunststoffabfallfraktionen mit welcher Technik am sinnvollsten zu verwerten sind. Neben der Frage der technischen Machbarkeit steht vor allem die Frage nach der ökologischen Vorteilhaftigkeit des chemischen Recyclings gegenüber der direkten energetischen Verwertung der nicht werkstofflich recycelbaren Kunststoffabfallfraktionen unter Berücksichtigung aller Auf- und Nachbereitungsschritte im Raum und bleibt im langfristigen Betrieb zu bewerten. Die momentan vorliegenden Daten erlauben dazu keine abschließende Aussage. Hierfür bedarf es einer systematischen Untersuchung der bereits vorhandenen Ansätze. Das Umweltbundesamt lässt derzeit eine Studie dazu durchführen.“*⁸⁹

⁸¹ EUWID Recycling und Entsorgung 08/2022 „BASF und Neveon kooperieren beim Recycling von Matratzen“

⁸² EUWID Recycling und Entsorgung 08/2022 „Chemisches Recycling: Total und Honeywell kooperieren“

⁸³ EUWID Recycling und Entsorgung 11/2022 „Amazon forscht am chemischen Recycling und biologisch abbaubaren Kunststoffen“

⁸⁴ EUWID Recycling und Entsorgung 11/2022 „Chemisches Recycling: Ölkonzern OMV und Alba planen eine gemeinsame Sortieranlage“

⁸⁵ EUWID Recycling und Entsorgung 12/2022 „Chemisches Recycling: Südpack und Clean Cycle beteiligen sich an Carboliq“

⁸⁶ EUWID Recycling und Entsorgung 09/2022 „Pyrolyse von gemischtem Kunststoffabfall vor dem Start“

⁸⁷ EUWID Recycling und Entsorgung 15/2022: „Veolia erteilt dem chemischen Recycling von Kunststoffabfällen eine klare Absage“

⁸⁸ EUWID Recycling und Entsorgung 12/2022: „EPS-Recycling: Pleite von Polystyrene Loop“

⁸⁹ Umweltbundesamt (Hrsg.): „Chemisches Recycling“, Juli 2020



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

Derzeit stehen die MVA und zum Teil auch die EBS-Anlagen als Senke zum Ausschleusen von verschmutzten Kunststoffen wie auch zur Energierückgewinnung zur Verfügung. Vor allem für die MVA gilt, dass sie in der Lage sind, fast das gesamte Spektrum an Kunststoffen aufnehmen und thermisch behandeln zu können. Im Vergleich zu den anderen Verwertungswegen ist die Bandbreite der behandelbaren Kunststoffe am größten, woraus auch folgt, dass die benötigten Vorbehandlungsschritte am geringsten sind. Allerdings erfolgt derzeit „nur“ eine Rückgewinnung des Energieinhaltes der Kunststoffe. Der vormals aus fossilen Rohstoffen stammende Kohlenstoff wird als CO₂ wieder in die Atmosphäre entlassen und trägt damit zur Verstärkung des Treibhauseffektes bei. Eine Lösung wäre die Abscheidung von CO₂ aus den Abgasen. Diese führt jedoch zu einer deutlichen Verschlechterung des Wirkungsgrades, da die CO₂-Abtrennung eine hohe Zusatzenergie benötigt⁹⁰. Sollte aber eine Abtrennung vorgenommen werden, ist neben der Speicherung von CO₂ auch eine Rückführung des CO₂ in den Kunststoffkreislauf möglich. Ob dies jedoch wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll ist, bedarf ebenfalls weiterer Untersuchungen.

Die Klimadebatte, aber auch die Absicht Deutschlands sowie der EU, sich von bestimmten Rohstofflieferanten weniger abhängig zu machen, hat die Situation deutlich verändert, so dass nun verstärkte Anstrengungen in dieser Hinsicht unternommen werden. Die Verknüpfung der Rohstoff- mit der Sicherheitspolitik ausgelöst durch die Ukraine-Krise wird die Entwicklungen noch einmal deutlich beschleunigen. Die nächsten Jahre werden neue Erkenntnisse zu Tage fördern. Wenn dann die politisch vorgegebenen Rahmenbedingungen so gestaltet sind, dass Klimaschutz und Wirtschaftlichkeit miteinander Hand in Hand gehen, werden sich auf Dauer die Verfahrensweisen für die jeweiligen Stoffströme durchsetzen, die beides am besten bedienen.

⁹⁰ Umweltbundesamt (Hrsg.): „Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung“, Zusammenfassung, August 2006



7 Quellen

- 1 APK AG: <https://www.apk-ag.de/ueber-uns/historie/>
- 2 Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.):
„Müllverbrennung: Die thermische Behandlung von Abfällen“, September 2002
<https://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/abfallbehandlung/doc/muellverb.pdf>
- 3 Behr, A.; Seidensticker, T.: „Einführung in die Chemie nachwachsender Rohstoffe –
Vorkommen, Konversion, Verwendung“, Springer Spektrum, 2018, ISBN 978-3-662-55254-4
- 4 CreaCycle GmbH,
https://www.creacycle.de/images/stories/2021.03.10_CreaSolv_Prozess_D.jpg
- 5 Enerkem: https://www.researchgate.net/figure/ENERKEM-process-scheme-source-https-enerkemcom_fig6_338740428 <https://enerkem.com>
- 6 EUWID Recycling und Entsorgung, <https://www.euwid-recycling.de/>
- 7 Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung:
<https://www.ivv.fraunhofer.de/de/recycling-umwelt/optimierung-kunststoffrecyclinganlagen.html>
- 8 Herklotz, Anne Maria: „Entwicklung eines teilkontinuierlichen Thermolyseverfahrens zum
rohstofflichen Recycling von polyolefinischen Kunststoffabfällen in einer Rührkesselkaskade“,
Dissertation, 20.07.2016
[ingenieur.de: „PVC - fast wie neu“, 08.03.2002](http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/PVC-fast-wie-neu/7850/2)
- 9 <https://archive.ph/20130619171341/http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/PVC-fast-wie-neu/7850/2>
- 10 ITAD Jahresbericht 2018, <https://www.itad.de/ueber-uns/mehr/jahresbericht/itad-jahresbericht-2018.pdf/@@download/file/ITAD-Jahresbericht%202018.pdf>
- 11 Kunststoff.web.de: „VinyLoop: PVC-Recyclingbetrieb ist eingestellt“, 04.07.2018,
https://www.kunststoffweb.de/branchen-news/VinyLoop_PVC-Recyclingbetrieb_ist_eingestellt_t240095
- 12 Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al.: „Chemisches Recycling von gemischten
Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“
Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72, 47–60 (2020)
<https://doi.org/10.1007/s00506-019-00628-w>
- 13 Lindner, C.; Hoffmann, O.: „Analyse/Beschreibung der derzeitigen Situation der stofflichen
und energetischen Verwertung von Kunststoffabfällen in Deutschland“, Stand 19.11.2015,
<https://docplayer.org/24614382-Endbericht-analyse-beschreibung-der-derzeitigen-situation-der-stofflichen-und-energetischen-verwertung-von-kunststoffabfaellen-in-deutschland.html>
- 14 Lindner, C.; Schmitt, J.; Hein, J.: „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019“,
Kurzfassung der Conversio Studie, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff 2020,
https://www.bkv-gmbh.de/files/bkv-neu/studien/Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

- 15 Neuss, Andreas und Suchomel, Horst: „Rolle der Sonderabfallverbrennung in der Kreislaufwirtschaft – Schadstoffsенke und energetische Verwertung –, Energie aus Abfall, Band 14, 2017, S. 519-540 https://www.vivis.de/wp-content/uploads/EaA14/2017_EaA_519-540_NeussSuchomel
- 16 Quicker, P.: „Rohstoffliche Kunststoffverwertung: Kritische Würdigung potentieller Ansätze“, Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, 03.02.2020 – 04.02.2020, <https://rwth-aachen.sciebo.de/s/BAwL3x2OL8h8xXS>
- 17 Quicker, P.; Neuerburg, F.; Noël, Y.; Huras, A.: „Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen“, Texte 17/2017, Dessau-Roßlau, 2017
- 18 Scheirs, J., Kaminsky, W.: „Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: Converting waste plastics into diesel and other fuels“, Wiley series in polymer science. J. Wiley & Sons, Chichester, UK, Hoboken, NJ, 2006
- 19 Schubert, T., Lehner, M., Karner, T., Hofer, W., Lechleitner, A.: „Influence of reaction pressure on co-pyrolysis of LDPE and a heavy petroleum fraction“, Fuel Processing Technology 193, 2019. S. 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.05.016>
- 20 Statistisches Bundesamt: Fachserie 19, Reihe 1, 2017
- 21 Umweltbundesamt (Hrsg.): „Biologisch abbaubare Kunststoffe“, August 2009, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3834.pdf>
- 22 Umweltbundesamt: „Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe“, 04.02.2020, <https://www.umweltbundesamt.de/biobasierte-biologisch-abbaubare-kunststoffe#haufig-gestellte-fragen-faq>
- 23 Umweltbundesamt (Hrsg.): „Chemisches Recycling“, Juli 2020, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf
- 24 Umweltbundesamt (Hrsg.): „Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes“, Abschlussbericht, Juni 2021, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/technische-potenzialanalyse-zur-steigerung-des>
- 25 Umweltbundesamt (Hrsg.): „Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung“, Zusammenfassung, August 2006, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/k3075.pdf>
- 26 Vollmer, Ina, Jenks, Michael, J. F., Roelands, Mark C. P., White, Robin J., van Harmelen, Toon, de Wild, Paul, van der Laan, Gerard P., Meirer, Florian, Keurentjes, Jos T. F. und Weckhuysen, Bert M.: „Die nächste Generation des Recyclings – neues Leben für Kunststoffmüll“, Angewandte Chemie International Edition 2020, 59, S. 15402–15423
- 27 Wikipedia „Bio-basierter Kunststoff“ vom 14.04.2022, https://de.wikipedia.org/wiki/Bio-basierter_Kunststoff
- 28 Wikipedia „CO₂-Abscheidung und -Speicherung“ vom 09.02.2022, [https://de.wikipedia.org/wiki/CO₂-Abscheidung_und_-Speicherung](https://de.wikipedia.org/wiki/CO2-Abscheidung_und_-Speicherung)



Abfallwirtschaft Region Rhein-Ruhr-Wupper e. V.

- 29 Wikipedia „Ersatzbrennstoffkraftwerk“ vom 09.02.2022,
<https://de.wikipedia.org/wiki/Ersatzbrennstoffkraftwerk>
- 30 Wikipedia: „Hydrocracken“ vom 07.02.2022, <https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrocracken>
- 31 Wikipedia „Müllverbrennung“ vom 10.02.2022,
<https://de.wikipedia.org/wiki/M%C3%BCllverbrennungext>