



HINTERGRUND // JULI 2020

Chemisches Recycling

Für Mensch & Umwelt

Umwelt 
Bundesamt

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiet III 2.4, III 1.6, III 1.2
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de
 /umweltbundesamt
 /umweltbundesamt
 /umweltbundesamt

Autoren:

Dr. Julia Vogel
Dr. Franziska Krüger
Matthias Fabian

Satz und Layout:

le-tex publishing services GmbH

Publikationen als pdf:

www.umweltbundesamt.de/publikationen

Bildquellen:

Titel: Johann Hee

Stand: Juli 2020

ISSN 2363-829X

HINTERGRUND // JULI 2020

Chemisches Recycling

Inhalt

1. Hintergrund	6
2. Verfahren des Kunststoffrecyclings	7
2.1 Werkstoffliches Recycling	7
2.1.1 Trocken- und nassmechanische Aufbereitung	7
2.1.2 Lösemittelbasierte Verfahren	8
2.2 Chemisches oder rohstoffliches Recycling	8
2.2.1 Pyrolyse	9
2.2.2 Vergasung	9
2.2.3 Verflüssigung	10
3. Einordnung des chemischen Recyclings	10
3.1 Eignung der Techniken und Einsatzstoffe	10
3.2 Anrechenbarkeit auf die Verwertungsquoten kreislaufwirtschaftlicher Rechtsnormen	11
4. Fazit	13
5. Quellen	14

1. Hintergrund

Kunststoffe sind ein wichtiger Bestandteil unseres Lebens und unserer Wirtschaft, in allen Lebensbereichen vertreten und häufig nur schwer zu ersetzen. Kunststoffe, die zu Abfällen werden, müssen jedoch sachgerecht behandelt und möglichst hochwertig verwertet werden. Dabei legt die Abfallhierarchie der EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG (ARRL, [1]) eine generelle Prioritätenfolge von Abfallbewirtschaftungsmaßnahmen fest, nach der das Recycling grundsätzlich vorteilhafter ist als die energetische Verwertung (Artikel 4 ARRL) [vgl. auch 2].

Doch ist das Recycling kein Selbstzweck. Vielmehr muss es der Maßgabe des bestmöglichen Schutzes von Mensch und Umwelt entsprechen, wobei der gesamte Lebenszyklus des Abfalls zu betrachten ist. Kunststoffrecycling sollte möglichst hochwertig erfolgen mit dem Ziel, Stoffe aus dem Abfallstrom zurückzugewinnen, die Primärmaterialien und bestenfalls Primärkunststoffe ersetzen und dadurch Ressourcen einzusparen (sog. stoffliche Verwertung). Weiterhin sollten die aus den Kunststoffabfällen erzeugten Rezyklate in sinnvollen Anwendungen eingesetzt werden.

Das Umweltbundesamt versteht unter Kunststoffen feste Werkstoffe, die hauptsächlich aus synthetisch hergestellten oder chemisch bzw. biologisch modifizierten natürlichen Makromolekülen bzw. Polymeren bestehen. Sie enthalten weitere Stoffe wie Additive (z. B. Antioxidantien, 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.

Allerdings kann nur recycelt werden, was auch recyclingfähig¹ ist und wofür Recyclingtechnik zur Verfügung steht. Insbesondere die Vielfalt der Materialien, die unter dem Begriff Kunststoff [3] zusammengefasst sind, führt zu deutlich schwierigeren Bedingungen für das Recycling als beispielsweise bei Papier oder Glas. Auch das häufig nicht auf Recycling ausgelegte Produktdesign ist als Hemmnis für das sog. werkstoffliche Recycling zu sehen, bei dem die Struktur der Kunststoffpolymere und das Material weitgehend erhalten bleiben. Darüber hinaus können insbesondere langlebige Kunststoffprodukte produktionsspezifische Inhaltstoffe enthalten, die inzwischen als Schadstoffe identifiziert und reguliert wurden (z. B. Dämmplatten mit bestimmten Flammschutzmitteln). Sofern verwendungsbeschränkte Stoffe nicht gezielt ausgeschleust oder die Abfälle nicht in einem sicheren geschlossenen Kreislauf geführt werden können, müssen diese stattdessen einer energetischen Verwertung oder thermischen Beseitigung zugeführt werden.

Dem Thema Kunststoff kam in den letzten Jahren eine hohe mediale Präsenz zu, es rückte damit in den Fokus der Öffentlichkeit. In diesem Zusammenhang wird neben dem werkstofflichen auch immer häufiger das chemische bzw. rohstoffliche Recycling (vgl. Abschnitt 2.2) als eine andere Form des stofflichen Recyclings diskutiert, dem sowohl die Möglichkeit der Ausschleusung von Schadstoffen als auch das Potenzial des Einsatzes schwierig werkstofflich recyclebarer oder stark verschmutzter Abfälle zugesprochen wird.

Im Januar 2018 legte die EU-Kommission ihre Kunststoffstrategie [4] mit dem Ziel vor, einen umweltverträglichen Umgang mit Kunststoffen zu regeln und zu verbessern. Darin legt sie unter anderem Strategien für die Vermeidung von Kunststoffabfällen, die Verbesserung des Produktdesigns im Sinne einer gesteigerten Recyclingfähigkeit und die Getrenntsammlung von Kunststoffabfällen fest. Diese politischen Ziele werden u. a. durch die

¹ Für systembeteiligungspflichtige Verpackungen haben die Zentrale Stelle Verpackungsregister und das Umweltbundesamt einen Mindeststandard zur Bemessung der Recyclingfähigkeit veröffentlicht, <https://www.verpackungsregister.org/stiftung-behoerde/mindeststandard-21-verpackg/>.

ARRL und die EU-Verpackungsrichtlinie 1994/62/EG konkretisiert (VerpackRL [5]). Hier werden u. a. Recyclingquoten festgelegt: Die EU-VerpackRL setzt hohe Maßstäbe an die zu erfüllenden Recyclingquoten für das Kunststoffrecycling ab 2025 (Art. 6 Abs. 1 lit. g, h VerpackRL). In Deutschland wird dies durch das Verpackungsgesetz (VerpackG [6]) umgesetzt, das bereits seit dem 01.01.2019 mit seinem Inkrafttreten neue, sehr anspruchsvolle Quoten für das Verpackungsrecycling setzt (§ 16 Abs. 2, 4 VerpackG).

Zusätzlich gibt Art. 11 Abs. 2 ARRL anspruchsvolle Quoten für das Recycling von Siedlungsabfällen vor (50 % ab 2020), die in Deutschland durch die Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetz (in § 14 Abs. 2) in das nationale Recht übernommen werden sollen (Entwurf KrWG [7]). Diese Recyclingquote bezieht

sich jedoch nicht direkt auf den Anteil der im Siedlungsabfall enthaltenen Kunststoffe, sondern auf die Gesamtmenge an Siedlungsabfällen. Das chemische Recycling wird in diesem Zusammenhang auch als eine Möglichkeit des Recyclings von verschmutzten, gemischten Kunststoffabfallfraktionen aus dem Restabfall und von Resten aus Sortieranlagen diskutiert, die bisher energetisch verwertet werden [8].

Nach den rechtlichen Vorgaben sind deutliche Steigerungen der dem Recycling zugeführten Kunststoffmengen bzw. -abfällen zu erbringen. Das bedeutet, dass zukünftig auch weitere, bisher nicht stofflich verwertete Kunststoffabfallströme und neue Techniken wie das chemische Recycling in den Blick genommen werden müssen, um das Recycling zu stärken.

2. Verfahren des Kunststoffrecyclings

Gemäß § 3 Abs. 25 KrWG [9] ist unter Recycling jedes Verwertungsverfahren zu verstehen, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Dabei schließt es 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. Recycling umfasst sowohl werkstoffliche als auch chemische bzw. rohstoffliche Verfahren.

2.1 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, der allerdings auch entsprechende Qualitäten bei den Eingangsmaterialien bedingt.

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.

2.1.1 Trocken- und nassmechanische Aufbereitung

Die Kombination aus trocken- und nassmechanischen Aufbereitungsverfahren zielt auf die Abtrennung enthaltener Fremd- und Störstoffe (u. a. Papier, Metalle, Glas, Mineralien, Fremdkunststoffe) sowie auf die Erzeugung eines Kunststoffproduktes mit definierten Eigenschaften.

In der *trockenmechanischen* Aufbereitung werden die Kunststoffe von nicht erwünschten Materialfraktionen durch Prozesse der induktiven und magnetischen Metallabscheidung, Windsichtung und Siebung getrennt und zerkleinert. Die Trennung der einzelnen Kunststoffsorten erfolgt in der Regel durch das Verfahren der Nahinfrarotspektroskopie (NIR-

Trennung). Alternativ kommt auch die elektrostatische Separation zum Einsatz, z. B. bei rußgefärbten schwarzen Kunststoffen [10].

Die sich anschließende *nassmechanische* Aufbereitung setzt sich aus der Zerkleinerung sowie zum Teil mehrstufigen Wasch- und Trennprozessen zusammen. Die Wäsche dient insbesondere zur Entfernung von Anhaftungen (z. B. Lebensmittelreste, Kosmetikbestandteile, Sand) und zur Ablösung von Etiketten und Kleberresten. Die Rückgewinnung der Zielkunststoffsorten erfolgt mittels Dichtentrennung. Kunststoffsorten mit unterschiedlichen spezifischen Dichten werden im nassen Medium voneinander getrennt. Schwimm-Sink-Becken, Hydrozyklone oder Sortierzentrifugen sind hierbei Stand der Technik. Bei Kunststoffsorten mit sehr ähnlichen und überlappenden Dichtebereichen sind weitere Sortierverfahren der trockenmechanischen Aufbereitung notwendig, meist die NIR-Technik oder die elektrostatische Separation.

Auf den nassmechanischen Prozess folgt die Trocknung des Kunststoffmaterials durch mechanische und/oder thermische Verfahren. Die mechanische Trocknung basiert auf dem Feuchtigkeitsentzug durch trocken arbeitende Zentrifugen, bei der thermischen Trocknung wird das feuchte Material von erwärmter Luft durchströmt.

Neben der Sortierung in Kunststoffsorten kommen teilweise noch Aggregate zur Farbsortierung zum Einsatz. Hierdurch lässt sich das Farbspektrum der Rezyklate und damit der späteren Einsatzmöglichkeiten erweitern [10].

Am Ende des werkstofflichen Aufbereitungsprozesses wird das getrocknete Kunststoffmahlgut den Anforderungen des Abnehmers entsprechend entweder in Form von Mahlgut (Flakes) bereitgestellt oder in einem weiteren Prozessschritt zu Agglomeraten oder Regranulaten aufbereitet. Bei der Agglomeration werden die Kunststoffpartikel (Mahlgut) durch oberflächliches Aufschmelzen miteinander verbunden, um eine Vereinheitlichung der Korngrößen und höhere Schüttdichten zu erreichen. Zur Gewinnung homogener und rieselfähiger Regranulate wird das Mahlgut unter Druck und Temperatur in einem Extruder vollständig aufgeschmolzen. Schmelzefilter sorgen für eine Abtrennung von noch enthaltenen Störstoffen (z. B. Holzfasern, Kunststoffe mit höheren

Schmelztemperaturen), flüchtige Bestandteile werden in einer Entgasungseinheit mittels Unterdruck entfernt. Am Ende des Extruders wird die Schmelze durch eine Lochplatte gepresst, granuliert und abgekühlt [10].

2.1.2 Lösemittelbasierte Verfahren

Bei werkstofflichen lösemittelbasierten Verfahren werden Kunststoffe in einem physikalischen Prozess zurückgewonnen. Dabei bleibt die Polymerstruktur erhalten. Mit Hilfe von speziell angepassten Lösemitteln werden Kunststoffe 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. Vorteil der lösemittelbasierten Verfahren ist, dass Kunststoffe auch aus Verbunden oder schadstoffhaltigen Kunststoffabfällen in sehr reiner Qualität zurückgewonnen werden können. Diese Verfahren sind in Deutschland allerdings nicht oder nur in begrenztem Umfang verfügbar [11, 12].

2.2 Chemisches oder rohstoffliches Recycling

Chemisches oder rohstoffliches Recycling bezeichnet die Umwandlung der Kunststoffpolymere in ihre Monomere bzw. chemischen Grundbausteine oder Basischemikalien, also die Depolymerisation mittels thermochemischer bzw. chemischer Prozesse, wobei bisher eine einheitliche, rechtlich bindende Definition fehlt [13].

Dem chemischen Recycling wird das Potenzial zugesprochen, durch Erschließung neuer, bisher nicht werkstofflich verwertbarer Abfälle das stoffliche Recycling zu stärken und damit die Erreichbarkeit gesetzlicher Quoten des Kunststoffrecyclings zu erleichtern [8, 14].

Als mögliche chemische Recyclingtechniken kommen Pyrolyse, Vergasung oder Verflüssigung (z. B. Verölung oder Solvolyse) in Betracht. Auch z. B. der Einsatz von Kunststoffabfällen als Reduktionsmittel im Hochofenprozess wird dem rohstofflichen Recycling zugerechnet. Letzteres wird im Folgenden allerdings nicht weiter betrachtet, da hierbei keine neuen Einsatzstoffe für die Kunststoffherstellung

bereitgestellt werden können, wie es bei den anderen Verfahren der Fall ist. Neben der direkten Nutzung der Produkte des chemischen Recyclings als Einsatzstoff für die chemische Industrie, wird teilweise auch die Verwertung zu flüssigen Energieträgern/Treibstoffen unter dem Begriff rohstoffliches Recycling miteinbezogen. Auch dieser Weg wird hier nicht weiter betrachtet, da er aus Umweltsicht keine deutlichen ökologischen Vorteile gegenüber der direkten thermischen bzw. energetischen Verwertung in Abfallverbrennungsanlagen, Ersatzbrennstoffkraftwerken oder Zementwerken aufweist (im Folgenden kurz als energetische Verwertung bezeichnet), insbesondere wenn hohe Produktqualitäten, wie für die Herstellung von Treibstoffen erforderlich, nötig sind.

Abhängig vom Verfahren des chemischen Recyclings (Pyrolyse, Vergasung, Verölung, Solvolyse) sind die erzeugten Produkte völlig unterschiedlich. Während die Solvolyse die Polymerketten in Monomere zerlegt, werden bei Verölung und Pyrolyse verschieden zusammengesetzte Kohlenwasserstoffmischungen erzeugt, die dann nach Fraktionierung und Aufbereitung beispielsweise als Einsatzstoff in der chemischen Industrie verwendet werden können. Vergasungstechnologien hingegen erzeugen ein Synthesegas (Syngas), welches über mehrere darauffolgende Schritte (z. B. Fischer-Tropsch-Synthese) wiederum zu Kohlenwasserstoffen umgesetzt wird und so ebenfalls als Grundstoff für die Industrie dienen kann.

Die Möglichkeit der Herstellung von Grundstoffen für die chemische Industrie lassen die neu auftretenden Verfahren des chemischen Recyclings von potenziell großer Bedeutung erscheinen, da sie zu einer Schließung des Kreislaufes zwischen Ver- und Entsorgungswirtschaft beitragen könnten [8, 15]. Die Nutzung des im Kunststoffabfall enthaltenen Kohlenstoffs als sekundäre Kohlenstoffquelle eröffnet die Möglichkeit, diesen tatsächlich im Kreislauf zu führen und damit zu einer Dekarbonisierung der Industrie, also zum Verzicht auf den Einsatz fossiler Kohlenstoffquellen oder zumindest deren Reduzierung und damit der deutlichen Senkung von Treibhausgasen, beizutragen. Die technische Eignung, sowie der ökologische und ökonomische Vorteil der chemischen Recyclingverfahren ist jedoch noch nicht abschließend belegt. Zwar wurden bereits

einige Verfahren in der Vergangenheit erprobt, eine großtechnische, dauerhafte Umsetzung ist allerdings bis heute noch nicht erfolgt.

Im Folgenden werden die verschiedenen möglichen technischen Ansätze für das chemische Recycling kurz und allgemein dargestellt. Für alle Verfahren gilt, dass der eingesetzte Abfall die Produktqualität stark beeinflusst: je höher Verschmutzungsgrad und Heterogenität des eingesetzten Abfalls, desto größer der Aufwand für die Aufbereitung der Produkte und desto höher der Anfall von Reststoffen, die ggf. entsorgt werden müssen.

2.2.1 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 [16, 17]. Dabei entstehen, in Abhängigkeit vom Einsatzstoff, sowohl gasförmige, flüssige als auch feste Reaktionsprodukte [18, 19].

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 homogenen Kunststofffraktionen eher erfolgversprechend [16]; 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.

2.2.2 Vergasung

Vergasungsverfahren behandeln organische Materialien thermisch unter Sauerstoffmangel und sind z. B. im Bereich der Kohlevergasung etablierte Verfahren. Die Kohlevergasung wurde in Europa lange Zeit zur Herstellung von Stadtgas, das in der Straßenbeleuchtung zum Einsatz kam, verwendet. 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 wurden [16].

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.

2.2.3 Verflüssigung

Die Verfahren der Verflüssigung basieren auf sehr unterschiedlichen Techniken, haben jedoch die direkte Verflüssigung der Kunststoffabfälle und die anschließende Nutzung des flüssigen Produktes zum Ziel, welches meist jedoch zuvor einer Aufreinigung

unterzogen werden muss [19]. Als mögliche Verfahren kommen z. B. die Solvolyse oder die Verölung in Frage [18, 20].

Solvolyse ist die Lösung der Polymere in organischen Lösemitteln, ggf. unter erhöhter Temperatur und Druck [20]. Im Gegensatz zu lösemittelbasierten werkstofflichen Verfahren, bei denen die molekulare Struktur der Polymere erhalten bleibt, werden diese bei der Solvolyse in ihre Grundbausteine (Monomere) zerlegt [13].

Unter Verölung versteht man die direkte thermische oder katalytische Zersetzung der Kunststoffpolymere in einem Rührkesselreaktor [19]. Die dabei entstehenden Produkte sind sowohl flüssig als auch gasförmig und fest. Das Zielprodukt stellt die flüssige Phase dar, während in der Wachsphase die festen Rückstände wie z. B. Füllstoffe und Verschmutzungen aus dem Einsatzstoff zu erwarten sind. Jedoch sind, je nach Einsatzstoff, auch in der flüssigen Phase Verunreinigungen zu finden, welche vor einer hochwertigen Nutzung des Produktes entfernt werden müssen [16, 19, 20].

3. Einordnung des chemischen Recyclings

Die Verfahren des chemischen oder rohstofflichen Recyclings bereiten Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen oder für einen anderen Zweck auf. Wenn auch bisher eine einheitliche rechtliche Definition des Begriffes chemisches Recycling fehlt [13], ist das chemische Recycling nach KrWG und ARRL dem Recycling zuzuordnen und damit gemäß Abfallhierarchie der energetischen Verwertung grundsätzlich vorzuziehen. Nach dem allgemeinen technischen Verständnis fasst man unter dem Begriff des chemischen Recyclings alle Verfahren zur Depolymerisation von Kunststoffen zusammen. Die entstehenden Produkte können nach einer Aufbereitung wiederum als Einsatzstoff für die chemische Industrie/die Kunststoffherstellung eingesetzt werden.

Grundsätzlich ist auch der Einsatz der Produkte des chemischen Recyclings als Kraftstoff denkbar. Dies widerspricht jedoch dem Gedanken der stofflichen Verwertung und ist somit praktisch der energetischen Verwertung gleichzusetzen.² Im Rahmen der möglichen Wege der energetischen Verwertung von – nach aktuellem Stand nicht recyclebaren – Kunststoffabfällen ist jedoch die direkte energetische Verwertung als Stand der Technik anzusehen, nicht das chemische Recycling. Neue Verfahren müssen sich folglich mit den beiden etablierten Verfahrenswegen (werkstoffliches Recycling, energetische Verwertung) messen und Nachweise für ihre ökologische Vorteilhaftigkeit sowie die wirtschaftliche Darstellbarkeit erbringen. Dies ist bislang noch nicht erfolgt.

² Vgl. § 3 Abs. 25 Halbsatz 2 KrWG.

3.1 Eignung der Techniken und Einsatzstoffe

Chemisches Recycling kommt aus ökologischer Sicht insbesondere für nicht oder schwierig werkstofflich verwertbare Kunststoffabfälle (z. B. Sortier- und Aufbereitungsreste, gemischte Kunststoffabfälle) in Betracht. Die grundsätzliche Möglichkeit des chemischen Recyclings für das Kunststoffrecycling ist technisch gegeben, allerdings stark abhängig vom gewählten Verfahren in Abhängigkeit des Einsatzstoffes. Es könnten jedoch gegebenenfalls Kunststoffabfälle, die bisher nicht werkstofflich recycelbar sind, durch Verfahren des chemischen Recyclings auch stofflich verwertet werden. Eine Umleitung von Stoffströmen, die bislang im werkstofflichen Recycling verwertet werden, hin zum chemischen Recycling sollte aus Sicht des Umweltbundesamtes jedoch vermieden werden, da zum jetzigen Zeitpunkt davon auszugehen ist, dass die technisch weit weniger aufwändigen werkstofflichen Verfahren ökologisch vorteilhafter sind.

An den Prozess des chemischen Recyclings werden hohe Ansprüche gestellt. So sind insbesondere Pyrolyse und Vergasung, welche bereits in anderen Bereichen erprobt werden konnten, komplexe technische Verfahren, deren technischer Aufwand und die Qualität der erzeugten Produkte stark von der Verschmutzung und Zusammensetzung der eingesetzten Abfälle abhängig sind. Demnach kommt auch hier, wie beim werkstofflichen Recycling, der Vorbehandlung des Abfall-Inputmaterials eine große Bedeutung zu. Je größer die Heterogenität der eingesetzten Kunststoffabfälle, desto komplexer werden Verfahrensführung und Anforderungen an die Anlagen. Die Prozessführung, das Stoff- und Energiemanagement sowie die nachgeschaltete Aufbereitung sind jedoch entscheidend für die Qualität der Produkte und damit deren Nutz- bzw. Vermarktbarkeit. Die Annahme hierbei ist, dass Kunststoffabfälle mit deutlich schlechteren Qualitäten, großer Heterogenität und höherem Verschmutzungsgrad als für das werkstoffliche Recycling geeignet durch das chemische Recycling im Kreislauf geführt und daher genutzt werden können. Allerdings ist ein Nachweis dafür noch nicht endgültig erbracht, und großtechnische, dauerhaft in Betrieb befindliche Anlagen unter Bedingungen, wie sie in Deutschland gefordert werden, sind nicht auf dem Markt. Hinzu kommt, dass ein ökonomischer Betrieb einer großtechnischen Pyrolyse- oder Vergasungsanlage, welche mit entsprechend hohen Investitions- und Betriebskosten

verbunden ist, überhaupt erst ab einem hohen Durchsatz zu erwarten ist. Es kommen also nur solche Kunststoffabfälle als Einsatzmaterial in Frage, die in großen Mengen auf dem Markt verfügbar sind und nicht direkt mit dem werkstofflichen Recycling konkurrieren.

Die tatsächliche Eignung der einzelnen Verfahren für das chemische Kunststoffrecycling, wie sie oben beschrieben wurden, 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 [21]. 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 („Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecycling“, FKZ 3720343020).

3.2 Anrechenbarkeit auf die Verwertungsquoten kreislaufwirtschaftlicher Rechtsnormen

Quotenvorgaben, meist als Zuführungsquote ausgestaltet, stellen in Deutschland auf verschiedene Verwertungsarten ab. So beziehen sie sich in der Regel auf

- ▶ Recycling (§ 3 Abs. 25 KrWG),
- ▶ Werkstoffliche Verwertung (§ 3 Abs. 19 VerpackG) oder
- ▶ Verwertung insgesamt (§ 3 Abs. 23 KrWG), d. h. Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling und sonstige, insbesondere energetische Verwertung, die gemeinsam zur Quotenerfüllung beitragen können.

In einigen älteren Rechtsnormen wird mitunter auf eine „stoffliche Verwertung“ abgestellt (z. B. im Batteriegesetz [22] und in der Altfahrzeugverordnung [23]), wobei die Begriffsdefinitionen jenen des „Recyclings“ der jeweiligen EU-Richtlinien (Altfahrzeug-RL 2000/53/EG, Batterie-RL 2006/66/EG) entsprechen, sich jedoch von der „Recycling“-Definition der ARRL 2008/98/EG unterscheiden, da im Gegensatz zur „Recycling“-Definition der Abfallrahmen-RL u. a. die Verfüllung nicht ausgeschlossen wird. Ein Unterschied besteht auch dahingehend, ob sich derartige Vorgaben für Verwertungsquoten auf das Gesamtgewicht der Abfälle beziehen (so geregelt zum Beispiel in der Altfahrzeugverordnung oder dem Elektro- und Elektronikgerätegesetz [24]), oder ob Quoten materialspezifisch festgelegt sind (so zum Beispiel im Wesentlichen im VerpackG).

Spezifisch auf die Materialart Kunststoff bezogene werkstoffliche Recyclingquoten gibt es in Deutschland nur für Verpackungsabfälle. In dem seit 1. Januar 2019 geltenden Verpackungsgesetz sind die Vorgaben für die Zuführung zum (werkstofflichen) Recycling gegenüber der bis dahin bestehenden Verpackungsverordnung [25] deutlich erhöht worden. Kunststoffverpackungen, die haushaltsnah bei privaten Endverbrauchern und vergleichbaren Anfallstellen über die gelbe Tonne/den gelben Sack gesammelt werden, sind mit ambitionierten Quoten belegt: so sind die Systeme verpflichtet, im Jahresmittel 58,5 Prozent der bei ihnen beteiligten Kunststoffverpackungen einer werkstofflichen Verwertung zuzuführen; mit Wirkung zum 01.01.2022 steigt diese Quote auf 63 Prozent (§ 16 Abs. 2 Satz 2 f. VerpackG). Werkstoffliche Verwertung ist die Verwertung durch Verfahren, bei denen stoffgleiches Neumaterial ersetzt wird oder das Material für eine weitere stoffliche Nutzung verfügbar bleibt (§ 3 Abs. 19 VerpackG). Die Verwertungsquote für Verpackungskunststoffe, d. h. die Quote für Recycling, Vorbereitung zur Wiederverwendung und sonstige Verwertung einschließlich energetischer Verwertung, wurde auf 90 Prozent bezogen auf die Beteiligungsmenge erhöht (§ 16 Abs. 2 Satz 2 VerpackG). Für sonstige Verbunde, darunter Verbunde mit Kunststoffanteil, gibt es eine Recyclingzuführungsquote in Höhe von 55 Prozent bezogen auf die Beteiligungsmenge; ab dem 01.01.2022 steigt diese auf 70 Prozent. Ergänzend gilt, dass gemäß § 16 Abs. 4 VerpackG im Jahresmittel mindestens 50 Masseprozent aller im Rahmen der Sammlung von Leichtverpackungen

(meist: gelber Sack, gelbe Tonne) erfassten Abfälle dem Recycling zuzuführen sind. Bei dieser Quote handelt es sich entsprechend dem Wortlaut nicht um eine kunststoffspezifische Quote; gleichwohl kann das Recycling von Kunststoffen und Kunststoffverbunden zur Quotenerfüllung beitragen.

Im Hinblick auf das chemische Recycling wird diskutiert, zur Erfüllung welcher Quoten es entsprechende Mengen beitragen könne. Unstrittig dürfte sein, dass chemisches Recycling unter den Begriff der Verwertung im Sinne des § 3 Abs. 23 KrWG zu subsumieren ist, da 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. Dies dürfte bei den durch das chemische Recycling erzeugten Produkten (z. B. Synthesegase, -öle, Monomere) in aller Regel gegeben sein.

Sofern der Materialart Kunststoff zuzurechnende Verpackungsabfälle aus der Sammlung der dualen Systeme entsprechend verwertet werden, können die Zuführungsmengen zur Erfüllung der Verwertungszuführungsquote für Kunststoffe im Sinne des § 16 Abs. 2 Satz 2 VerpackG beitragen. Bei anderen Abfallströmen, für die Verwertungsquoten bestehen, gilt Entsprechendes.

Damit chemisches Recycling einen Beitrag zur Erfüllung von Recyclingquoten leisten kann, müsste es die zugeführten Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereiten (§ 3 Abs. 25 KrWG). Die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind, zählen nicht zum Recycling. Sofern die Produkte eines chemischen Recyclingprozesses als Grundstoff in der chemischen Industrie und nicht für die Verwendung als Brennstoff bestimmt sind, erfüllt ein solcher Prozess die Anforderung des § 3 Abs. 25 KrWG einer Aufbereitung für einen anderen Verwendungszweck. Konkret erzeugt chemisches Recycling aus Kunststoffabfällen zum Beispiel Synthesegas, -öl oder Monomere, d. h. andere Materialien beziehungsweise Stoffe als das Ausgangsmaterial. Insofern würden entsprechende Verfahren die Recyclingdefinition

erfüllen. Eine Anrechnung des chemischen Recyclings für die Erfüllung der Recyclingquote des § 16 Abs. 4 VerpackG (50 Prozent-Quote bezogen auf die Sammelmenge) sowie im Fall von Kunststoffverbunden auf die Recyclingquote des § 16 Abs. 2 Satz 1 Nr. 6 VerpackG wäre dementsprechend möglich. Entsprechendes würde auch für andere Abfallströme gelten, für die Recyclingquoten festgelegt sind.

Die Definition einer werkstofflichen Verwertung stellt die höchsten Anforderungen an ein Verwertungsverfahren. Gemäß § 3 Abs. 19 VerpackG gilt, dass durch das Verfahren einer werkstofflichen Verwertung stoffgleiches Neumaterial ersetzt wird oder das Material für eine weitere stoffliche Nutzung verfügbar bleibt. Durch die explizite Nennung der werkstofflichen Verwertung und nicht des Recyclings bei der Quote des § 16 Abs. 2 Satz 3 VerpackG zielt diese Regelung darauf ab, einen signifikant größeren Anteil der anfallenden Abfälle ebensolchen hochwertigen Verwertungsverfahren zuzuführen. Eine Anerkennung der Gleichwertigkeit des chemischen Recyclings mit dem werkstofflichen Recycling ist nach Rechtsauslegung des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)

[13, 14] und des UBA zu § 3 Abs. 19 VerpackG bei den bekannten Verfahren nicht gegeben, da das Material „Kunststoff“ nicht erhalten bleibt, sondern in andere Stoffe (z. B. Pyrolysegas, -öl, Monomere) umgewandelt wird. Diese Stoffe werden zum Beispiel als Grundstoffe in der chemischen Industrie eingesetzt, wo sie Primärmaterialien ersetzen. Ob aus diesen Stoffen in einem folgenden Prozess wieder Verpackungskunststoffe oder andere Produkte hergestellt werden, ist für die rechtliche Bewertung des chemischen Recyclingverfahrens nicht mehr von Bedeutung. Denn das Ergebnis des chemischen Recyclingprozesses (hier: Pyrolysegas, -öl, Monomere) ersetzt weder stoffgleiches Neumaterial (hier: Kunststoff), noch bleibt der Verpackungskunststoff für die weitere stoffliche Nutzung als solcher verfügbar. Vielmehr ersetzen die Produkte des chemischen Recyclings Primärmaterialien (z. B. Rohöl), die ansonsten aus fossilen Rohstoffen gewonnen würden und z. B. als Grundstoff für die Herstellung vieler chemischer Produkte dienen können. Eine Anrechnung von Mengen, die chemischen Recyclingverfahren zugeführt werden, auf die 58,5 Prozent-Quote des werkstofflichen Recyclings (ab 2022: 63 Prozent) gemäß § 16 Abs. 2 Satz 3 VerpackG ist folglich nicht möglich.

4. Fazit

Als potenzielle Vorteile aller chemischen Recyclingverfahren sind die Möglichkeit zur Ausschleusung von Schadstoffen aus dem Kreislauf, der Einsatz von werkstofflich nicht verwertbaren Kunststofffraktionen und das breite Einsatzspektrum als Rohstoff der chemischen Industrie zu nennen. Rohstoffliche Recyclingverfahren könnten für Kunststoffabfälle, die nicht werkstofflich aufbereitet werden können und bislang in die energetische Verwertung gehen, eine sinnvolle Alternative sein. Sie gehören, wie die werkstofflichen Verwertungsverfahren, zum Recycling und stehen damit in der Abfallhierarchie vor der energetischen Verwertung. Eine erfolgreiche Umsetzung der rohstofflichen Verwertung könnte als Ergänzung zu werkstofflichen Verwertungsverfahren – für Abfälle, die nicht einem werkstofflichen Recycling zugeführt werden können – die Kunststoffproduktion insgesamt nachhaltiger gestalten.

Aufgrund der derzeitigen Datenlage muss davon ausgegangen werden, dass die werkstoffliche Verwertung grundsätzlich ökologisch und ökonomisch vorteilhafter als ein chemisches Recycling ist, da weniger aufwändige Verwertungsverfahren zur Anwendung kommen (z. B. weniger Einsatz von Zusatzstoffen und Energie). Dies spiegelt sich im Verpackungsgesetz in der Ausgestaltung der Verwertungsquoten wider.

Um die ökologische Bewertung des chemischen Recyclings endgültig vornehmen zu können, braucht es noch einige Zeit und Forschungsaufwand, um sowohl die Eignung der Techniken sowie den Nachweis der ökologischen Vorteilhaftigkeit der Verfahren im Vergleich zur energetischen und werkstofflichen Verwertung zu erbringen.

5. Quellen

- [1] ARRL: Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (Text von Bedeutung für den EWR) (ABl. L 312 v. 22.11.2008, S. 3), zuletzt geändert durch Richtlinie (EU) 2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 (ABl. L 150 v. 14.06.2018, S. 109), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1582306082963&uri=CELEX:02008L0098-20180705>.
- [2] Versmann, A. in: von Lersner, H.; Wendenburg, H.; Kropp, O.; Rüdiger, J. (Hrsg.), Recht der Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Loseblattwerk, Stand: 03/2010, ARRL Art. 4 Rn. 21.
- [3] Umweltbundesamt (Hrsg.), „Kunststoffe in der Umwelt“, Dessau-Roßlau, 2019, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kunststoffe-in-der-umwelt>.
- [4] European Commission: Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions: A European Strategy for Plastics in a Circular Economy, COM (2018) 28 final, Brüssel, 2018, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1516265440535&uri=COM:2018:28:FIN>.
- [5] VerpackRL: Richtlinie 94/62/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Dezember 1994 über Verpackungen und Verpackungsabfälle (ABl. L 365 v. 31.12.1994, S. 10), zuletzt geändert durch Richtlinie (EU) 2018/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 (ABl. L 150 v. 14.06.2018, S. 141), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:01994L0062-20180704>.
- [6] VerpackG: Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (Verpackungsgesetz – VerpackG) vom 5. Juli 2017 (BGBl. I S. 2234), <https://www.gesetze-im-internet.de/verpackg/>
- [7] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), Referentenentwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der AbfRRL – Lesefassung (Stand: 05.08.2019), https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19._Lp/krwg_novelle/Entwurf/krwg_novelle lese_bf.pdf.
- [8] Lechleitner, A.; Schwabl, D.; Schubert, T.; Bauer, M.; Lehner, M.: Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote, Österr Wasser- und Abfallwirtschaft 72, S. 47–60, 2020.
- [9] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808), <http://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>.
- [10] Knappe, F.; Reinhardt, J.; Kauertz, B.; Oetjen-Dehne, R.; Buschow, N.; Ritthoff, M.; Wilts, H.; Lehmann, M.: Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes, Umweltbundesamt, FKZ 3716 33 325 0, noch unveröffentlicht.
- [11] Fraunhofer IVV: <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/recycling-umwelt/kunststoff-recycling.html> (abgerufen am 19.03.2020).
- [12] Riedl, F.: Lösemittelbasiertes Recycling im Industriemaßstab, Kunststoffe, 05/2018.
- [13] Janz: Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen – eine Alternative zur werkstofflichen Verwertung? in: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Quicker, P.; Gosten, A. (Hrsg.), Energie aus Abfall, Band 17, S. 67–70, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin 2020.
- [14] EUWID Recycling und Entsorgung, Nr. 42/2018, S. 25.
- [15] Ellen MacArthur Foundation, Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change (2019), www.ellenmacarthurfoundation.org/publications.
- [16] 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.
- [17] Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL: VDI 3460, Blatt 1, Thermische Abfallbehandlung Grundlagen.
- [18] Quicker, P.: Rohstoffliche Kunststoffverwertung: Kritische Würdigung potentieller Ansätze in: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Quicker, P.; Gosten, A. (Hrsg.), Energie aus Abfall, Band 17, S. 81–92, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin 2020.
- [19] Seitz, Klätte, Pohl: Evaluierung von thermisch-chemischen Depolymerisationstechnologien zur Verwertung von Kunststoffabfällen in: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Quicker, P.; Gosten, A. (Hrsg.), Energie aus Abfall, Band 17, S. 105–114, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin 2020.
- [20] Pohl, M.; Quicker, P.: Evaluation neuer Entwicklungen bei alternativen thermischen Abfallbehandlungsanlagen mit dem Schwerpunkt Verölungsverfahren, Texte 77/2018, Dessau-Roßlau, 2017.
- [21] Vogel J., Krüger, F., Weißhaupt, P.: Thermochemisches Recycling – ein Ansatz zur Verwertung von Kunststoffabfällen? in: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Quicker, P.; Gosten, A. (Hrsg.), Energie aus Abfall, Band 17, S. 93–104, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin 2020.
- [22] Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriegesetz – BattG) vom 25. Juni 2009 (BGBl. I S. 1582), das zuletzt durch Artikel 6 Absatz 10 des Gesetzes vom 13. April 2017 (BGBl. I S. 872) geändert worden ist, <http://www.gesetze-im-internet.de/battg/>.

- [23] Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen (Altfahrzeug-Verordnung – AltfahrzeugV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Juni 2002 (BGBl. I S. 2214), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 2. Dezember 2016 (BGBl. I S. 2770) geändert worden ist, <http://www.gesetze-im-internet.de/altautov/>.
- [24] Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG) vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1739), das zuletzt durch Artikel 16 des Gesetzes vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966) geändert worden ist, http://www.gesetze-im-internet.de/elektrog_2015/.
- [25] Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen (Verpackungsverordnung – VerpackV) vom 21. August 1998 (BGBl. I S. 2379), zuletzt geändert durch Artikel 11 Absatz 10 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2745).



► **Unsere Broschüren als Download**
Kurzlink: bit.ly/2dowYYI

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.twitter.com/umweltbundesamt
 www.youtube.com/user/umweltbundesamt
 www.instagram.com/umweltbundesamt/