

Hintergrund

Plastik – Radikales Umdenken nötig



Inhalt

Zusammenfassung zum Hintergrundpapier	4
1 Definitionen, Einordnung, wesentliche Stoffströme	8
1.1 Definitionen	8
1.2 Wesentliche Anwendungsfelder	10
2 Besonders problematische Polymere und Anwendungen	11
2.1 Besonders problematische Polymere	11
2.2 Umweltoffene Anwendungen von Polymeren	12
3 Relevante Stoffströme	17
3.1 Produktabfälle	17
3.2 Verluste in Logistik und im Einsatz	19
4 Mikroplastik	21
4.1 Definition Mikroplastik	21
4.2 Warum ist Mikroplastik gefährlich?	21
4.3 Mengen und Eintragspfade	22
4.4 Ansatzpunkte zur Vermeidung von Mikroplastik	23
5 Zusammenhänge mit Klima und Biodiversität	24
5.1 Plastik als Treiber des Klimawandels	24
5.2 Auswirkungen der Plastikverwendung auf Biodiversität und Gesundheit	26
6 Additive und Begleitstoffe als zentrales Umweltproblem	31
6.1 Umwelt- und gesundheitsrelevante Additive	33
6.2 Verwendung problematischer Flammschutzmittel verringern	37
6.3 Defizite bei der Regulierung von Additiven	38
6.4 Anforderungen an das Recycling	40
7 Recycling von Kunststoffen	45
7.1 Möglichkeiten und Grenzen des stofflichen Recyclings	45
7.2 Sinn und Unsinn des chemischen Recyclings (für Synthesegrundstoffe)	48

8	Szenarien zur Reduktion der Stoffströme	51
	8.1 Status von Plastikproduktion und Plastikabfall	51
	8.2 Das „Weiter so“ Szenario (business as usual)	52
	8.3 Alternative Szenarien für weniger Produktion, Abfall und Umwelteinträge	52
	8.4 Wirksame Reduktion des Plastikverbrauchs	55
9	Forderungen	56
	9.1 Für ein nachhaltiges Stoffstrommanagement von Kunststoffen	56
	9.2 Forderungen an die Politik	57
	9.3 Für ein Globales Plastikabkommen	59
	9.4 Forderungen im Hinblick auf die Forschungs- und Bildungspolitik	61
10	Glossar	63
11	Literatur	66

Zusammenfassung zum Hintergrundpapier

Plastik ist ein allgegenwärtiges Material, das in vielen Bereichen des täglichen Lebens verwendet wird. Die weltweite Produktion von Kunststoffen beträgt aktuell rund 460 Millionen Tonnen pro Jahr.

Plastik hat weitreichende Wirkungen auf Ökosysteme und die menschliche Gesundheit. Plastikprodukte setzen während ihrer Lebensdauer Treibhausgase frei, die zum Klimawandel beitragen. Zudem sind viele Kunststoffe langlebig (persistent) und schwer biologisch abbaubar, was zu einer Anreicherung in der Umwelt führt. Besonders problematisch sind Mikroplastikpartikel, die durch den Zerfall größerer Kunststoffteile entstehen und von Organismen aufgenommen werden können. Mikroplastik-Partikel sind auch in vielen Produkten enthalten.

Darüber hinaus enthalten Kunststoffe oft toxische Additive wie Weichmacher und Flammschutzmittel, die sich in der Umwelt anreichern und langfristige Schäden verursachen können. Sie sind auch eine Gefahr für das werkstoffliche Recycling, weil dabei die oft unbekannt Additive in neue Produkte übergehen können. Auch die Belastung der Innenraumluft durch Kunststoffpartikel beziehungsweise die Ausdünstungen von Kunststoffen in Möbeln, Textilien oder Bodenbelägen stellt ein Risiko dar.

Ein weiteres großes Problem ist das ungenügende und ineffiziente Recycling von Kunststoffen, das oft zu Qualitätsverlusten führt und die Menge an Plastikmüll in der Umwelt erhöht.

FORDERUNGEN FÜR EIN RADIKALES UMDENKEN

Der BUND fordert daher ein radikales Umdenken beim Thema Plastik. Die Forderungen werden im Kapitel 9 ausführlich dargestellt. Die Wesentlichen Ansatzpunkte und Forderungen für einen nachhaltigeren Umgang mit Plastik sind:

Kunststoffeinsatz beschränken

Bevor Kunststoffe zum Einsatz kommen, muss geprüft werden, wozu sie überhaupt notwendig sind. Sie sollten nur dann eingesetzt werden, wenn sie einen klaren Nutzen für Umwelt und Gesellschaft bringen. Anwendungen ohne wesentlichen Zweck oder mit kurzer Lebensdauer sind möglichst zu vermeiden. Wo es möglich ist, sollten natürliche Alternativen wie Holz oder Naturfasern verwendet werden – vorausgesetzt, sie gefährden durch den dafür notwendigen Flächenverbrauch nicht die biologische Vielfalt und die Lebensmittelsicherheit. Wird der Einsatz von Plastik als sinnvoll bewertet, ist sicherzustellen, dass die Kunststoffe möglichst wiederverwendbar sind oder zumindest werkstofflich recycelt werden können. Dafür müssen gesetzliche Regelungen geschaffen werden.

Begrenzte Zahl an Standard-kunststoffen und Additiven

Um dieses Ziel zu erreichen, braucht es klare Standards: Eine begrenzte

Zahl an umweltverträglichen Standardkunststoffen mit bekannten Additiven soll europaweit definiert und regelmäßig überprüft werden, damit derartige Kunststoffprodukte nach der Nutzung gut sortiert und hochwertig wiederverwendet werden können.

Kurzlebige Anwendungen beschränken und Kunststoffabgabe

In der Gesetzgebung auf nationaler und europäischer Ebene sind Vorgaben zu schaffen, die kurzlebige und potenziell umweltschädliche Anwendungen deutlich einschränken. Für Kunststoffe, deren Nutzungsdauer unter einem Jahr liegt, muss ein Zulassungsverfahren durchgeführt werden. Der gesellschaftliche Nutzen muss dargelegt, Alternativen geprüft und ein Konzept für Recycling und Schadstofffreiheit vorgelegt werden. Falls ein Hersteller diese Anforderungen nicht erfüllt, ist eine Kunststoffabgabe im Sinne einer erweiterten Herstellerverantwortung fällig, deren Höhe sich nach dem Grad der Nichterfüllung richtet.

Kunststoffe in Landwirtschaft und Boden minimieren

Offene Kunststoffanwendungen, wie etwa Mulchfolien oder Bodenhilfsstoffe, müssen minimiert werden. Die Einträge von Mikro- und Nanoplastik, insbesondere durch Abrieb oder Zerfall von Produkten müssen dringend reduziert werden. Der Einsatz von flüssigen oder wasserlöslichen Kunststoffen – insbesondere Hydrogelen – ist deutlich zu beschränken, vor allem bei direktem Eintrag in die Umwelt.

Bewertung und Regulierung von Kunststoffen und Additiven

Kunststoffprodukte, vor allem solche, die mit Lebensmitteln oder Kindern in Kontakt kommen, dürfen keine Schadstoffe enthalten. Um Risiken besser erkennen zu können, sollen Kunststoffe analog zu allen anderen Chemikalien umfassend auf ihre Wirkung auf Mensch, Tier und Umwelt geprüft werden – auch unter Einbeziehung möglicher Transformationsprodukte von Additiven oder Ausgasungen.

Gefährliche Additive verbieten

Gefährliche Inhaltsstoffe und Additive müssen verboten werden, sofern keine zwingende gesellschaftliche Notwendigkeit für ihren Einsatz vorliegt. Solche Ausnahmen sollten nur befristet gewährt und regelmäßig überprüft werden. Um hochwertiges werkstoffliches Recycling zu ermöglichen, ist die Vielfalt der Additive deutlich zu begrenzen und eine transparente Liste erlaubter Additive zu erstellen.

Herstellerverantwortung für das Recycling von Kunststoffen

Die Verantwortung für das Recycling liegt beim Hersteller. Er muss sicherstellen, dass die verwendeten Kunststoffe nach der Nutzung hochwertig verwertet werden. Der Einsatz von Rezyklat muss nach dem Stand von Wissenschaft und Technik maximiert werden.

Vorrang des werkstofflichen Recyclings

Werkstoffliches Recycling ist stets einer chemischen oder thermischen Verwertung oder einer Kompostierung

vorzuziehen. Kompostierung, Pyrolyse und andere thermochemische Verfahren dürfen nur eingesetzt werden, wenn Vermeidung, Wiederverwendung und werkstoffliches Recycling nicht sinnvoll sind. Die verbleibenden Reste – auch aus den Recyclingprozessen selbst – müssen umweltverträglich entsorgt und eine Schadstoffverschleppung vermieden werden.

Keine fossilen Rohstoffe und Umweltbewertung

Um die Klimaziele zu erreichen, dürfen Kunststoffe spätestens ab dem Erreichen des Treibhausgas-Restbudgets nur noch aus nicht-fossilen Quellen stammen. Für alle Kunststoffproduktklassen soll eine unabhängige Umweltbewertung erfolgen, die neben der Klimawirkung auch ihre Langlebigkeit und potenzielle Gefahren berücksichtigt.

Mikroplastik regulieren und minimieren

Die Produktion, Nutzung und das Inverkehrbringen von primärem Mikroplastik soll verboten werden. Der Eintrag von sekundärem Mikroplastik, das aus dem Abrieb oder Zerfall von Kunststoffprodukten entsteht, ist über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu minimieren. Besonders problematische Einträge von Mikroplastik müssen an der Quelle vermieden werden.

Gleiche Anforderungen für Biokunststoffe

Auch für sogenannte „Bio“-Kunststoffe gelten alle genannten Anforderungen, da ihre Umweltverträglichkeit häufig nicht gegeben ist.

Globales Plastikabkommen mit klarem Reduktionsziel

Ein globales Plastikabkommen muss den gesamten Lebenszyklus von Kunststoffen abdecken, verbindliche Ziele zur Reduktion der Plastikproduktion enthalten, ein wirksames Abfallmanagement fordern, verbindliche Recyclingquoten festlegen und gefährliche Chemikalien im Zusammenhang mit Kunststoffen weltweit regulieren.

Transparenz und Sicherheit für Plastikprodukte auf internationaler Ebene

Sicherheit und Nachhaltigkeit müssen international einheitlich bewertet werden, bevor Produkte auf den Markt kommen. Unternehmen müssen offenlegen, welche Kunststoffbestandteile sie einsetzen. Besonders betroffene Länder und Regionen benötigen finanzielle und technische Unterstützung. Eine unabhängige wissenschaftliche Begleitung ist notwendig, um Fortschritte zu überprüfen und Interessenkonflikte zu vermeiden.

Unabhängige Forschung zu Umweltbelastungen durch Kunststoffe

Im Bereich Forschung und Bildung besteht weiterhin großer Handlungsbedarf durch die Politik. Unabhängige Forschung zur Vermeidung von Umwelteinträgen, zur Entwicklung schadstoffarmer Alternativen und zu recyclingfähigen Massenkunststoffen muss gezielt gefördert werden – auch mit Mitteln aus einer Kunststoffabgabe.

Nachhaltigkeit von Kunststoffen in Studiengänge integrieren

In Studium und Ausbildung sind nachhaltige Chemie, Produktentwicklung, Lebenszyklusanalyse und Stoffstrommanagement verbindlich zu verankern.

Bildung zum nachhaltigen Umgang mit Kunststoffen

Schulen und Weiterbildungseinrichtungen sollen den verantwortungsvollen Umgang mit Kunststoffen behandeln. Die Curricula sind dafür entsprechend anzupassen.

Informationsfreiheit und Verbraucherinformation

Der Zugang zu geprüften Informationen über Nachhaltigkeit und Schadstoffe in Kunststoffen muss für Verbraucherinnen und Verbraucher verbessert werden. Herstellende Unternehmen müssen die relevanten Daten offenlegen, damit fundierte Entscheidungen möglich sind.

→ **Schauen Sie auch auf die Forderungen im Detail in Kapitel 9.**

1 Definitionen, Einordnung, wesentliche Stoffströme

1.1 DEFINITIONEN

Seit gut 100 Jahren gibt es Kunststoffe. Dies sind chemisch hergestellte Verbindungen, die es in dieser Form vorher in der Umwelt nicht gab. Kunststoffe werden aufgrund der plastischen Verformbarkeit auch Plastik genannt. Die weltweite Produktion von Kunststoffen beträgt aktuell rund 460 Millionen Tonnen pro Jahr [OECD 2022b].

Kunststoffe bestehen aus langen Ketten von immer wiederkehrenden identischen chemischen Bausteinen. Diese Bausteine werden als Monomere bezeichnet. Die Ketten, die daraus entstehen heißen dann Polymere, da in ihnen die einzelnen Bausteine vielfach (= poly) vor-

kommen. Die fachlichen Bezeichnungen der Kunststoffe beginnen daher alle mit dem Wortteil „Poly“, dem dann die chemische Bezeichnung des Einzelbausteins (Monomer) folgt. Polyethylen oder Polypropylen sind beispielsweise die Bezeichnungen von zwei viel verwendeten Kunststoffen.

Viele Kunststoffe können durch Erwärmung wieder plastisch verformt werden. Wenn es gelingt, diese Thermoplaste sortenrein zu erhalten, dann können sie gut recycelt werden. Aus Kunststoffabfällen können so beispielsweise durch das sogenannte mechanische Recycling über die Schmelze neue Produkte hergestellt werden. Da verschiedene Kunststoffe nur

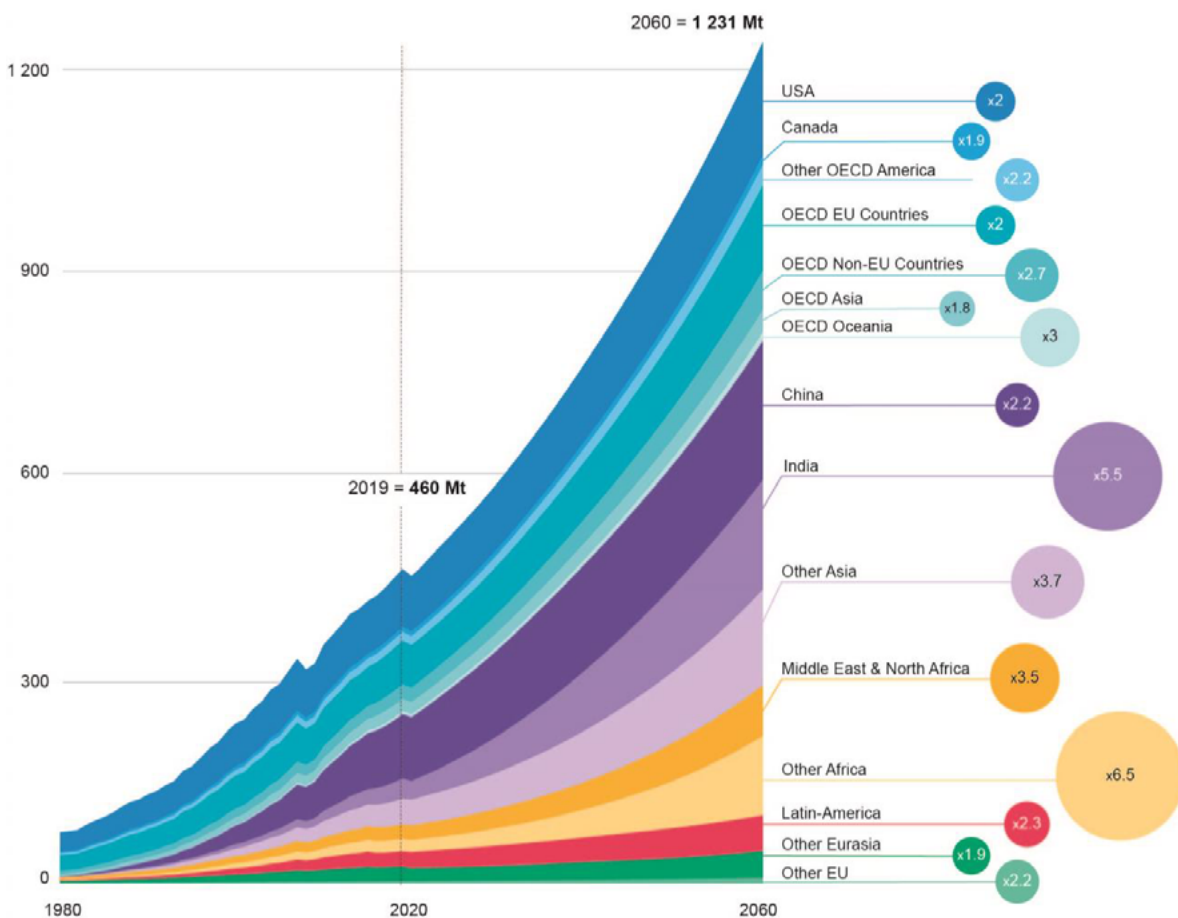


Abbildung 1: Weltweite Produktion von Kunststoffen [OECD 2022b]

wenig untereinander verträglich sind, gelingt ein hochwertiges mechanisches Recycling aber nur, wenn man ausschließlich einheitliche Polymere als Grundlage nimmt. Aus Mischkunststoffen erhält man entweder keine nutzbaren Produkte oder nur Produkte mit deutlich verminderter Qualität.

Ein Teil der Kunststoffe lässt sich nach erneuter Erhitzung nicht mehr plastisch verarbeiten. Diese Kunststoffe werden als Duroplaste bezeichnet. Sie entstehen meist dadurch, dass die langen Einzelketten der eingesetzten Kunststoffe während der Verarbeitung miteinander reagieren und dadurch dreidimensional vernetzte Kunststoffe oder Harze entstehen. Dies ist beispielsweise bei Tischplatten, Lacken, manchen Hartkunststoffen oder Matratzen der Fall. Auch die Gruppe der Elastomere lässt sich nach der Herstellung nicht aufschmelzen. Die Elastomere sind ebenfalls durch Bindungen zwischen den Polymerketten vernetzt und zeichnen sich durch eine hohe Elastizität aus. Sie verformen sich bei Belastung elastisch, um nach der Entlastung wieder in ihre ursprüngliche Form zurückzukehren. Sie befinden sich in Gummibändern, Autoreifen, Sportböden und vielen weiteren Materialien. Ein Recycling durch plastische Verformung bei höheren Temperaturen ist bei Duroplasten und Elastomeren nicht möglich. Sie zersetzen sich ab einer für den jeweiligen Kunststoff spezifischen Temperatur.

Die besonders häufig verwendeten Kunststoffe Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) und Polyvinylchlorid (PVC) haben alle eine durchgehende Kohlenstoffkette. Sie unterscheiden sich durch die Seitengruppen an diesen Ketten. Dabei enthält Polystyrol aromatische Gruppen und Polyvinylchlorid enthält Chlor. Polyethylen, Polypropylen, Polystyrol findet man oft in Verpackungen aber auch Flaschen, und weiteren technischen Produkten.

Aus Polystyrol werden aber auch Dämmstoffe (Handelsname: Styropor) hergestellt. Aus Polyvinylchlorid werden viele Bauprodukte wie Abflussrohre oder Fensterrahmen hergestellt. Aber auch die Verschlüsse von Kunststoffflaschen sind aus PVC hergestellt.

Die Gruppe der Polyamide (PA), oft unter dem Markennamen Nylon bekannt, zeichnet sich dadurch aus, dass die Kohlenstoffkette regelmäßig durch stickstoffhaltige Amidgruppen durchsetzt ist. Polyamide werden zu einem großen Teil zu Fasern verarbeitet, die in Textilien für Bekleidung aber auch in der Fischerei sowie für Zelte und Fallschirme verwendet werden. Aus Polyamiden werden aber auch Dübel, Gehäusebauteile oder Zahnräder hergestellt.

Eine weitere wichtige Gruppe von Kunststoffen sind die Polyester. Sie enthalten in regelmäßigen Abständen sauerstoffhaltige Estergruppen in den Kohlenstoffketten. Ein wichtiger Vertreter aus dieser Gruppe ist Polyethylenterephthalat (PET) aus dem sowohl Textilien als auch Getränkeflaschen (Einweg- und Mehrweg) hergestellt werden.

In Deutschland werden die größten Mengen der Kunststoffe als Verpackungsabfälle oder über den gelben Sack wieder eingesammelt. Einige Kunststoffe landen aber auch wieder in der Umwelt, wie man in Parks, an den Straßenrändern oder an Stränden und in Bächen sehen kann. Bei der Anwendung von Kunststoffen direkt in der Umwelt wie beispielsweise bei Autoreifen, Fischernetzen, Folientunneln oder Mulchfolien in der Landwirtschaft lässt es sich kaum vermeiden, dass ein Teil der Kunststoffe in der Umwelt verbleibt. Dies geschieht einerseits, da sich Teile lösen und andererseits dadurch, dass die meisten Kunststoffe unter Einfluss von Sonnenlicht, Temperaturschwankungen und mechanischem Abrieb schnell

spröde werden und in kleinere Teile bis hin zu Mikro- und Nanoplastik zerbröseln. Solche umweltoffenen Anwendungen sind daher besonders problematisch.

1.2 WESENTLICHE ANWENDUNGSFELDER

Die Aufteilung der in Deutschland produzierten Kunststoffe pro Jahr ist in der nachfolgenden Grafik aufgeführt.

Rund 40 % der in Deutschland hergestellten Kunststoffe werden im Bereich der Verpackungen eingesetzt. Gerade im Bereich der Verpackungen findet sich eine Reihe von Anwendungsbereichen, auf die durch den Verkauf von loser Ware ganz verzichtet werden kann oder die sehr gut durch Mehrwegsysteme ersetzt werden können.

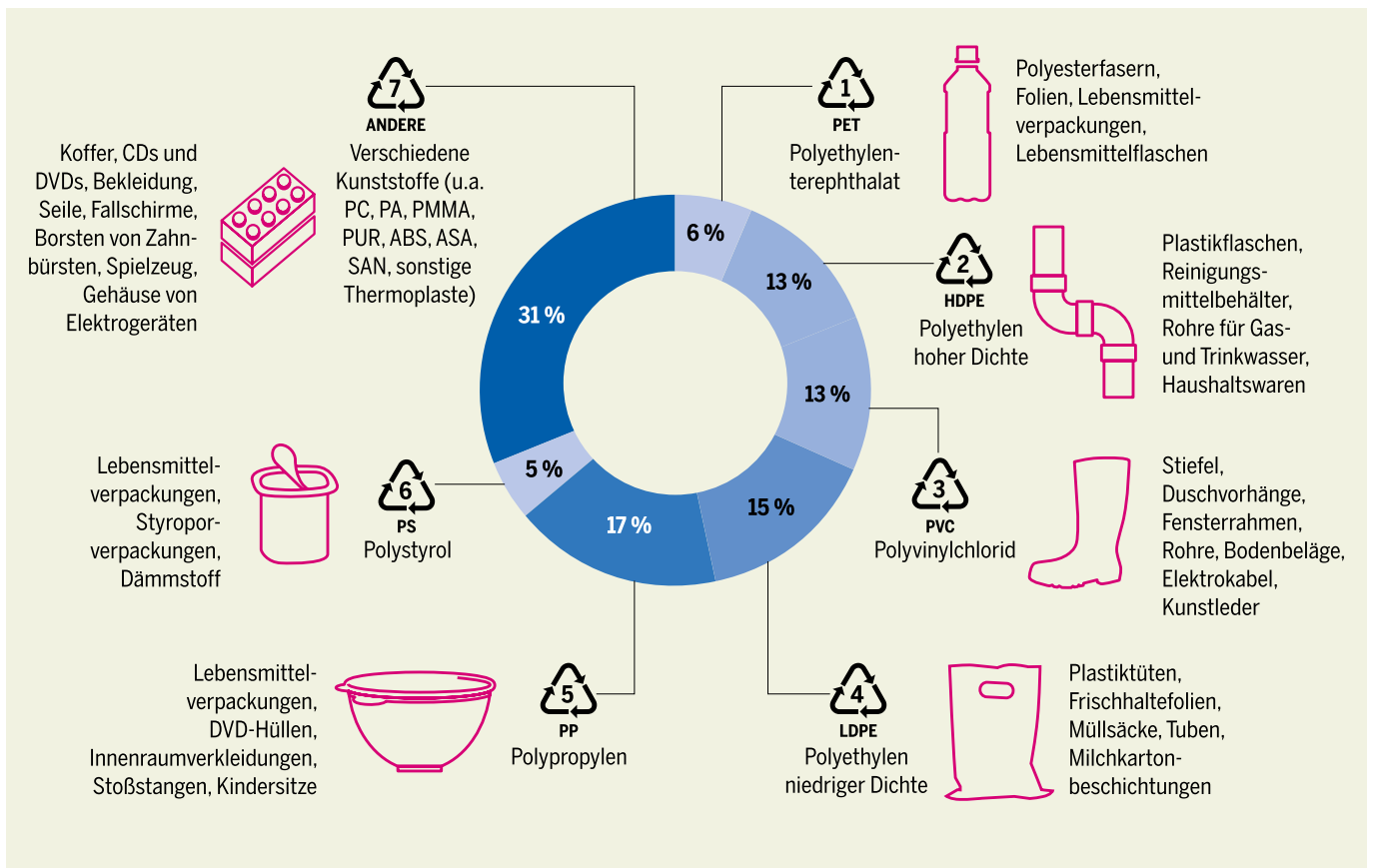


Abbildung 2: In 2017 wurden in Deutschland rund 17 Millionen Tonnen Kunststoffe produziert Grafik: PLASTIKATLAS | Appenzeller/Hecher/Sack, CC BY 4.0

2 Besonders problematische Polymere und Anwendungen

Einige Polymere sind besonders problematisch. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn es für deren Struktur keine Entsprechungen in der natürlichen Umwelt gibt. Das kann dazu führen, dass diese Kunststoffe noch schlechter abbaubar sind als andere Kunststoffe. Dies betrifft insbesondere Polymere mit Halogenatomen in den Seitenketten. Hier werden für diese Stoffgruppen zwei Beispiele exemplarisch behandelt. Weiterhin sind insbesondere Anwendungen von Kunststoffen direkt in der Umwelt problematisch.

2.1 BESONDERS PROBLEMATISCHE POLYMERE

Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid (PVC) ist einer der weltweit am häufigsten verwendeten Kunststoffe und wird aufgrund seiner Vielseitigkeit in zahlreichen Anwendungen eingesetzt. Zu den Hauptverwendungsbereichen zählen Bauprodukte wie Fensterrahmen, Rohre und Bodenbeläge, Verpackungsmaterialien, Spielwaren sowie medizinische Produkte wie Schläuche und Blutbeutel. PVC hat wirtschaftlich eine große Bedeutung und ist gleichzeitig aus ökologischer Sicht äußerst problematisch.

Die Herstellung von PVC basiert auf Ethen (aus Erdöl) und Chlor und erfordert insbesondere bei Weich-PVC den Einsatz zahlreicher Zusatzstoffe wie Weichmacher (z. B. Phthalate), Stabilisatoren (z. B. Schwermetalle wie Blei oder Zinnverbindungen) und Flammschutzmittel (s. 5.3). Bereits in der Produktionsphase entstehen erhebliche Umweltbelastungen, darunter die Freisetzung von Chlorwasserstoff, Vinylchlorid und potenziell hochtoxischen Dioxinen, die als Nebenprodukte entstehen und in der Umwelt persistent sind [Thornton 2001].

Ein großes Problem stellt auch die Entsorgung von PVC dar. Das stoffliche Recycling ist nur eingeschränkt möglich, da alt-PVC meist inzwischen verbotene Cadmium- oder Bleiverbindungen als Stabilisatoren enthält [Friege et al. 2018, Borgmann et al. 2019, Lahl & Zeschmar-Lahl 2024]. Bei der Verbrennung von PVC wird das enthaltene Chlor freigesetzt, das das chemische Recycling (siehe Kapitel 7) und auch die energetische Verwertung in Zementwerken massiv stört. Weiterhin können giftige Dioxine freigesetzt werden, die nicht nur die Umwelt, sondern auch die menschliche Gesundheit schädigen. Zudem erschwert die Vielfalt der verwendeten Additive das Recycling erheblich (s. 5.6), sodass PVC häufig deponiert oder unsachgemäß entsorgt wird. Dabei gelangen schädliche Stoffe wie Phthalate in Boden und Grundwasser, wo sie über lange Zeit hinweg umweltschädlich wirken können [Rahman & Brazel 2004].

Gesundheitlich ist PVC ebenfalls bedenklich. Die als Weichmacher enthaltenen Phthalate lösen hormonelle Störungen aus, während Schwermetalle in Stabilisatoren neurotoxisch wirken [Thornton, 2001]. Trotz technischer Möglichkeiten wird PVC nur selten recycelt, und die Umweltbelastungen durch seine persistente Natur bleiben ungelöst.

Fluorpolymere (PFAS)

Eine weitere Gruppe problematischer Kunststoffe sind Fluorpolymere, die zu den sogenannten per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) gehören. PFAS sind extrem persistent und haben in vielen Fällen stark toxische Eigenschaften [Brunn et al., 2023, Grandjean et al., 2015]. PFAS zeichnen sich auch durch ihre einzigartigen chemischen Eigenschaften aus, darunter hohe Beständigkeit gegenüber Hitze,

Chemikalien, Wasser und Fett. Zu den bekanntesten Vertretern zählt Polytetrafluorethylen (PTFE, bekannt als Teflon), das unter anderem für Antihaftbeschichtungen, Dichtungen und Kabelummantelungen eingesetzt wird.

PFAS werden oft als „Forever Chemicals“ bezeichnet, da sie in der Umwelt extrem persistent sind und sich nicht biologisch abbauen. Weltweit sind PFAS-Kunststoffe und die damit verbundenen Chemikalien aus Herstellung und Entsorgung mittlerweile allgegenwärtig in Luft, Wasser, Böden und menschlichem Gewebe nachweisbar.

Alle Fluorpolymere sind mit erheblichen Umwelt- und Gesundheitsbelastungen verbunden, vor allem in der Produktionsphase (die mit erheblichen Emissionen toxischer nicht-polymerer PFAS verbunden ist) und der Abfallphase (in der eine Zersetzung zu niedermolekularen, problematischen PFAS stattfinden kann). Die Behauptung, dass die OECD die Fluorpolymere als »polymers of low concern« bezeichnet habe, ist unzutreffend. Die vergleichsweise geringen Risiken, die mit einigen Fluorpolymeren in der Gebrauchsphase verbunden werden, sind angesichts der Risiken bei Produktion und Entsorgung kein Argument, Fluorpolymere von der Regulierung auszunehmen [Brunn et al. 2023]. Die von einigen Industrie-Verbänden vorgebrachten Behauptungen, diese Gefährdungen im Lebenszyklus seien gelöst, sind wissenschaftlich nicht dokumentiert. Im Gegenteil, wissenschaftliche Publikationen belegen die PFAS-Emissionen in Verbindung mit der Produktion von Fluorpolymeren: Die Umgebungen der europäischen Standorte der Fluorpolymerproduktion sind großräumig und massiv mit PFAS kontaminiert.

Zweifelsfrei existieren mehrere industrielle Anwendungen polymerer PFAS, die auch für die weitere technologische Entwicklung in der EU im Sinne einer nachhaltigen Transformation von großer Bedeutung sind und derzeit unverzichtbar erscheinen. Diese Stoffe lassen sich ohne Probleme in den vorhandenen Regulierungsansatz der ECHA integrieren, indem sie eine befristete Verlängerung des Übergangszeitraumes bis zum Eintreten der Beschränkung bekommen, welche die (Weiter-)Entwicklung von umweltverträglicheren Alternativen erlaubt und befördert. Anwendungen, für die es bereits verfügbare Alternativen gibt, sollten jedoch schnell verboten werden. Zusätzlich erschwert die fehlende Infrastruktur für die sichere Entsorgung oder das Recycling polymerer PFAS die Bewältigung dieses Problems.

Sowohl PVC als auch polymere PFAS sind aus ökologischer und gesundheitlicher Perspektive kritisch zu bewerten. Die Persistenz dieser Kunststoffe sowie ihre problematischen Eigenschaften – von der Produktion über die Nutzung bis hin zur Entsorgung – erfordern dringend umfassendere Regulierungen und die Entwicklung nachhaltiger Alternativen. Insbesondere müssen Innovationen im Bereich Recycling und die Erforschung ungefährlicher Substitutionsstoffe vorangetrieben werden, um die langfristigen Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit zu minimieren. Es wird geschätzt, dass allein in den USA die Verwendung von PFAS in Kunststoffen Gesundheitskosten von 22,4 Milliarden US Dollar jedes Jahr verursacht.

2.2 UMWELTOFFENE ANWENDUNGEN VON POLYMEREN

Polymere finden in zahlreichen Anwendungen Einsatz, bei denen sie bewusst oder unbeabsichtigt in die Umwelt gelangen. Neben festen Kunststoffen sind insbesondere flüssige und wasserlösliche Polymere von Interesse, die in

landwirtschaftlichen, industriellen oder alltäglichen Prozessen verwendet werden. Diese umweltoffenen Anwendungen stellen aus ökologischer Sicht eine besondere Herausforderung dar, da Kunststoffe in der Umwelt meist schwer abbaubar sind.

2.2.1 Feste Polymere in umweltoffenen Anwendungen

Einige feste Kunststoffe werden häufig in Anwendungen eingesetzt, die eine direkte Exposition zur Umwelt mit sich bringen. Beispiele sind:

Mulchfolien in der Landwirtschaft:

Mulchfolien aus Polyethylen (PE) oder biologisch abbaubaren Polymeren werden genutzt, um Unkrautwachstum zu hemmen und die Bodentemperatur zu regulieren. Konventionelle Folien verbleiben oft als Mikroplastik im Boden, während biologisch abbaubare Alternativen eine (sehr) langsame Zersetzung aufweisen. Es gibt aber auch Mulchfolien, die zurückgeholt und mehrfach eingesetzt sowie recycelt werden können [Initiative ERDE 2022].

Für diverse Einsatzbereiche werden bioabbaubare Kunststoffe propagiert, die am Ende ihrer Lebensdauer in der Umwelt verbleiben können. Ein Beispiel für eine solche bewusst offene Kunststoffanwendung ist die Verwendung von **Mulchfolien** in der Landwirtschaft, für die prinzipiell nachvollziehbare Argumente wie Saisonverlängerung und Pestizidreduzierung sprechen. Nicht abbaubare Kunststofffolien wie Polyethylen müssen nach dem Einsatz geborgen werden und beinhalten ein hohes Mikroplastikpotenzial. So nimmt der Einsatz von Folien auf Basis von PLA-Blends oder PBAT, einem sehr langsam biologisch abbaubarem Copolyester, zu. Bisherige Standards zum toxikologischen Einfluss bioabbaubarer Kunststoffe sind lückenhaft. Mit der Norm DIN EN 17033-2018 [DIN 2018] sind seit wenigen

Jahren u.a. Toxizitätsprüfungen an bioabbaubaren Mulchfolien für Regenwürmer und Mikroorganismen vorgesehen. Eine umfangreiche Studie zum toxikologischen Einfluss von PE und PLA-PBAT bietet [Weltmayer & Roß-Nickoll 2024].

Erosionsschuttmatten:

Matten aus Polypropylen (PP) oder Polyvinylalkohol (PVA) werden zur Bodenstabilisierung eingesetzt. Wenn diese nicht entfernt werden, verbleiben Kunststoffreste in der Umwelt [Hayes et al. 2019].

Kunststoffe für Kunstrasen und Reitplätze:

Aus Kunstrasenplätzen können Kunststoffgranulate, oft aus Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuke EPDM oder Styrol-Butadien-Kautschuk SBR, durch Regenwasser ausgewaschen werden und als Mikroplastik in die Umwelt gelangen. Geschätzte 60 % aller Reitplätze enthalten ebenfalls Kunststoffgranulate: Als Zuschlagstoffe im Sand werden Vlieshäcksel in Mengen von 1 bis 5 kg/m² eingesetzt [Ehret 2023]. In den letzten Jahren wurden bereits teilweise umweltfreundliche Ersatzstoffe, wie Füllstoffe auf Basis von Nussschalen oder Kokosfasern, für Kunstrasen und Reitplätze entwickelt und eingesetzt.

Obwohl er bisher wenig öffentliche Aufmerksamkeit erhalten hat, ist der Landwirtschaftssektor einer der wichtigsten Nutzer von absichtlich zugesetztem Mikroplastik. Dieses gelangt durch die Anwendung von kunststoffbeschichteten Düngemitteln und Pestiziden in die Umwelt und eine der direktesten und vermeidbarsten Quellen der zunehmenden Mikroplastikverschmutzung in landwirtschaftlichen Böden. Diese Art der Verwendung von Pestiziden nimmt zu, da die Hersteller die „kontrollierte Freisetzung“ als Schlüssel zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft vermarkten. So gelangt Mikroplastik in weitere entlegene Gegenden

und akkumuliert sich weiter in der Umwelt und Menschen, die in der Landwirtschaft arbeiten, atmen es ein [CIEL 2022].

2.2.2 Flüssige und wasserlösliche Polymere

Wasserlösliche Polymere werden in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, bei denen sie bewusst in die Umwelt eingebracht oder freigesetzt werden. Solche Anwendungsfälle können insbesondere dann problematisch sein, wenn es sich um sehr langlebige (persistente) Polymere handelt. Selbst wenn jetzt noch keine direkten Umweltschäden beschrieben sind, so könnten diese Stoffe doch auf lange Sicht problematisch sein und sind dann nicht mehr rückholbar. Beispiele sind:

Polyacrylamid (PAM):

PAM wird in der Landwirtschaft als "Bodenverbesserer" und in der Wasseraufbereitung eingesetzt. Es stabilisiert den Boden und reduziert die Erosion [Sojka et al. 2007].

Umweltproblematik: In PAM können bei der Herstellung Restmonomere wie Acrylamid verbleiben, die giftig und krebserregend sind und die Substanz kann für lange Zeit im Boden verbleiben.

Polyvinylalkohol (PVA):

PVA wird in der Textilverarbeitung, bei wasserlöslichen Verpackungen und als Trägerstoff in Reinigungsmitteln verwendet. PVA ist wasserlöslich, jedoch nur unter bestimmten Bedingungen biologisch abbaubar. In kalten oder sauerstoffarmen Umgebungen kann es langlebig sein.

Superabsorber (z. B. Polyacrylate):

Superabsorberpolymere werden in Hygieneprodukten wie Windeln und in der Landwirtschaft oder im Garten- und Landschaftsbau zur Wasserspeicherung eingesetzt [Buchholz & Gra-

ham 1997]. Polyacrylate sind schwer abbaubar und können langfristig in Böden verbleiben.

Die bewusste Freisetzung von Polymeren in die Umwelt erfordert eine genaue Bewertung ihrer Abbaubarkeit und ihrer potenziellen Umweltauswirkungen. Konventionelle Polymere wie Polyacrylamid oder Polyvinylalkohol sind nur unter spezifischen Bedingungen biologisch abbaubar und können in der Umwelt persistent sein. Regulatorische Maßnahmen, wie die EU-Bioabbaubarkeitsstandards oder internationale Normen für biologisch abbaubare Materialien, sind entscheidend, um die Umweltauswirkungen umweltoffener Anwendungen zu minimieren. Zusätzlich sollte die Forschung auf die Entwicklung neuer, umweltfreundlicher Polymere ausgerichtet sein, die sowohl funktionale Anforderungen erfüllen als auch vollständig abbaubar sind. So plädieren Lahl et al., konsequent bioabbaubare Polymere in den Anwendungsgebieten einzusetzen, bei denen es vorhersehbar zu Einträgen in die Umwelt, z. B. als Mikroplastik kommt [Lahl et al. 2025].

EXKURS BIOPLASTIK [BUND 2022]

Vor dem Hintergrund der Plastikkrise verknüpfen sich mit den sogenannten „Bio“-Kunststoffen eine Vielzahl von Erwartungen für eine nachhaltige Werkstoffnutzung: Es besteht die Hoffnung, fossile Rohstoffe durch nachwachsende zu ersetzen und durch die Bioabbaubarkeit von Kunststoffen zur Lösung der Abfallproblematik beizutragen. Diese Hoffnungen können sogenannte „Bio“-Kunststoffe jedoch nur sehr eingeschränkt erfüllen. Eine neutrale Diskussion zu Biokunststoffen wird auch dadurch erschwert, dass das Label

„Bio“ hier häufig als Marketingstrategie missbraucht und falsche Erwartungen bei Verbraucher*innen geweckt werden. Irreführend ist zudem u. a., dass die EG-Öko-Basisverordnung (Verordnung (EG) Nr. 834/2007) für die Begriffe Bio-, Öko-, biologisch und ökologisch definierte Kriterien für Agrarprodukte ansetzt, welche aber bei sogenanntem „Bio“-Plastik keine Anwendung finden.

Anders als beispielsweise bei Biobaumwolle, die aus kontrolliertem ökologischem Anbau stammt, entstammen die pflanzlichen Produkte, aus denen sogenannte „Bio“-Kunststoffe hergestellt werden, weitgehend der konventionellen Landwirtschaft.

In jedem Fall sind „Bio“-Kunststoffe keine einfache Lösung für die Plastikkrise, denn die momentan genutzten Mengen an (Einweg-) Kunststoffen auf fossiler Basis können und sollen durch „Bio“-Kunststoffe nicht komplett ersetzt werden, auch nicht zukünftig.

Eine konsistente Suffizienz-Politik, d. h. eine deutliche Verbrauchssenkung, ist daher Voraussetzung für den Erfolg von jeglichen weiteren Maßnahmen zur Lösung der Plastikkrise und bei der Debatte über „Bio“-Kunststoffe als mögliche „bessere Kunststoffe“ immer parallel mitzudenken und zu integrieren.

Noch ist der Markt der „Bio“-Kunststoffe klein: Europaweit machten sie im Jahr 2020 etwa 1 % des Kunststoffverbrauchs aus. Doch wie auch bei herkömmlichen Kunststoffen wächst die Produktion der „Bio“-Kunststoffe

beständig, zum Teil sogar deutlich stärker. Etwa die Hälfte der „Bio“-Kunststoffe wird derzeit für Verpackungen eingesetzt – bei den fossilen Kunststoffen sind es etwa 30 %, die für Verpackungen eingesetzt werden [European Bioplastics 2020]. Weitere maßgebliche „Bio“-Kunststoffanwendungen sind Landwirtschaftsfolien und Einweg-Konsumgüter wie Geschirr und Besteck. Prinzipiell sind verschiedene „Bio“-Kunststoffe jedoch auch zur Produktion hochwertiger Kunststoffbauteile (z. B. Möbel, technische Teile für Elektrotechnik und Automobilbau) geeignet.

In Anbetracht der heutigen Rahmenbedingungen sind „Bio“-Kunststoffe derzeit eine Scheinlösung für die Plastikkrise. Erstes Ziel als Antwort auf die Plastikkrise ist und bleibt die Vermeidung überflüssiger Kunststoffanwendungen, insbesondere im Verpackungs- und Einwegsektor. Aus Sicht des BUND lenkt die oft heiß geführte Debatte um den Einsatz und die potenziellen Vorteile von „Bio“-Plastik hauptsächlich vom eigentlich notwendigen Umbau im Verpackungs- und im Kunststoffsektor allgemein ab. Hier müssen Konsistenz (z. B. Mehrweg statt Einweg) und Suffizienz (geringere Mengen) stärker in den Fokus rücken. Nötige, verbindliche Vermeidungsziele müssen zudem mit Zielzahlen und Maßnahmen unterlegt werden, sonst bleibt es bei symbolischen Zielsetzungen.

Im zweiten Schritt muss das bereits im System befindliche Plastik tatsächlich hochwertig im Kreislauf geführt werden – dies schließt die prioritäre Wieder-

verwendung durch den breiten Einsatz von Mehrwegsystemen ein. Außerdem müssen alle produzierten Kunststoffprodukte nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch recyclingfähig sein. Hierzu ist weiter ein recyclinggerechtes Produktdesign anzustreben (Monomaterial, geeignete Farben, Demontierbarkeit etc.), um eine größtmögliche Rezyklatqualität zu gewährleisten.

„Bio“-Kunststoffe sollten nicht für Verpackungen eingesetzt werden, solange sie im aktuellen Markt nicht recycelt werden können. Das bedeutet für das Recycling von „Bio“-Kunststoffen, dass neben Drop-in-Polymeren, die mit den chemisch identischen Fraktionen herkömmlicher Kunststoffe recycelt werden können, eine Beschränkung auf wenige neue „Bio“-Kunststoffe angeraten ist, um deren Anteil zu erhöhen und so werkstoffliches Recycling wirtschaftlich zu ermöglichen. Zentral dafür sind auch entsprechende politische Anreize – insbesondere vor dem Hintergrund der Notwendigkeit einer sozial-ökologischen Transformation, in der Wirtschaftlichkeit nach heutigen Maßstäben nicht mehr das zentrale Kriterium für oder gegen eine Maßnahme sein kann.

Erst danach geht es darum zu entscheiden, ob und wo biobasierte Kunststoffe Polymere aus fossilen Rohstoffen sinnvoll ersetzen können. Es ist fraglich, ob Bioabbaubarkeit durch die Funktion bedingt tatsächliche Vorteile, z. B. in bodennahen landwirtschaftlichen Anwendungen, mit sich bringen kann. Dies ist von zentraler Bedeutung,

weil es sich bei der Kompostierung von bioabbaubaren Kunststoffen um eine reine Entsorgung handelt, die wiederum dem Gedanken der Kreislaufwirtschaft widerspricht. Zudem können Bezeichnungen wie „kompostierbar“ oder „biologisch abbaubar“ dazu führen, dass die Produkte vermehrt in der Umwelt landen, was äußerst kritisch zu bewerten ist.

Die Normen für alle „Bio“-Kunststoffe, insbesondere aber für jene für bioabbaubar zertifizierte, sollten zusätzlich um human- und ökotoxikologisch notwendige Tests ergänzt werden, insbesondere für mit den Kunststoffen unbeabsichtigt eingebrachte Stoffe (NIAS) sind (Öko-)Toxizitätsuntersuchungen notwendig. Zudem ist eine Harmonisierung der Normen bezüglich des Referenzmaterials erforderlich.

Im Übrigen ist der Landverbrauch zum Anbau von Pflanzen, aus denen „Bioplastik“ hergestellt werden kann, viel zu hoch, um einen relevanten Teil des aktuell produzierten fossilen Plastiks zu ersetzen [Helm et.al. 2025].

3 Relevante Stoffströme

Neben Kunststoffen mit (öko)toxikologischer Relevanz sollen hier Anwendungen betrachtet werden, in denen Stoffströme aufgrund ihrer großen Menge, der grundsätzlichen Umweltoffenheit oder wegen mangelnder Recyclingstrategien von besonderer Relevanz sind.

3.1 PRODUKTABFÄLLE

Im Jahr 2023 betrug die Gesamtmenge an in Deutschland erfassten Kunststoffabfällen ungefähr 6,35 Mio. t. [Conversio 2024]. Davon entfielen ca. 5,58 Mio. t. auf private und gewerbliche Post-Consumer-Abfälle (Bild 3). Eine der größten Gruppen bilden hier Leichtverpackungen („Gelber Sack“) mit einem Anteil von knapp 23 %. Bei Verpackungsabfällen ist von erheblichem „Littering“, also Wegwerfen von Abfällen im Straßenraum oder in der Landschaft, auszugehen, allein in Deutschland bis zu 2.500 t jährlich [Umweltbundesamt 2019].

Einen der größten Stoffströme bilden die Einwegverpackungen. Die Chemieindustrie in Deutschland ist der größte industrielle Verbraucher von Energie [BUND 2023]. Sie verbraucht ein Fünftel ihres gesamten Energiebedarfs für die Produktion von Einwegverpackungen. Ein Viertel des gesamten in Deutschland verbrauchten Kunststoffs wird für Verpackungen genutzt. Fast vier Millionen Tonnen wurden 2023 produziert [Conversio 2024].

Die Produktionsmengen im Bauwesen beliefen sich im Jahr 2017 auf 3,3 Mio. t., darunter Rohre, Profile und Dämmmaterialien. Für etliche Anwendungen haben sich Rücknahmesysteme und werkstoffliches Recycling etabliert. Dämmungen aus EPS-, XPS-Polystyrol und Polyurethan erfordern teils neue Recyclingwege; hier sind u.a. mechanisches Recycling und Solvolysenverfahren, bei denen die Polymerketten durch Lösemittel chemisch aufgespalten und

dadurch Monomere für die Neuproduktion von Kunststoffen erhalten werden, auf dem Vormarsch (siehe Kapitel 7). Spezielle Berichtspflichten bestehen zu Elektro- und Elektronikaltgeräten nach der WEER-Richtlinie. Hiernach betrug die Sammelquote im Jahr 2022 31,7 % [BMUV 2022].

Große Mengen an faserverstärkten Kunststoffen sind in Transportwesen, Infrastruktur, Rohrsystemen, sowie in Windkraftanlagen verbaut [Kühne et al., 2022, Composites United 2022]. In Europa wurden 2022 1,138 Mio. Tonnen duroplastische und 1,586 Mio. Tonnen thermoplastische Verbundkunststoffe produziert. Sie haben damit einen Anteil von rund 5 % an der Gesamtmenge der Kunststoffe in Europa. Insbesondere duroplastische Verbundkunststoffe sind im Recycling problematisch, da sich die Fasern kaum von den Kunststoffen trennen lassen. Beim Recycling carbonfaserverstärkter Kunststoffe werden mit Hilfe eines Pyrolyseverfahrens lediglich die teuren Kohlenstofffasern wiedergewonnen. Glasfaserverstärkte duroplastische Kunststoffe werden in Zementwerken als Ersatzbrennstoff sowie anschließend als Sandersatz im Zement verwertet. Eine Kreislaufführung wird zwar angestrebt, aber ein effizientes werkstoffliches Recycling ist nicht in Sicht.

Reifen sind neben ihrem erheblichen Abrieb (siehe Kapitel 6.2) auch als Produktabfälle problematisch. Als Gummiwerkstoffe werden sie in vielen Kunststoff-Statistiken nicht erfasst. In Deutschland werden jährlich über 500.000 t Altreifen gesammelt [AZUR 2025]; in vielen anderen Ländern wird häufig ungeregelt deponiert. Werkstoffliches Recycling besteht in der Herstellung von Gummigranulat, dessen Einsatzgebiete jedoch ebenfalls kritisch sind (z. B. Einstreu in Sportrasen). Es scheint sich

Kunststoffabfällen zur Verwertung nach Abfallströmen

HINTERGRUND: PLASTIK

Schematische Darstellung von Kunststoffabfällen zur Verwertung und Beseitigung nach Anfallorten

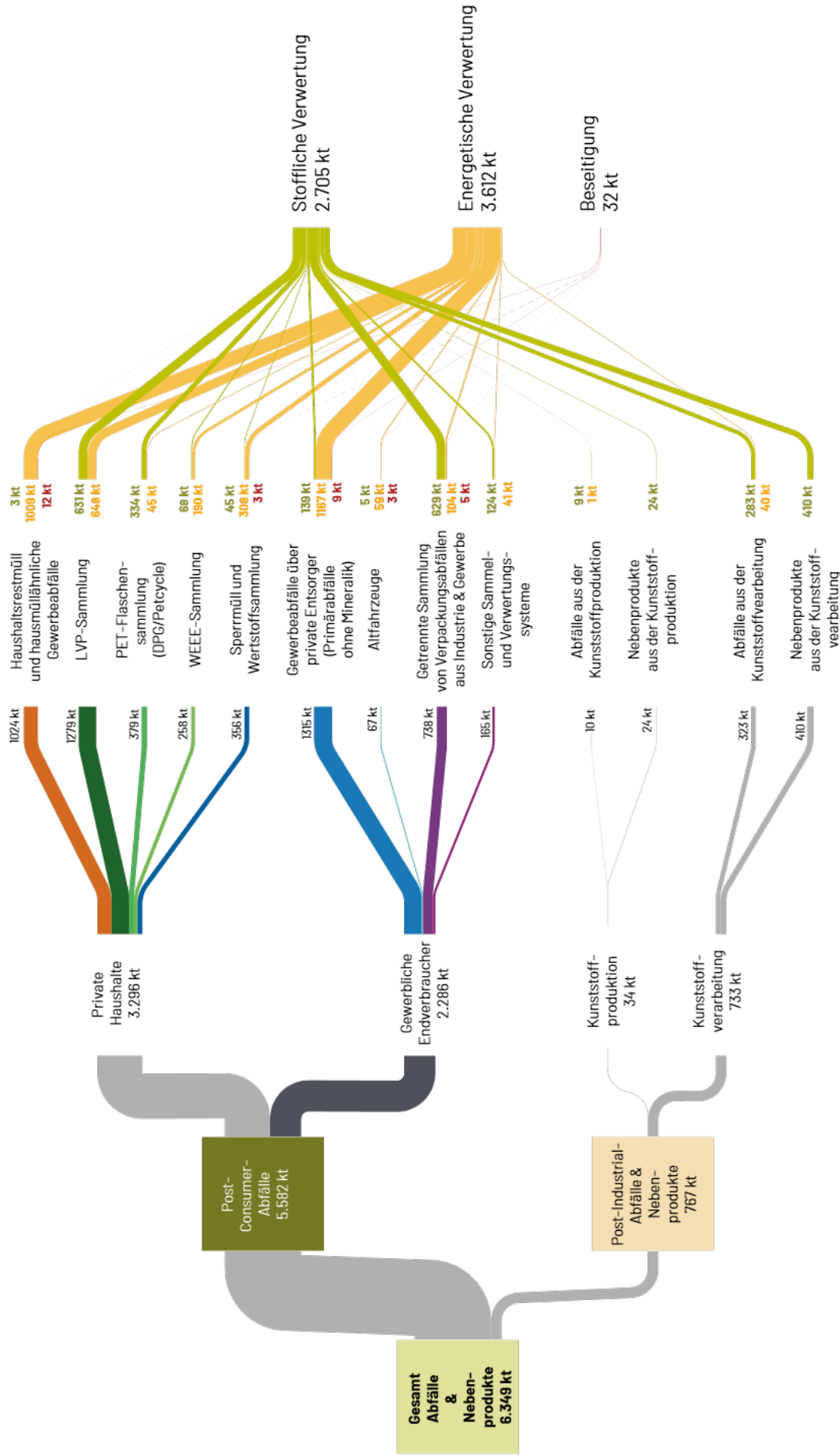


Abbildung 3: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 [Conversio 2024].

zunehmend das chemische Recycling durchzusetzen, woraus Carbon Black und Pyrolyseöl produziert werden [Maga et al. 2023].

3.2 VERLUSTE IN LOGISTIK UND IM EINSATZ

Kunststoffe werden meist in Form von kleinen Pellets für die weitere Verarbeitung zu Verfügung gestellt. Diese können in Säcken oder als Schüttgut transportiert werden. Bereits zu Beginn der Wertschöpfungskette, bei den weltweiten Transporten von Pellets [BUND 2025] aus thermoplastischen Kunststoffen, gelangen große Plastikmengen versehentlich in die Umwelt. Allein in Deutschland sind dies jährlich etwa 15.000 t, was ungefähr 750 Milliarden einzelnen Pellets entspricht [Bertling et al. 2018]. Im Oktober 2023 hat die EU einen Vorschlag zur Verringerung von Pelletverlusten veröffentlicht [Europäische Kommission 2023].

Große Umweltemissionen polymerer Stoffe stammen vom Reifenabrieb [BUND 2019d], der über 1.200 g pro Kopf und Jahr (g/cap a) beträgt (Abbildung 4). Platz 2 belegen Kunst-

stoff-Emissionen bei der Abfallentsorgung (Kompost, Bauschutt- und Metallzerkleinerung, Kunststoffrecycling). Im Vergleich zu letzterer liegen die Pelletverluste mit 182 g/ cap a bei ungefähr der Hälfte. Eine relevante Emissionsquelle aus dem Privatbereich ist der Abrieb bei der Textilwäsche [BUND 2019a], wo 76,8 g/ cap a anfallen [Bertling et al. 2018]. Insbesondere nicht gewobene Stoffe aus synthetischen Fasern (z. B. Atemmasken, Wundabdeckungen, Teebeutel) zerfallen schnell in einzelne Fasern, die in die Umwelt emittiert werden [Tang et al., 2025]. Auch Kunstrasen [BUND 2019b] und Reitplätze tragen zu den Emissionen in relevantem Umfang in Höhe von 131,8 g/cap a bei. Die Bedeutung der vorgenannten Emissionen wird im Kapitel 4 „Mikroplastik“ vertieft.

Der Verlust von Fischernetzen im Meer ist gigantisch. Der Anteil von Fischereiprodukten am globalen Meeresmüll beläuft sich auf knapp 50 % [BMUV 2023]. Diese Form der Meeresverschmutzung ist für Meerestiere am gefährlichsten [Roman et al. 2021]. Die Bundesrepublik Deutschland ist 2023 der Glo-

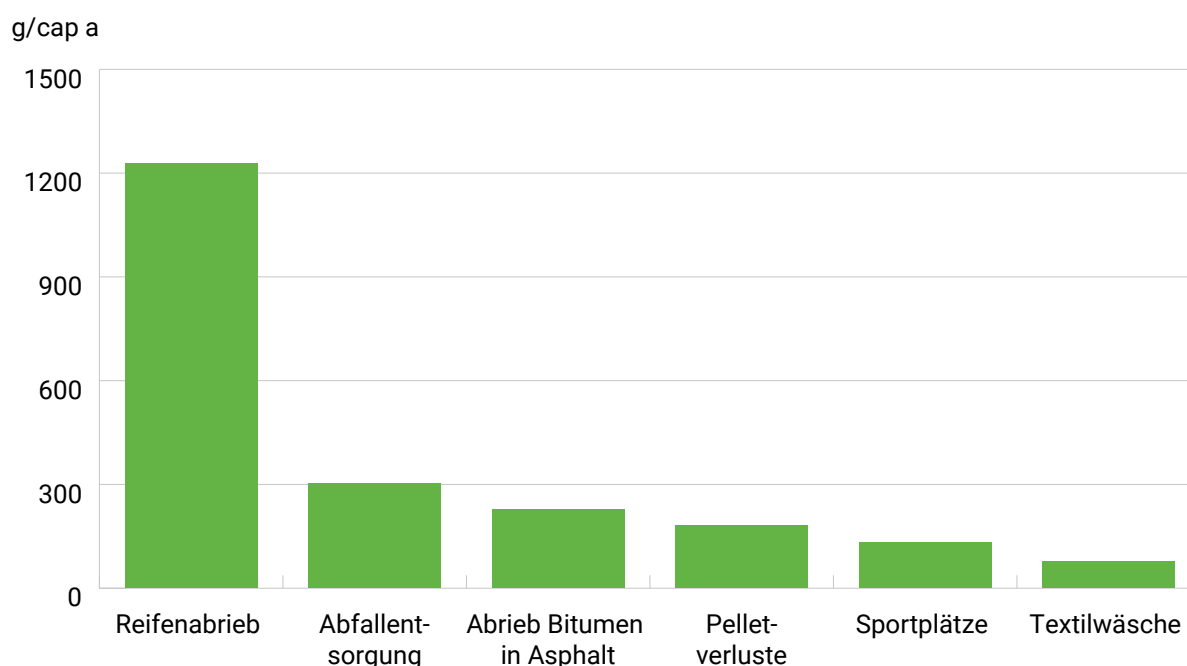


Abbildung 4: Quellen für primäres Mikroplastik (Auswahl): Reifenabrieb, Freisetzung bei der Abfallentsorgung, Pelletverluste, Verwehungen Sport- und Spielplätze, Faserabrieb bei der Textilwäsche; in jährlichen Pro-Kopf-Mengen (g/cap a); [Bertling et al. 2018].

bal Ghost Gear Initiative (GGGI) beigetreten. Sie ist die weltweit größte branchenübergreifende Allianz, die sich auf wissenschaftlicher Basis für die Entwicklung von Lösungen für das Problem verlorener, zurückgelassener und anderweitig weggeworfener Fischereiausrüstung auf der ganzen Welt einsetzt.

4 Mikroplastik

4.1 DEFINITION MIKROPLASTIK

Mikroplastik sind feste, unlösliche, partikuläre und biologisch nicht abbaubare synthetische Polymere in einem Größenbereich von weniger als 5 Millimetern bis 1 Mikrometer. Noch kleinere Plastikteilchen (kleiner als 1 Mikrometer) werden als Nanoplastik bezeichnet.

Mikroplastik wird unterschieden in primäres und sekundäres Mikroplastik. Als primäres Mikroplastik werden Partikel bezeichnet, die bei Eintritt in die Umwelt bereits im Größenbereich von Mikroplastik sind. Dazu gehören beispielsweise Partikel, die in der Kosmetik- und Körperpflegeindustrie eingesetzt werden [BUND 2019c], aber auch für die dosierte Nährstoffabgabe bei Düngemitteln [Umweltbundesamt Österreich 2025].

Sekundäres Mikroplastik entsteht bei dem Zerfall größerer Kunststoffteile durch physikalische, biologische und chemische Degradation. Hierzu gehört zum Beispiel der Abrieb von Autoreifen oder Fasern aus synthetischen Textilien, die beim Waschen oder Trocknen ins Abwasser oder die Luft gelangen oder die Zersetzung von Kunststoffteilen in den Meeren durch UV-Licht und Wellenbewegungen. Nach wie vor gibt es keine verbindliche Definition für Mikro- und Nanoplastik [Hartmann et al. 2019].

4.2 WARUM IST MIKROPLASTIK GEFÄHRLICH?

Mikroplastik hat aufgrund der vielen kleinen Teilchen eine riesige Oberfläche. Kunststoff wirkt aufgrund seiner Oberflächeneigenschaften wie ein Magnet auf viele Umweltchemikalien und Pathogene (Mikroorganismen, die Krankheiten auslösen können). Diese können sich auf der Kunststoffoberfläche anreichern. Hier lassen sich beispielsweise hundertmal höhere Konzentrationen als im Meerwasser

messen. Zusätzlich geht von Mikroplastik aus Reifenabrieb eine Gefahr durch giftige Additive wie beispielsweise polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) oder dem Zusatzstoff 6PPD, einem Antioxidationsmittel in Reifen, aus.

Die Kunststoffe werden dann samt der in Plastik enthaltenen und den an der Oberfläche angereicherten Schadstoffen von den Organismen aufgenommen: Mikroplastik wurde in einer Vielzahl von Organismen nachgewiesen, die es passiv oder mit ihrer Nahrung aufnehmen [Tekman et al. 2022]. Im Magen-Darm-Trakt können diese Schadstoffe freigesetzt werden und Einfluss auf den Organismus nehmen. Mikro- und Nanoplastik wird aber auch vom Menschen über Wasser, die Nahrung, die Haut oder die Atemwege aufgenommen. Abbasi kalkulierte die Exposition über die Haut mit primärem Mikroplastik von Kosmetika [Abbasi & Turner 2021]. Die Partikel sind weit verbreitet im menschlichen Körper bis hin zum Gehirn, zur Plazenta und Muttermilch [Winiarska et al. 2024]. Über die Nahrungskette kann Mikroplastik angereichert werden. Die Folgen sind noch nicht abschließend erforscht. Jedoch zeichnet sich ab, dass Mikroplastik Entzündungsreaktionen hervorruft und es gibt erste Hinweise darauf, dass es die Bildung von Metastasen und Thrombosen begünstigt und ein Zusammenhang mit Parkinson bestehen könnte. Die enthaltenen Schadstoffe verursachen allein in den USA Gesundheitskosten von jährlich 249 Milliarden US Dollar [Trasande et al. 2024].

Die Auswirkungen der Mikroplastikaufnahme auf Organismen sind vielseitig: Studien verweisen auf Gewebeveränderungen bzw. Entzündungsreaktionen und toxikologische Auswirkungen, bis hin zu inneren Verletzungen und Todesfällen. Kleinstlebewesen, wie das

Zooplankton, sind eine wichtige Nahrungsgrundlage für Fische. Diese werden wiederum von größeren Raubfischen gefressen. Der nicht abgebaute Kunststoff und die Schadstoffe können sich im Gewebe ansammeln und so Teil der Nahrungskette werden. Je kleiner das Plastikpartikel ist, desto größer das Risiko der Aufnahme und die Anzahl der Tiere, die es konsumiert. Ist Mikroplastik erst in den Flüssen und dem Meer, kann es nicht wieder entnommen werden. Der Zustand der Meeresumwelt ist besorgniserregend und die Auswirkungen sind kaum abzuschätzen. Daher muss der vermeidbare Eintrag von Mikroplastik konsequent gestoppt werden.

4.3 MENGEN UND EINTRAGSPFADE

Nach Daten des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik von 2018 [Bertling 2018] gelangen in Deutschland jährlich insgesamt rund 446.000 Tonnen Kunststoff in die Umwelt. Plastikpartikel unter 5 mm mit etwa 330.000 t stellen rund das Dreifache der übrigen Plastikteile (über 5 mm, Makroplastik) dar. Der größte Anteil Mikroplastik entsteht durch den Abrieb von Autoreifen. Weitere Quellen sind Plastik aus Textilien, die Abfallentsorgung, Abrieb von Bitumen und Asphalt, Einträge von Sport- und Spielplätzen (u.a. Kunstrasen, Reitplätze), Einträge von Baustellen sowie Abrieb von Schuhsohlen, Kunststoffverpackungen und Fahrbahnmarkierungen und (insbesondere bei der Wäsche von Textilien) aus Kunstfasern.

Mikro- und Nanoplastik gelangt auch durch landwirtschaftliche Anwendungen in Ackerböden und findet von dort auch den Weg in die menschliche Nahrungskette [Boctor et al. 2025]. Plastikpartikel werden nicht nur in Böden und Gewässern nachgewiesen, sondern auch in der Luft. Selbst in alpinen Gipfelregionen und entlegenen Bergseen werden in Monitoringstudien Nanoplastikteilchen nachgewiesen [Materić et al. 2021, Akdemir et al. 2025].

Besonders problematisch ist der Eintrag von Mikroplastik in die Meere. In einem Bericht der Weltnaturschutzunion IUCN wird dieser auf 1,5 Mio. t pro Jahr geschätzt [Boucher & Friot 2017]. Neue Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass die Menge an Nanoplastik in den Meeren deutlich unterschätzt wurde. ten Hietbrink et al. fanden bei Messungen im Nordatlantik 1,5 – 32 mg/m³ in der Wassersäule, was sich zu 27 Mio. t allein im Nordatlantik aufsummiert, mehr als die geschätzte Menge an Makro- und Mikroplastik [ten Hietbrink et al. 2025]. Ein relevanter Anteil von Mikroplastik in den Meeren wird durch die Fischerei verursacht. Forscher*innen der University of Plymouth fanden heraus, dass neue und ein Jahr alte synthetische Seile etwa 20 Mikroplastikfragmente pro Meter im Meer freisetzen können - und dass diese Zahl mit alterndem Material exponentiell ansteigt [Napper et al. 2022]. Zwei Jahre alte Seile setzen 720 und zehn Jahre alte Taue 760 Fragmente pro Meter frei. Dem Bericht zufolge verbrauchen Fischereifahrzeuge bei einem typischen Fangvorgang etwa 220 Meter Seil. Ausgehend von einer konservativen 50-Meter-Leine schätzen die Forscher, dass neue Seile jedes Mal bis zu 2.000 Mikroplastikfragmente freisetzen können, während alte Seile Werte von 40.000 Fragmenten erreichen können.

Der größte Teil der Mikroplastik-Partikel stammt aus der Wäsche von synthetischen Textilien und aus dem Reifenabrieb beim Autofahren. Die meisten der Freisetzungen in die Meere stammen aus der Verwendung (49 %) oder der Wartung von Produkten (28 %). Diese Kunststoffe gelangen hauptsächlich über den Straßenabfluss (66 %), Kläranlagen (25 %) und durch den Wind (7 %) ins Meer. Die regionale Verteilung der Freisetzungen von primärem Mikroplastik unterscheidet sich nach den Weltregionen. Alle Regionen tragen erheblich zu den Freisetzungen bei. Die größten regionalen

Freisetzungen finden sich in Indien, Südasien (18,3 %) und Nordamerika (17,2 %), dicht gefolgt von Europa und Zentralasien (15,9 %), China (15,8 %), Ostasien und Ozeanien (15,0 %). Geringer sind die Freisetzungen in Südamerika (9,1 %) sowie Afrika und dem Nahen Osten (8,7 %). Umgerechnet auf Pro-Kopf-Verluste liegen in Indien und Südasien, China, Afrika und dem Nahen Osten die Verluste unter dem weltweiten Durchschnitt (212 Gramm/Jahr pro Kopf). Große Bevölkerungszahlen in Verbindung mit einem geringen Anteil der Bevölkerung, der an Abwasserbehandlungssysteme angeschlossen ist, z. B. 6,2 % in Indien und Südasien, führen zu erheblichen Freisetzungen. Auch in Europa und Zentralasien sowie in Nordamerika kommt es zu beträchtlichen Freisetzungen, allerdings aus dem umgekehrten Grund. In diesen Regionen sind die Pro-Kopf-Verluste an Plastik größer als im weltweiten Durchschnitt.

4.4 ANSATZPUNKTE ZUR VERMEIDUNG VON MIKROPLASTIK

Der Schlüssel liegt neben der deutlichen Reduktion der Plastikverwendung in vielen Fällen bei der verantwortungsvollen Verwendung und Entsorgung von Kunststoffen. Einen wesentlichen Beitrag leistet das Produktdesign, indem beispielsweise Produkte ohne Mikroplastikzusatz bereitgestellt werden. Waschmaschinen mit geeignetem Mikroplastikfilter reduzieren den Austrag von Mikroplastik in das Abwasser. Die Eindämmung des Litterings und ein bewusstes Konsumverhalten haben eine unmittelbare positive Auswirkung auf die Mikroplastikproblematik. Wer den Autoverkehr reduziert, langsamer oder leichtere PKWs fährt, reduziert damit als Nebeneffekt den Reifenabrieb. Durch Regularien ließen sich zudem haltbarere Autoreifen herstellen, die weniger Reifenabrieb zur Folge hätten. Auf betrieblicher Ebene lässt sich die Freisetzung von Mikroplastik durch technische Maßnahmen (z. B. Filter) sowie durch

spezielles Training der Fachkräfte erzielen. Im Rahmen des „Zero Pellet Loss“ Pakt wurde beispielsweise eine Reduktion von Verlusten von Rohmaterial (Umfüllen, Transport, Abwasser) erreicht [Umweltbundesamt Österreich 2025].

5 Zusammenhänge mit Klima und Biodiversität

Der massenhafte Konsum von Plastik ist Teil der von den UN ausgerufenen dreifachen planetaren Krise [Villarrubia-Gómez 2024], welche den Klimawandel, die Umweltverschmutzung mit Schadstoffen und den Biodiversitätsrückgang umfasst. So trägt die Herstellung und Entsorgung von Plastik aus fossilen Energieträgern maßgeblich zum Klimawandel bei (siehe Kapitel 5.1.) und die Emission von Plastik, die Freisetzung der darin enthaltenen Additive und die Verwitterung zu Mikroplastik belasten die Ökosysteme und wirken sich nachteilig auf die biologische Vielfalt aus (siehe Kapitel 5.2.). Insbesondere die Langlebigkeit von Plastik macht es schwierig, seine Auswirkungen auf die biologische Vielfalt zu überwachen und zu begrenzen, da es zu einer kontinuierlichen Anreicherung in der Umwelt kommt und eine Rückholung nahezu unmöglich ist. Eine Reduktion der Plastikproduktion und ein stringentes Recycling unter Erhalt der Polymerqualität können Teil der Lösung des Plastikproblems sein, was jedoch die Reduktion bzw. Ausschleusung von Additiven im Recycling zur Minimierung unerwünschter Schadstoffe nach sich zieht (siehe Kapitel 5).

5.1 PLASTIK ALS TREIBER DES KLIMAWANDELS

Plastik basiert auf Kohlenstoff, welcher zum überwiegenden Teil aus fossilen Quellen stammt. So wurden im Jahr 2019 93 % des Plastiks aus Erdgas, Erdöl oder Kohle hergestellt (=Primärkunststoff), 6 % entstammte recyceltem Plastik (=Sekundärkunststoff) und 0,6 % biobasierten Quellen, wie Mais, Zuckerrohr, Weizen oder anderen Biomasserückständen [OECD 2023]. Allerdings finden fossile Energieträger bei der Herstellung von Plastik nicht nur als Rohstoff Verwendung,

sondern auch als thermische Energieträger wie beispielsweise bei der Dampfproduktion im Steamcracker. Durch diese Doppelrolle trägt die Plastikproduktion zu einem Fünftel zum Gesamtverbrauch fossiler Energieträger in der deutschen Chemieindustrie bei [BUND 2023]. Weltweit verursacht allein die Produktion von Plastik 5,3 % des jährlichen CO₂-Ausstoßes. Beim derzeitigen Wachstumspfad könnte die Produktion bis 2050 bis zu 31 % des verbleibenden CO₂ Budgets kosten [Karali et al. 2024]. Weiterhin tragen die Entsorgung von Plastik und die Produktion von Additiven zu weiteren Treibhausgasemissionen bei, sodass Plastik einen signifikanten Beitrag zum Klimawandel leistet.

5.1.1 Klimawirksame Emissionen aus der Plastikverwendung

Nach Angaben der OECD wurden durch die weltweite Verwendung von Plastik im Jahr 2020 1,8 Gt (1 800 000 000 Tonnen) Treibhausgase (THG) freigesetzt [OECD 2023]. Bei fortschreitendem Wachstum der Plastikproduktion („business as usual“ Prognose) wird diese Menge bis 2040 um 50 % auf rund 2,8 Gt ansteigen (siehe Abbildung 5). Je nach Berechnungsmethode kommen jedoch auch schon heute Wissenschaftler zu höheren THG-Emissionen von bis zu 2,24 Gt, welche je nach Wachstumsprognose bis 2050 auf 4,75 Gt (2,5 % Wachstum) bzw. 6,78 Gt (4 % Wachstum) ansteigen könnten [Karali et al. 2024, Zhu et al. 2025]. Eine Einordnung dieser Emissionen hängt stark von den zukünftigen Anstrengungen zur Begrenzung der Erderwärmung ab, jedoch würden die prognostizierten Werte sich zwischen den aktuellen THG-Emissionen von Russland und den USA bewegen. Bezogen auf die THG-Emissionen um die Erderwärmung

auf 1,5°C zu begrenzen würde der Anstieg der Produktion bis 2050 zwischen 20 bis 30 % des verbleibenden THG-Budgets verbrauchen [Karali et al., 2024]. Besonders energieintensiv sind hierbei die Produktion und Umwandlung, welche ungefähr 90 % der Emissionen umfassen, während die sachgemäße und unsachgemäße Entsorgung nur 10 % ausmachen (siehe Abbildung 5). Gemessen an dem nur kurzzeitigen Nutzen vieler Plastikprodukte und den hohen THG-Emissionen in der Erzeugung, ist die Plastikproduktion kurzfristig auf essenzielle Verwendungen zu beschränken und langfristig eine Entkopplung der Produktion von fossilen Energieträgern zu erreichen.

Eine genauere Betrachtung der Emissionen aus der Plastikproduktion ergibt, dass ungefähr 20 % bei der Rohstoffgewinnung, 29 % bei der Raffinierung, 26 % bei der Monomer Produktion, 8 % bei der Polymerisation und 17 % bei der Produktherstellung entstehen [Karali et al., 2024]. Der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen während der Produktion domi-

nieren die Lebenszyklusanalyse von Kunststoffen und sprechen für eine stoffliche Verwertung von Plastikabfällen (z. B. Pfandsysteme, Re-Use oder Recycling) als Maßnahme zur Minimierung der Umweltauswirkungen. Plastikrecycling kann auf verschiedenen Wegen erfolgen um damit hochwertige (high-quality recycling) oder minderwertige (downcycling) Produkte zu erzeugen, welche entweder Primärplastik oder andere Materialien ersetzen. Eine Vergleichsstudie des schwedischen Umweltforschungsinstitut ivl basierend auf einer typischen europäischen Müllzusammensetzung zeigt die Vorteile eines hochwertigen werkstofflichen Recyclings in Bezug auf die Treibhausgasemissionen [Ekvall et al., 2025]. Allerdings kommt es durch das Recycling zu Qualitätsveränderung und auch zu einer Qualitätsverschlechterung des Rezyklates, denn die Kettenlänge der Plastikpolymere wird verkürzt, Additive werden vermischt, Fremdstoffe aus vorheriger Nutzung können eingeschleust werden oder im Fall des Downcyclings kommt es sogar zu einer Vermischung der Polymertypen. Daher befürworten Indust-

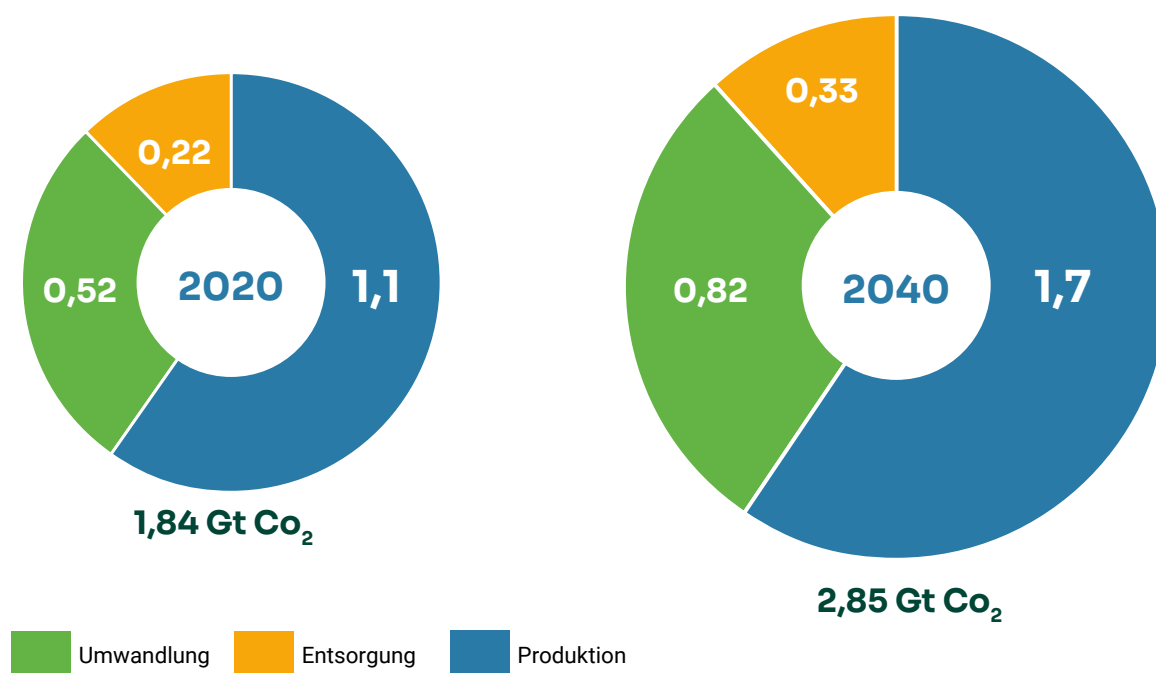


Abbildung 5: Jährliche Treibhausgasemissionen der globalen Plastikherstellung und Entsorgung und Prognose für das Jahr 2040 unter der Annahme eines fortschreitenden Wachstums [OECD, 2024b]. Emissionen von Methan und Stickoxiden als Kohlenstoffdioxidäquivalente in die Grafik eingerechnet.

rieverbände zunehmend chemisches Recycling (siehe Kapitel 8), bei welchem das Plastik wieder verölt wird. Dieser Prozess ist jedoch sehr energieintensiv und setzt ungefähr eine ähnliche Menge an Treibhausgasen frei wie die primäre Herstellung von Plastik [Quicker & Seitz, 2024]. Zudem scheitern Vorhaben an dem Mix von Chemikalien und skalieren derzeit nur in sehr wenigen Fällen.

Die Verbrennung von Plastik in Müllverbrennungsanlagen oder Zementöfen erzeugt nur einen Bruchteil der Treibhausgasemissionen des gesamten Lebenszyklus und substituiert derzeitig andere, größtenteils fossile, Energieträger. Allerdings führt die Deponierung von Plastikabfällen, die in einigen Ländern der EU noch üblich ist, zu nachgeschalteten Emissionen von Treibhausgasen, da die Oberflächen durch Mikroorganismen besiedelt werden (siehe 5.2.1.). Diese zersetzen anhaftende organische Reste und bilden unter Sauerstoffabschluss Methan, welches aus dem Deponiekörper ausgast und über 20 Jahre rund 84-mal klimaschädlicher ist als CO₂. Diese Emissionen können nicht direkt dem Plastik zugerechnet werden, entstehen jedoch infolge der Verwendung und belaufen sich auf ungefähr 2 Millionen Tonnen CO₂ Äquivalente pro Jahr [OECD, 2023].

In Anbetracht des gesamten Lebenszyklus von Plastik und aller verfügbarer Technologien zur Wiederverwertung lässt sich ein sinnvoller Klimaschutz nur durch eine deutlich verringerte Plastikproduktion erreichen. Hierbei müssen Einwegverpackungen weitestgehend vom Markt genommen werden. Insbesondere die Emissionen aus der Synthese zeigen deutlich, dass die hochwertige stoffliche Wiederverwendung das oberste Ziel für nicht zu vermeidende Plastikreste ist.

5.1.2 Synthese von Additiven als zusätzliche Emissionsquelle

Die Plastikproduktion basiert nicht ausschließlich auf der Verwendung der Monomere, sondern ebenfalls auf der Verwendung von Katalysatoren, Verarbeitungshilfsmitteln und vor allem Additiven (siehe auch Kapitel 6). Laut einer aktuellen Studie sind ungefähr 16.000 Additive bekannt, welche je nach Produkt und Funktion in unterschiedlichen Gewichtsanteilen eingesetzt werden (z. B. Antioxidationsmittel max. 3 %, Licht/UV-Stabilisatoren max. 10 %, Flammenschutzmittel max. 28 % und Weichmacher max. 70 %) [Wagner et al., 2024]. Im Jahr 2024 wurden etwa 20 Millionen Tonnen Additive hergestellt (siehe Kapitel 6), welche einem sehr unterschiedlichen Synthesaufwand unterliegen. Aus diesem Grund sind die Treibhausgasemissionen nicht pauschal abschätzbar.

5.2 AUSWIRKUNGEN DER PLASTIKVERWENDUNG AUF BIODIVERSITÄT UND GESUNDHEIT

Durch die große Produktionsmenge und den unbedarften Umgang hat Plastik Einzug in alle Ökosysteme dieses Planeten erhalten. Es gelangt über Kompost und Klärschlamm in den Boden, durch Niederschläge in Böden, Flüsse und Meere, durch Wind in die Atmosphäre und hat sich mittlerweile vom Himalaya bis in den Marianengraben in der Tiefsee verbreitet. Somit ist Plastik überall und es sind nahezu alle Organismen dieses Planeten schon mit Plastik in Berührung gekommen oder tragen dieses in sich. Einmal in die Umwelt eingetragen, kann es kaum mehr zurückgeholt werden, was es zu einer existenziellen Bedrohung für besonders exponierte und vulnerable Organismengruppen macht [MacLeod et al., 2021, Thornton-Hampton et al. 2022]. Die Konzentration von Plastik in der Umwelt ist sehr unterschiedlich, denn Wind, Meeresströmungen oder gar Tiere transportieren Plastik und lokale Hotspots können

entstehen. Aus der Exposition mit Plastik resultiert nicht automatisch eine Beeinträchtigung für Lebewesen und es gilt bei Plastik nicht automatisch der Leitsatz die Dosis macht das Gift. Denn die Wirkung von Plastik ist vielfältig und hängt nicht nur von der Menge, sondern auch von der Form, Beschaffenheit und chemischen Zusammensetzung ab. So kann es zu physikalischen Effekten kommen, indem sich Tiere in Plastikschnüren verfangen oder der Blockade des Magen-Darm-Trakts, der Beeinträchtigung der Gesundheit durch die Freisetzung von Plastikchemikalien (Additive) oder aber zu einer Schaffung künstlicher Lebensräume (z. B. durch das Besiedeln von Plastikoberfläche als künstliche Riffe im Ozean) kommen. Dies nimmt Einfluss auf die vielfältigen Lebensformen dieses Planeten (=Biodiversität). Das folgende Kapitel fasst die Effekte von Plastik auf die vielfältigen Lebensformen dieses Planeten zusammen und zeigt auf, dass der Effekt von Plastik durch seine extreme Langlebigkeit und heterogene Verteilung in der Umwelt in den seltensten Fällen abschätzbar ist.

5.2.1 Plastik(oberflächen) als Vektor und Lebensraum

Sobald eine Plastikoberfläche Umwelteinwirkungen ausgesetzt wird, kommt es zur Ansiedlung von Mikroorganismen und größeren Lebewesen (auch „Biofouling“ genannt). Diese nutzen die Oberfläche als Lebensraum und können sich dort geschützt vor äußeren Einflüssen vermehren [Rummel et al., 2017]. Genetische Untersuchungen haben ergeben, dass sich unter diesen Mikroorganismen auch humane Pathogene befinden und es dort zu einer Anreicherung von Antibiotikaresistenzen kommen kann [Zadjelovic et al., 2023; Shruti et al., 2024]. Somit kann Plastik in der Umwelt als Vektor für die Verbreitung von Krankheitserregern dienen. Darüber hinaus stellt die Partikelverschmutzung mit Plastik einen neuen

Lebensraum dar, in welchem natürliche Oberflächen nicht vorkommen. Dies trifft insbesondere für die Meeresgebiete fernab der Kontinente zu, wo sich im Zusammenspiel mit den Meeresströmungen Plastik in sogenannten Müllstrudeln anreichern kann. Untersuchungen haben ergeben, dass sich auf dem Plastik viele Organismen befinden, welche in diesen Meeresgebieten eigentlich nicht vorkommen [Bryant et al., 2016]. Somit bildet Plastik in diesen Bereichen künstliche schwimmende Riffe, welche über Jahrzehnte bestehen können und einen Einfluss auf die lokale Biodiversität und Stoffflüsse haben.

Der ökologische Effekt von Plastik als neuartiger Lebensraum lässt sich nicht abschließend einschätzen und weitere Forschung ist nötig. Dennoch lässt sich exemplarisch aufzeigen, dass Plastik einen Einfluss auf die Biodiversität hat, indem beispielsweise größere Plastikobjekte durch Organismen wie Krebstiere oder Ähnlichem besiedelt, mit diesem verdriftet und jenseits ihres natürlichen Vorkommens als gebietsfremde Lebewesen (Neozoen) verbreitet werden [Haram et al., 2021]. Darüber hinaus beeinflusst die Verfügbarkeit von Plastikoberflächen im Ozean das Verhalten von Meerestieren, was z. B. durch das veränderte Paarungsverhalten der marinen Krabbe (*Planes minutus*) deutlich wird. Diese lebt ursprünglich in sozialer Monogamie unter dem Panzer von Karettschildkröten (*Caretta caretta*) und wird nun sogar in größeren Populationen auf umhertreibendem Plastik nachgewiesen [Pfaller & Gil, 2016].

5.2.2 Auf das Größenverhältnis kommt es an – physikalische Effekte von Plastik

Plastik kann irrtümlich mit der Nahrung aufgenommen oder aktiv mit dieser verwechselt werden, was zu einer Blockade (Verstopfung) oder Verletzung des Magen-Darm-Trakts führen kann. Außerdem kann ein voller Magen mit



Abbildung 6: Eintrag von Plastikfragmenten aus der Fischerei in die Nester von Basstölpeln (*Morus bassanus*) auf der Insel Helgoland (Quelle: Stefan Lips) und B) Verhedderung eines Basstölpels mit einer Fischerleine (Quelle: Aaron Beck).

Plastik die Nahrungsaufnahme und somit das Energiebudget eines Organismus beeinträchtigen [Watts et al., 2015; Gardon et al., 2018]. Eine allgemeine kritische Plastikbeschaffenheit oder Größe für die Aufnahme mit der Nahrung gibt es nicht, denn für Wasserflöhe oder Muscheln sind Mikroplastikpartikel, für Meeresschildkröten Plastiktüten und für Pottwale sind Fischernetze, Eimer oder gar Autoteile ein Problem [Jacobsen et al., 2010]. Für die Verwechslung mit natürlicher Nahrung sind nicht nur die initialen Plastikeigenschaften verantwortlich, sondern vor allem auch das Biofouling (siehe 5.2.1). Dabei verändern die Organismen auf der Plastikoberfläche das Aussehen und vor allem den Geruch des Kunststoffes in Richtung eines natürlichen Objekts. So wird bei Tieren mit ausgeprägtem Geruchssinn häufig Plastik im Magen gefunden, wie beispielsweise bei Seevögeln (*Procellariiformes*, Röhrennasen) wie Albatrossen oder Sturmvögeln [Savoca et al., 2016; Pfaller et al., 2020].

Darüber hinaus sind Plastikfolien, -netze, -behälter, -tüten und -leinen Todesfallen für verschiedene Lebewesen, weil sie sich darin verfangen können. Dies gilt insbesondere für den Nestbau von Vögeln, welche Plastikfasern von Netzen eintragen und somit eine tödliche Gefahr für sich oder ihren Nachwuchs schaffen (siehe Abbildung 6). Weiterhin sind auch landlebende Säuger wie Igel durch netzartige Plastikreste gefährdet [Thrift et al., 2023]. Aber auch in Flüssen, Seen und den Meeren sind herumgeisternden Netze (sogenannte „ghost nets“), Langleinen oder Angelschnüre, ein großes Problem, da sich Meerestiere wie beispielsweise Fische, Delfine und Wale oder Meeresschildkröten darin verheddern, Körperteile abschnüren oder ersticken bzw. verhungern können [Butterworth et al., 2015]. Schätzungen gehen von 48.400 Tonnen unabsichtlich verlorenen Fanggeräten aus Plastik in der industriellen Fischerei aus, wobei diese Zahl einer großen Unsicherheit unterliegt [Kuczynski et al., 2021].

5.2.3 Aufnahme und Wirkung von (Mikro)Plastik in Zellen

Das Verschlucken oder gar Einatmen von Plastik stellt zwar eine Aufnahme in den Körper dar, jedoch vermindern Schutzbarrieren wie die Epithelzellen von Lunge, Magen oder Darm eine weitere Aufnahme in Zellen, Gewebe oder den Blutkreislauf. Aber auch hier spielt die Größe der Partikel eine entscheidende Rolle, denn laut der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) kann Mikroplastik kleiner als 150 µm die Darmbarriere überwinden und unterhalb von 10 µm auch in Zellen eindringen. So werden in verschiedenen Publikationen Mikroplastik-Partikel in menschlichen Organen, sogar im Gehirn, beobachtet [Amato-Lourenço et al. 2021, 2024]. Die Quantifizierung von Mikroplastik-Partikeln in Blut und Organen gestaltet sich jedoch schwierig und ist wissenschaftlich nicht unumstritten [Obeng et al., 2025, Rauert et al., 2025, Xu et al., 2025a]. Weiterführende Experimente des BfR deuten auf die beeinträchtigende Wirkung von Nano- und Mikroplastik auf die Epithel- und Nervenzellen des Darms hin [Elfers et al., 2025]. Bei anderen Studien können auch Entzündungsreaktionen, oxidativer Stress, Membranschäden oder das Absterben von Zellen in verschiedenen Zelltypen oder Modellorganen als Folge der Exposition gegenüber Mikro- und Nanoplastik nachgewiesen werden [Wu et al., 2019; Yan et al., 2021, Stock et al., 2022; Donkers et al., 2022]. Wissenschaftliche Studien haben zudem Hinweise erbracht, dass Plastik an der Entstehung von Krankheiten wie Parkinson, Thrombose, Metastasenbildung, Brustkrebs, Stammzellenschädigungen und der Reduktion der Spermienzahl beteiligt sein kann.

Bereits im Jahr 1992 konnte Jani et al. in Fütterungsversuchen an Ratten zeigen, dass sich 3 µm große Polystyrolpartikel im Körper verteilen und zum Beispiel in den Lymphknoten und der Leber wiedergefunden werden können

[Jani et al., 1992]. Auch die EFSA gibt einen kritischen Grenzwert von 1,5 µm für die systemische Ausbreitung von Partikeln im Körper an. Die Ausbreitung von Partikeln im Körper wirft weitere Fragen auf, da dies zu einer Akkumulation in bestimmten Geweben oder Organen und somit zu einer erhöhten Exposition von Zellen fernab des eigentlichen Magen-Darm-Epithels führen kann. So wurde kürzlich auch eine Anreicherung von Mikroplastik in Gehirnen verstorbener Menschen nachgewiesen, welche die Mengen in Leber und Niere übersteigt [Nihart et al., 2025]. Jedoch lässt sich die Frage, ob Mikroplastik zu permanenten Schäden oder Krankheiten im Körper führt, nicht abschließend beantworten, denn neben der Partikelgröße, spielen auch der Polymertyp und die als Additive (siehe Kapitel 6) zugegebenen Chemikalien im Plastik eine wichtige und weitestgehend unerforschte Rolle.

Aufgrund der ständigen Präsenz von Plastik in unserem Alltag ist der Mensch eine der Spezies, die Mikroplastik am stärksten ausgesetzt ist. Die Schätzungen zur unbeabsichtigten täglichen Einnahme schwanken und unterliegen einer großen Varianz durch die Ernährungs- und Lebensumstände. Eine grobe Abschätzung ergab die tägliche Aufnahme von 883 Partikeln, was einer ungefähren Plastikmenge von 4 µg pro Woche entspricht [Nor et al., 2021]. Diese liegt weit unterhalb der Menge von 0,1 bis 5 g [Senathirajah et al., 2021], was üblicherweise mit der Plastikmenge einer Kreditkarte verglichen wurde. Dennoch wird diese Exposition zukünftig weiter ansteigen, wenn nach den aktuellen Wachstumsprognosen mehr Plastik in den Umlauf kommt, sich Plastikpartikel in der Nahrung oder Luft anreichern und die Nahrung zunehmend in Plastik verpackt wird. Gerade die Aufnahme über die Atemluft stellt einen wichtigen Expositionspfad dar, denn über die Luft gelangen laut Nor et al. die größten Mengen Mikro- und Nanoplastik in den Körper

[Nor et al., 2021]. Inwiefern Selbstreinigungsprozesse der Atemwege wie der mukoziliare Transport die Partikel wieder aus dem Körper ausschleusen können und welche gesundheitlichen Beeinträchtigungen rückbleibende Partikel auslösen, ist jedoch Gegenstand aktueller Forschung [Winiarska, et al. 2024; Gasperi, et al. 2018; Huang, et al. 2024]. Erhöhte Exposition gegenüber Plastikfasern in der Atemluft, welche beispielsweise berufsbedingt auftreten kann, wurde jedoch schon 1975 mit Lungenerkrankungen wie Asthma oder chronischer Bronchitis in Verbindung gebracht [Pimentel, et al. 1975]. Im Sinne des vorsorgenden Gesundheitsschutzes für Mensch und Umwelt ist es geboten, die Entstehung und Verbreitung von Mikroplastik einzudämmen, indem vermehrt auf Plastik verzichtet wird.

5.2.4 Freisetzung von Plastikchemikalien und deren Effekte

Plastik beinhaltet bewusst und unbewusst zugesetzte Chemikalien (=Additive), welche sich über die Zeit aus dem Plastik verflüchtigen, da diese nicht fest gebunden im Polymer vorliegen (siehe Kapitel 6). Diese verteilen sich im Umgebungsmilieu (wie Wasser oder Luft) und erzeugen komplexe Chemikalienmischungen, welche eine schädigende Wirkung haben können. So haben Experimente mit alltäglichen Plastikprodukten gezeigt, dass die darin enthaltenen Chemikalien zu einem Effekt in Algen [Tetu et al., 2019], Krebstieren [Bejgarn et al., 2015; Linthner et al., 2012] oder Mollusken [Capolupo et al., 2020] führen können. Dies ist nicht verwunderlich, denn die Liste der möglichen Plastikzusätze ist lang und beinhaltet mindestens 4.200 bedenkliche Chemikalien, die für die menschliche Gesundheit und die Umwelt gefährlich sind. Für rund 10.000 der 16.000 mit Plastik assoziierten Chemikalien fehlen Daten dazu [Wagner et al., 2024]. Unter den bekannten Chemikalien befinden sich unter anderem auch Bisphenol-A oder

4-Nonylphenol, welche als hormonell wirksame Chemikalien bereits in umweltrelevanten Konzentrationen zu Effekten in Schnecken und Fischen führen können [Oehlmann et al., 2005, Hong et al., 2020]. Diese Beispiele stehen stellvertretend für eine ganze Stoffgruppen, welche als Ersatzstoffe strukturell-verwandte Chemikalien wie beispielsweise Tetrabrombisphenol-A, Bisphenol-S, -F oder -AF umfassen und oftmals nicht weniger problematisch sind [Reininger & Oehlmann, 2024]. Ein weiteres gravierendes Beispiel ist der Stoff 6PPD, welcher seit 1970 als Oxidationsschutz in Autoreifen verarbeitet wird. Der Abrieb der Reifen, die Oxidation von 6PPD zum Chinon 6PPD-Q und die Abwaschung des Stoffs und Reifenabriebs in Flüsse verursachten lokale Fischsterben des Silberlachs (*Oncorhynchus kisutch*) [Tian et al., 2022]. 6PPD-Q aus Autoreifen ist nicht nur für Lachsfische toxisch. Neuere Untersuchungen bezeugen auch eine starke Wirksamkeit bei anderen aquatischen oder terrestrischen Tieren wie Fadenwürmern [Jiang et al., 2024].

Diese Beispiele verdeutlichen das unerwünschte Wirkpotential von Plastikadditiven und somit auch deren potenziellen Effekt auf die Biodiversität. Gesicherte Nachweise der Beeinträchtigung der biologischen Vielfalt allein durch Plastikadditive sind selten. Vielmehr tragen Plastikchemikalien und deren Transformationsprodukte im Zusammenspiel mit anderen Chemikalien und Umweltfaktoren wie dem Klimawandel zum Biodiversitätsrückgang bei. Dennoch verdeutlichen die Studien den dringenden Forschungsbedarf nach sicheren Additiven und die Notwendigkeit einer Reduktion der derzeitigen Additivvielfalt hin zu einer besseren Risikoabschätzung für den Schutz der Biodiversität.

6 Additive und Begleitstoffe als zentrales Umweltproblem

Den meisten Kunststoffen werden bei der Herstellung und/oder der Weiterverarbeitung chemische Verbindungen zugesetzt, um die für die vorgesehenen Verwendungen erforderlichen Eigenschaften zu erreichen. Diese Additive können sehr unterschiedliche Zwecke erfüllen. Zum Beispiel ist reines PVC hart und spröde. Durch Zusatz so genannter Weichmacher wird das PVC mit zunehmendem Massenanteil des Additivs immer weicher, elastischer und biegsamer. Weich-PVC besteht bis zu 50 % aus dem zugesetzten Weichmacher. Auf Weichmacher und drei weitere wichtige Gruppen von Additiven wird in Abschnitt 6.1 näher eingegangen.

Aufgrund der unterschiedlichen Kunststoffarten und ihrer vielfältigen Verwendungen ist die Vielfalt der als Additive eingesetzten Substanzen riesig: Wiesinger et al. nennen mehr als 10.500 verschiedene Chemikalien, die als Additive, Hilfsstoffe für die Verarbeitung oder Monomere zur Herstellung von Kunststoffen verwendet werden [Wiesinger et al. 2021]. Eine

Studie der Vereinten Nationen identifiziert sogar über 13.000 Chemikalien im direkten Zusammenhang mit Produktion und Einsatz von Kunststoffen [UNEP 2023]. Die jüngste Studie von Wagner et al. (2024) nennt über 16.000 Chemikalien die potenziell in Plastikmaterialien und -produkten verwendet werden oder darin enthalten sein können [Wagner et al. 2024]. Mehr als 4.200 dieser Substanzen geben Anlass zur Besorgnis wegen ihrer Persistenz, Bioakkumulation, Mobilität in der aquatischen Umwelt und/oder ihrer schädlichen Wirkung auf Lebewesen.

Entsprechend den enormen und ständig steigenden Produktionsmengen von Kunststoffen (siehe Kapitel 1) und den oft (sehr) hohen Massenanteilen von Additiven in Kunststoffen (s. oben und 5.3) sind die Produktions- und Verwendungsmengen zahlreicher Additive sehr hoch und liegen jeweils im Bereich von Hunderttausenden oder Millionen Tonnen pro Jahr [Maes et al., 2023; Wiesinger et al., 2021].

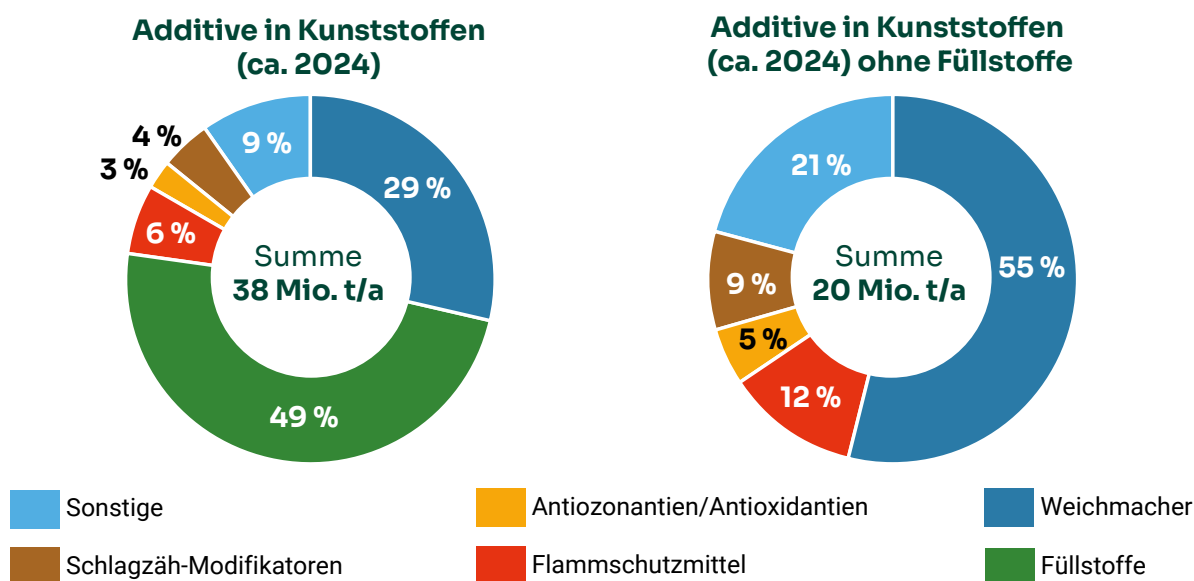


Abbildung 7: Hauptverwendungsmengen von Additiven in Kunststoffen, Stand 2024 [Geyer et al. 2017; Aurisano et al. 2021; Maes et al. 2023; Maier, Schiller 2016; Ceresana 2024b; 2025; ChemAnalyst 2022; 2023; Pro Market Reports 2025; Statista Research Department 2023; U.S. National Library of Medicine 2025; Xu et al. 2022b]

Die auf die weltweiten Verwendungsmengen entfallenden Anteile (für 2024 geschätzt) sind in der Abbildung 7 dargestellt.

Die als Additive zugesetzten Substanzen sind in den meisten Fällen nicht chemisch an oder in die Makromoleküle des Kunststoffes gebunden, sondern nur physikalisch mit dem Polymer gemischt. Die Mehrzahl der Additive sind organische Stoffe mit relativ niedriger Molmasse (bis etwa 1000 g/mol). Solche Stoffe können sich im Kontakt mit Flüssigkeiten wie Wasser in diesen lösen. Beispiele sind die technisch beabsichtigte langjährige Auslaugung von Bioziden aus Dachbahnen zur Verhinderung von Algen- und Moosbildung durch Regen, die Lösung von Weichmachern aus Kinderspielzeug in Speichel oder der Übergang von Weichmachern aus Verpackungsmaterialien in fetthaltige Lebensmittel.

Zahlreiche Additive haben zudem – im Gegensatz zu Makromolekülen - eine gewisse Tendenz aus dem festen oder flüssigen Zustand in den gasförmigen Zustand überzugehen. Diese Tendenz besteht auch bei vielen schwerflüchtigen organischen Verbindungen. Deshalb können diese Stoffe aus den Kunststoffmaterialien während des gesamten Produktlebenszyklus in die umgebende Luft übergehen, sich also verflüchtigen. Diese Tendenz ist umso ausgeprägter, je höher der Gehalt des Additivs im Kunststoff ist, da dieser als Diffusion bezeichnete Transportprozess abhängig vom Konzentrationsunterschied zur Umgebung ist. Temperaturerhöhung (z. B. Erwärmung des Kunststoffgegenstandes durch Sonneneinstrahlung oder mechanische Reibung) beschleunigt die Verflüchtigung. Der Einsatz organischer Stoffe als Additive in Kunststoffen ohne chemische Bindung ist also grundsätzlich eine umweltoffene Anwendung. Für die in den 1960er und 1970er Jahren als Weichmacher und Flammschutzmittel in dauerelasti-

schen Fugendichtungsmassen und Anstrichen verwendeten polychlorierten Biphenyle (PCB) wurde in Studien an entsprechend belasteten Gebäuden eine jährliche Verflüchtigungsrate von etwa 0,06 % ermittelt. Für Deutschland bedeutet das eine andauernde unkontrollierte jährliche Freisetzung von 7–12 Tonnen PCB in die Luft [Weber et al., 2015]. Auch zahlreiche andere Kunststoffadditive finden sich in der Innenraumluft von Gebäuden und im Hausstaub [AGÖF 2007, 2013].

Aus Kunststoffen verflüchtigte Additive können auf dem Luftweg weiträumig transportiert werden, sowohl gasförmig als auch angelagert an Feinstaubpartikel oder über Mikro- und Nanoplastik-Partikel und sich dadurch in der Umwelt weit verbreiten. Durch Niederschläge und atmosphärische Deposition bei trockenem Wetter werden diese Stoffe großflächig in Ökosysteme eingetragen, auch in entlegene Gebiete, wo sie niemals verwendet wurden. So ist das Vorkommen von schwerflüchtigen bromierten und chlorierten organischen Flammschutzmitteln (s. 6.3.2), in Luft und Deposition auf der Zugspitze durch Messreihen belegt [Umweltbundesamt Österreich 2021]. Sind solche freigesetzten und diffus verbreiteten Additive in der Umwelt stabil (persistent), so ist die Anreicherung in Pflanzen und Böden sowie in Schwebstoffen und Sedimenten von Gewässern und schließlich die Bioakkumulation in der Tierwelt und dem Menschen die unausweichliche Folge.

Die beschriebene Tendenz zur Auslaugung bzw. Verflüchtigung gilt in gleicher Weise auch für Restgehalte von Produktions- und Verarbeitungshilfsstoffen, die ebenfalls ungebunden in den Kunststoffprodukten vorliegen: So muss bei der Herstellung von Fluorpolymeren eine per- oder polyfluorierte Alkylsubstanz (PFAS) als Emulgator zugesetzt werden. Für die Verwendung von HFPO-DA bei der Fluorpolymer-

produktion in einem Werk in den Niederlanden wurde ermittelt, dass etwa 0,5 % der eingesetzten Emulgatormenge in die Produkte übergeht [Gebink & van Leeuwen 2020].

6.1 UMWELT- UND GESUNDHEITS-RELEVANTE ADDITIVE

Hinsichtlich ihrer Relevanz für Umwelt und Gesundheit sind Weichmacher, Flammschutzmittel und Stabilisatoren (Antioxidantien und UV-Lichtschutzmittel) die wichtigsten Kunststoffadditive (Maier & Schiller 2016). PVC-Stabilisatoren, die sich im Laufe der Zeit als besonders giftig herausgestellt haben, wie Cadmium, Blei oder zinnorganische Verbindungen sind mittlerweile als Additive in Neu-PVC verboten [EU 2025]. Sie erschweren das Recycling früher hergestellter PVC-Produkte, z. B. von Bodenbelägen, Fensterrahmen oder Rohren. Für Cadmium und Blei gibt es langjährige Ausnahmeregelungen der EU bezüglich der Recyclingprodukte [EU 2011a; 2023].

6.1.1 Weichmacher

Nach DIN 55945 sind Weichmacher flüssige oder feste organische Substanzen mit geringem Dampfdruck, die ohne chemische Reaktion vorzugsweise durch ihr Löse- oder Quellvermögen mit hochpolymeren Stoffen in physikalische Wechselwirkung treten und mit diesen ein homogenes physikalisches System bilden können. Ihre Funktion ist die Anpassung der Härte eines Polymers an die Gebrauchserfordernisse. Weichmacher sind meist farblose Substanzen mit geringer Wasserlöslichkeit. [Römpp 1998]

Als Migration bezeichnet man die Tendenz der Weichmacher, bei längerem Kontakt mit anderen Materialien in Richtung des Konzentrationsgefälles zu wandern; z. B. bei Lebensmittelverpackungen und -folien. Temperaturerhöhung erhöht die Migrationstendenz.

Die wichtigste Stoffgruppe der Weichmacher sind die Phthalate, Diester der Phthalsäure (Benzol-1,2-dicarbonsäure). Jahrzehntlang war Di(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP) der mengenmäßig wichtigste Vertreter dieser Stoffgruppe, vor allem für PVC. Wegen ihrer fortpflanzungsgefährdenden (reproduktions-toxischen) Eigenschaften wurden DEHP und drei weitere Phthalate im EU-Chemikalienrecht 2011 als besonders besorgniserregende Substanzen eingestuft und sind seit 2015 zulassungspflichtig [ECHA 2025c]. Seit 2013 hat die Europäische Chemikalienagentur ECHA zudem eine Reihe weiterer Phthalate (Einzelstoffe und Gemische) wegen ihrer Reproduktionstoxizität als besonders besorgniserregend eingestuft und somit als Kandidaten für eine Zulassungspflicht gelistet [ECHA 2025b]. Die meisten dieser Phthalate sind inzwischen zulassungspflichtig geworden.

Für PVC für Medizinprodukte (z. B. Infusionsschläuche), Spielzeug und Lebensmittelverpackungen werden als DEHP-Ersatzstoffe Cyclohexan-1,2-dicarbonsäurediisononylester (DINCH) und Bis(2-ethylhexyl)terephthalat (DEHT) verwendet, die nach bisherigem Kenntnisstand als weitgehend unbedenklich gelten.

Weitere Weichmacher vor allem für PVC sind Tris(2-ethylhexyl)trimellitat (CAS 3319-31-1), 2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandioldiisobutyrat (TXIB, CAS 6846-50-0) und Benzoessäureester wie Isononylbenzoat. Als Weichmacher werden außerdem Dioctyladipat (ein Diester der Hexandisäure), epoxidierte Fettsäureester (Soja- und Baumwollsaatöle) und in Kunststoffen für Lebensmittelverpackungen Citronensäureester wie Acetyltributylcitrat verwendet.

Eine weitere wichtige Gruppe von Weichmachern sind **Phosphorsäureester**. Sie haben eine sehr breite Verwendung, etwa in Teppichen, Schaumstoffen, Wandfarben, Glasfaser-

tapeten oder Bodenversiegelungen. In Matratzen und Polstermöbeln haben sie gleichzeitig auch die Funktion als Flammschutzmittel (s. 5.3.2), wobei meist ein Massenanteil von 30 % im Polymer notwendig ist. Mengenmäßig wichtige Vertreter sind Tris(2-chlorpropyl)phosphat (TCPP), Tri-iso-butylphosphat (TiBP) und Triphenylphosphat (TPP). Einige Phosphorsäureester sind erheblich toxisch; so wirkt z. B. TPP neurotoxisch. Fast alle Phosphorsäureester sind semiflüchtige Verbindungen. Auf dem Luftweg erfolgt eine weiträumige Verteilung und ein Eintrag in Ökosysteme.

6.1.2 Flammschutzmittel

Da die meisten Kunststoffe ganz oder überwiegend aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen (Rohstoffbasis: Erdöl), sind sie grundsätzlich brennbar und bei Einwirkung von Hitze und Flammen bereits bei relativ mäßigen Temperaturen entzündlich. Ein Flammschutzmittel ist eine Chemikalie, die bei Zusatz zu einem brennbaren Material die Entzündung verzögert und die Ausbreitung der Flammen reduziert, wenn dieses Material einem Feuer ausgesetzt ist. Der Zusatz eines Flammschutzmittels kann also den Kunststoff nicht unbrennbar machen. Die verwendeten Flammschutzmittel lassen sich nach ihrem Wirkungsmechanismus in mehrere Gruppen unterteilen. [Osterath 2015]

Die flammhemmende Wirkung von polybromierten und polychlorierten organischen Verbindungen beruht auf dem Abbruch der radikalischen Kettenreaktion der Verbrennung in der Gasphase. Bei Erhitzung des Kunststoffes werden aus dem Flammschutzmittel zunächst Brom- bzw. Chlorradikale freigesetzt. Durch Spaltung von Kohlenstoff-Wasserstoff-Bindungen im Polymer werden Brom- bzw. Chlorwasserstoff-Moleküle gebildet, die den Abbruch der radikalischen Kettenreaktion bewirken. Zur Verstärkung der Wirkung des halogenierten Flammschutzmittels wird dem Kunststoff Anti-

montrioxid im Mengenverhältnis von etwa 1:3 zum Flammschutzmittel zugesetzt, sodass der Massengehalt von Antimontrioxid im Polymer oft bei 3–6 % liegt.

Aluminiumtrihydroxid und Magnesiumdihydroxid spalten oberhalb von etwa 200 °C in einer endothermen Reaktion Wasser ab. Dadurch wird das Kunststoffmaterial abgekühlt und die Entzündung verzögert.

Durch Verdünnung des Kunststoffes mit einer nicht brennbaren Substanz wird dessen Brennbarkeit herabgesetzt. Dies ist auf zwei unterschiedlichen Wegen möglich:

- a) Zusatz inerter anorganischer Füllstoffe (z. B. Talkum)
- b) Abspaltung nicht brennbarer Gase aus dem Flammschutzmittel bei Erhitzung:
 - Abspaltung von Ammoniak, Stickstoff und CO₂ aus Melamin (2,4,6-Triamino-s-triazin)
 - Abspaltung von Ammoniak aus Ammoniumpolyphosphat

Alle anorganischen und organischen Phosphorverbindungen wirken in sauerstoffhaltigen Polymeren durch Bildung einer Schutzschicht durch Verkohlung als Flammschutzmittel. Phosphorverbindungen werden häufig in Kombination mit stickstoffhaltigen Verbindungen als Flammschutzmittel eingesetzt. Dadurch wird die Phosphorbindung im Polymer verstärkt und es bilden sich vernetzte Strukturen, welche bei Erhitzung die Verkohlung fördern. Phosphorsäureester werden außer in Matratzen und Polstermöbeln (s. 6.3.1) auch im Elektro- und Elektronikbereich als Flammschutzmittel verwendet.

Der globale Markt an Flammschutzmitteln von 2,3 Mio. t im Jahr 2023 teilt sich nach Stoffgruppen wie folgt auf [ECHA 2023; Ceresana 2024a].

Aluminiumtrihydroxid	38 %
Organophosphorverbindungen	17 %
Bromierte und chlorierte Substanzen	26 %
Antimonoxide	5 %
Andere	14 %

Die meisten bromierten und chlorierten Flammenschutzmittel haben als Additive eine Tendenz zur Verflüchtigung und unkontrollierten weiträumigen Ausbreitung in der Umwelt (s. 5.2). Als halogenierte Verbindungen sind sie in der Umwelt persistent, reichern sich folglich in Lebewesen an und zeigen oft auch eine erhebliche chronische Toxizität [Chen et al. 2023]. Aus diesem Grund wurden 2009 die technischen Gemische der Penta- und Octabromdiphenylether, 2011 das in geschäumten Polystyrolen zur Wärmedämmung verwendete Hexabromcyclododecan (HBCD) und 2017 der Decabromdiphenylether, in die Stockholm Konvention zu Persistent Organic Pollutants (POPs) aufgenommen mit dem Ziel der globalen Eliminierung [UNEP 2025]. Aus dem gleichen Grund wurden 2015 die kurzkettigen Chlorparaffine (SCCP) in der EU verboten und 2017 in die Stockholm-Konvention aufgenommen. Auch nach 2017 enthielten fast alle der 13 untersuchten technischen Chlorparaffin-Mischungen kurzkettige-Chlorparaffine (SCCP) (> 600 mg/kg), davon drei über dem Höchstwert von 1 % der EU und der Stockholm-Konvention [Guida et al. 2023]. Die SCPP wurden durch mittelkettige Chlorparaffine (MCCP) ersetzt, die ähnlich problematische Eigenschaften besitzen und zudem häufig erheblich mit SCPP verunreinigt sind. Ihre jährliche globale Produktionsmenge 2020 wurde auf rund 700.000 t geschätzt, verwendet vor allem als Flammenschutzmittel und Weichmacher in PVC-, Polyurethan- und Gummiprodukten [Chen et al. 2022]. Sie gelangen überwiegend durch Produktimporte nach Europa, vor allem aus China. Die ECHA hat 2021 MCCP als besonders besorgniserregend und somit als Kandidat

für eine Zulassungspflicht eingestuft [ECHA 2025b]. Im Mai 2025 wurde die Aufnahme als POP in die Stockholm-Konvention beschlossen [Stockholm-Konvention]. Mittlerweile werden die langkettigen Chlorparaffine (LCCP) mit hohen Produktionssteigerungsraten ebenfalls verwendet (2024 global 350.000 t/a) (Promarket Reports 2025) und vermehrt in der Umwelt gefunden [Yuan et al. 2022]. Informationen zur Toxizität der LCCP sind bisher rar [Chen et al. 2023]. Wegen ihrer Persistenz und Akkumulationsfähigkeit sind auch sie ebenso wie alle Chlorparaffine als problematische Additive anzusehen.

Es gibt einige bromierte Verbindungen, die chemisch in die Polymermatrix gebunden werden und deshalb als reaktive Flammenschutzmittel bezeichnet werden. So wird bei der Herstellung von Epoxidharzen und Polycarbonaten teilweise Tetrabrombisphenol A (TBBPA) an Stelle von Bisphenol A in die Makromoleküle eingebaut. Es ist gleichzeitig das bromierte Flammenschutzmittel mit der größten Verwendungsmenge von jährlich mehr als 150.000 Tonnen. Durch die chemische Bindung ist eine Verflüchtigung reaktiver Flammenschutzmittel im Gegensatz zur Verwendung als Additiv nicht möglich. Es erfolgt deshalb insgesamt nur eine vergleichsweise geringe Freisetzung aus Materialien in die Umwelt, z. B. durch Hydrolyse und durch Abrieb von kleinen Partikeln. Allerdings ist TBBPA inzwischen als wahrscheinlich krebserzeugend eingestuft (Kategorie 1B) und wurde deshalb Anfang 2023 in der EU als besonders besorgniserregende Substanz gelistet [ECHA 2025b].

6.1.3 Alterungsschutzmittel

Unter der Alterung von Kunststoffen und Kautschuk versteht man die Schädigung im Verlauf längerer Zeiträume durch Einfluss von (UV)-Licht, Sauerstoff, Ozon, Temperatur, Feuchtigkeit (auch sauer bzw. basisch) und Schwer-

metalle. Eine Verzögerung oder Hemmung der Alterung erreicht man durch den Zusatz von Stabilisatoren, die man in Antioxidantien und UV-Lichtschutzmittel einteilen kann. [Römpf 1998; Bonnet 2013]

Antioxidantien

Primäre Antioxidantien sind Radikalfänger, die durch Gabe eines Elektrons oder H-Atoms zu einem Radikal wirken, denn bei Autoxidationen treten freie Radikale auf. Als Radikalfänger sind folgende Substanzgruppen geeignet:

- Aromatische Amine: z. B. p-Phenylendiamin und Alkylverbindungen, alkylierte Diphenylamine
- Hydrochinone (1,4-Dihydroxybenzole)
- Brenzcatechine (1,2-Dihydroxybenzole)
- Mit sterisch hindernden Gruppen substituierte Phenole

Ein wichtiges Beispiel für die erste Gruppe ist N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylendiamin (6PPD; CAS 793-24-8), das als Antioxidans in Reifen und anderen Gummiartikeln mit einem Massenanteil von 0,4–2 % zugesetzt wird. 6PPD schützt den Gummi vor Oxidation durch bodennahes Ozon aus der Luft und wird dabei selbst zu 6PPD-Chinon oxidiert. 6PPD wird in der EU in großen Mengen im Bereich von jährlich 10.000–100.000 Tonnen verwendet. Durch den Reifenabrieb (in Deutschland jedes Jahr rund 100.000 Tonnen) gelangen große Mengen 6PPD und 6PPD-Chinon in die Umwelt. 6PPD-Chinon wurde als ursächliche Substanz für das weit verbreitete Sterben von Silberlachsen während der Laichzeit an der Westküste der USA identifiziert [Tian et al. 2020]. Das Beispiel 6PPD zeigt eine Lücke in der Chemikalienverordnung REACH auf: Nicht das bestimmungsgemäß entstehende hochtoxische Folgeprodukt 6PPD-Chinon wird bewertet, sondern nur das vergleichsweise ungefährliche Ausgangsprodukt 6PPD.

Ein Beispiel für die Gruppe der sterisch gehinderten Phenole ist BHT (3,5-Di-tert-butyl-4-hydroxytoluol). Neben der Verwendung in Gummiprodukten ist es auch als Antioxidans in Lebensmitteln (E321) sowie in Arzneimitteln und Kosmetika zugelassen.

Sekundäre Antioxidantien sind Peroxidzersetzer. Sie verhindern den Beginn der Oxidation durch Entfernung eines oxidativen Katalysators. Dafür werden folgende Stoffgruppen eingesetzt:

Organische Sulfide, Polysulfide, Dithiocarbamate, Phosphonate und Organophosphite (z. B. Tris-(4-nonylphenol)phosphit in Polystyrol und PVC, Triphenylphosphit in Farben und Polymeren).

Primäre und sekundäre Antioxidantien verstärken gegenseitig ihre Wirkung. Primäre Antioxidantien sind wenig wirksam gegen Oxidation durch UV-Licht.

UV-Lichtschutzmittel

Die Absorption solarer UV-Strahlung im Wellenlängenbereich von 280–400 nm ist eine der Hauptursachen für den Abbau von Polymeren. Die Sonneneinstrahlung kann bei Kunststoffen u.a. zu Verfärbung, Rissbildung und Versprödung führen. Dieser Prozess wird als photooxidativer Abbau bezeichnet. Alle technischen Polymere enthalten UV-Licht absorbierende Verunreinigungen wie Reste des Katalysators oder Lösemittel. Die Kettenreaktion, die für den Abbau der Polymere verantwortlich ist, wird durch die Absorption von UV-Strahlung gestartet. Die Polymerkette wird dabei in zwei Radikale gespalten, welche mit molekularem Sauerstoff Peroxyradikale bilden können. Unter Energieeinwirkung abstrahiert das Peroxyradikal ein Wasserstoffatom aus der Polymerkette, wobei sich ein Hydroperoxid und ein Alkylradikal bildet. Das Alkylradikal kann erneut mit

Sauerstoff zu einem Peroxyradikal reagieren. Das Hydroperoxid zerfällt in ein Alkoxyradikal und ein Hydroxylradikal. Diese radikalische Kettenreaktion wird nur beendet, wenn zwei Radikale miteinander reagieren.

Es gibt prinzipiell drei Möglichkeiten, um mit Additiven den photooxidativen Abbau von Polymeren zu verhindern:

- UV-Absorber
- Radikalfänger/Peroxidzersetzer (s. Antioxidantien)
- UV-Quencher

UV-Absorber verhindern den photooxidativen Abbau, indem sie die UV-Strahlung des Sonnenlichts herausfiltern und die Energie in Wärme umwandeln. Beispiele sind 2-Hydroxybenzophenon und 2-Hydroxyphenylbenzotriazol-Derivate. Letztere besitzen ein großes Absorptionsmaximum im Wellenlängenbereich von 300–400 nm. Allerdings sind zumindest einige dieser Substanzen in der Umwelt persistent und bioakkumulierend, sodass im EU-Chemikalienrecht 2014 und 2015 vier Stoffe (UV-320, UV-327, UV-328 und UV-350) als besonders besorgniserregende Substanzen eingestuft wurden und deshalb seit 2023 zulassungspflichtig sind [ECHA 2025c].

Als Radikalfänger/Peroxidzersetzer werden hauptsächlich sterisch gehinderte Amine verwendet, welche die reaktiven Photooxidationsprodukte abfangen. UV-Quencher können die angeregten Zustände der Chromophore zerstören und die Energie in unschädliche Wärme oder Licht umwandeln. Zu den wichtigsten Vertretern dieser Klasse gehören organische Nickelverbindungen.

6.2 VERWENDUNG PROBLEMATISCHER FLAMMSCHUTZMITTEL VERRINGERN

Da die diffuse Freisetzung von Additiven aus Kunststoffmaterialien während des Produktlebenszyklus nicht zu verhindern ist und die meisten polybromierten und polychlorierten organischen Verbindungen in der Umwelt (potenziell) persistent sind, werden hier Möglichkeiten beschrieben, wie additive halogenierte Flammenschutzmittel ersetzt bzw. vermieden werden können [Beard 2002; Troitzsch 2011; Maier, Schiller 2016].

6.2.1 Polymere bromierte Flammenschutzmittel

Eine Verflüchtigung von Makromolekülen ist nicht möglich und somit nur eine geringe Freisetzung aus Materialien in die Umwelt. Ferner sind Makromoleküle in der Regel nicht bioverfügbar. Polymere bromierte Flammenschutzmittel benötigen teils deutlich weniger Antimontrioxid als Synergist als andere Systeme. Bromierte Polystyrole werden als Flammenschutzmittel in Polyamiden eingesetzt. PolyFR ist ein Blockcopolymer aus Polystyrol und bromiertem Polybutadien. Es wird in Polystyrolschäumen (EPS, XPS) für Wärmeverbundsysteme als Ersatz für das seit 2018 in der EU verbotene additive Flammenschutzmittel Hexabromcyclododecan verwendet.

6.2.2 Polymere organische Phosphorverbindungen

Reaktive Phosphor(III)-polyole können an Stelle des seit 2004 in der EU verbotenen technischen Pentabromdiphenylethers für Polyurethan-Weichschäume (Polstermöbel, Matratzen) verwendet werden, Polyphosphonat-Homopolymere z. B. für lineare Polyester (PET, PBT), thermoplastisches Polyurethan (TPU) und für Polymilchsäure (PLA). Ein Blockcopolymer aus Polyphosphonat und

Polycarbonat wird als Flammenschutzmittel in Polycarbonaten eingesetzt.

6.2.3 Anorganische Phosphorverbindungen

Metallphosphinate (Titan, Zink, Eisen, Aluminium) können in Polyamiden, Polyestern, Epoxidharzen und PU-Harzen eingesetzt werden. Melaminpolyphosphat (MPP) und Ammoniumpolyphosphat (APP) wirken als Flammschutzmittel, indem sie über 250 °C zunächst Ammoniak abspalten und bei höheren Temperaturen eine verkohlte Oberflächenschicht bilden (s. 6.3.2).

6.2.4 Anorganische Hydroxide

Aluminiumtrihydroxid (ATH) und Magnesiumdihydroxid (MDH) können z. B. im Elektro- und Elektronikbereich halogenierte organische Flammenschutzmittel ersetzen. Sie haben bis zu 60 % Massenanteil im Polymer.

6.2.5 Inhärent flammgeschützte Polymere

Bei sauerstoffhaltigen Kunststoffen findet bei Erhitzung eine Dehydratisierung durch Wasserabspaltung statt, wodurch sich an der Oberfläche eine Schutzschicht durch Verkohlung bildet. Dies entspricht der Wirkungsweise von Phosphorverbindungen (s. oben), weshalb solche Kunststoffe keinen Zusatz eines Flammenschutzmittels benötigen. Solche inhärent flammgeschützte Polymere sind:

- Aromatische Polyamide (Aramide) werden im Elektro- und Elektronikbereich und für Spezialtextilien eingesetzt. (Aliphatische Polyamide zeigen hingegen nur wenig Verkohlung.)
- Polyarylsulfone (PPSU), Polyarylethersulfone (PES), Polyarylether (PAE), Polyaryletherketone (PAEK),
- Auch Polyphenylensulfide (PPS) sind selbst auslöschend.

Im Vergleich zu den gängigen Massenkunststoffen sind diese Polymere relativ teuer, weshalb sie bisher meistens in Spezialanwendungen zu finden sind.

6.2.6 Nicht brennbare und andere Dämmmaterialien für Gebäude

Als fast ebenso preisgünstige und wirksame Alternative zu flammgeschütztem geschäumtem Polystyrol für die Wärmedämmung von Gebäudefassaden ist nicht brennbare Mineralwolle (Steinwolle, Glaswolle) für die meisten Anwendungen möglich. Eine weitere Alternative sind Wärmedämmmaterialien aus Holz- oder Hanffasern [Gutex, Pavatex, Thermo-Hanf 2021]. Die Entwicklerin der ökologischen Alternative mit Hanf erhielt dafür 2013 den Deutschen Umweltpreis [DBU 2013].

6.3 DEFIZITE BEI DER REGULIERUNG VON ADDITIVEN

Decabromdiphenylethan (DBDPE) wird seit den 1990er Jahren als additives Flammschutzmittel als Ersatz für Decabromdiphenylether (DecaBDE) verwendet, seit dieses in der EU Ende 2012 u.a. aufgrund seiner Persistenz als besonders besorgniserregende Substanz eingestuft wurde [ECHA 2025b] und die Verwendung weitgehenden Beschränkungen unterliegt. Allerdings ist DBDPE ähnlich wie DecaBDE trotz der Schwerflüchtigkeit verbreitet in der Umwelt zu finden. So ist die Substanz in Bayern in der Luft nicht nur im städtischen Hintergrund zu finden, sondern auch auf der Zugspitze [Umweltbundesamt Österreich 2021]; der Eintrag in alpine Waldökosysteme durch atmosphärische Deposition konnte im Nationalpark Berchtesgaden bereits in Bodenproben (Streu- und Humusaufgaben) aus dem Jahr 2009 nachgewiesen werden [Körner 2023]. Hier handelt es sich offensichtlich um einen bedauerlichen Stoffersatz (*regrettable substitution*), denn hinsichtlich Persistenz zeigen diese beiden hochbromierten, strukturell eng verwandten

aromatischen Verbindungen keinen wesentlichen Unterschied. Für DBDPE ist in der EU noch keine Regulierung erfolgt.

Leider gibt es eine Reihe weiterer Beispiele, dass eine aufgrund von Persistenz und Bioakkumulation (und Toxizität) in der EU regulierte Chemikalie von den Herstellern durch eine strukturell verwandte Substanz mit ähnlichen problematischen Eigenschaften ersetzt wurde. Bei der Stoffgruppe der PFAS ist dies mehrfach erfolgt. So wurde die jahrzehntelang als Emulgator bei Fluorpolymerstellung eingesetzte Perfluorooctansäure (PFOA) durch die polyfluorierten Oxocarbonsäuren DONA und HFPO-DA (s. 6.2) ersetzt. Diese Ersatzstoffe sind jedoch ebenso hochpersistent und gelangen aus den nicht vollständig geschlossenen Produktionsanlagen durch Abluft und Abwasser in die Umwelt, wo sie u.a. in der Luft, im Niederschlag, in Böden und in Grund- und Oberflächenwasser nachweisbar sind [LfU 2013, LfU 2025, Gebbink, van Leeuwen 2020].

Die im EU-Chemikalienrecht REACH bisher vorgesehene Betrachtung und Regulierung jeder einzelnen Chemikalie hat sich also hinsichtlich des Umwelt- und Gesundheitsschutzes als langwierig und wenig wirksam erwiesen. Da bei organischen Chemikalien, die während ihrer Produktions-, Verwendungs- und Entsorgungsphase in die Umwelt gelangen können, die Persistenz die zentrale kritische Eigenschaft ist, besteht die Notwendigkeit der Weiterentwicklung von REACH. Für zahlreiche polybromierte und polychlorierte organische Verbindungen, die u.a. als Flammschutzmittel für Kunststoffe verwendet werden, gibt es eine Vielzahl publizierter Untersuchungen, die das Vorkommen in verschiedenen Umweltmedien und damit ihre Persistenz belegen [Covaci et al. 2011; Vorkamp & Rigét 2014]. Hier müsste eine Regulierung der gesamten beiden Stoffgruppen an Stelle einer weiteren Einzelstoff-

regulierung erfolgen, um wirkliche Fortschritte im stoffbezogenen Umwelt- und Gesundheitsschutz zu erzielen.

Tatsächlich hat die ECHA im März 2023 ihre Strategie zur Regulierung von Flammschutzmitteln veröffentlicht. Darin sind bromierte aromatische Flammschutzmittel als Kandidaten für eine EU-weite Beschränkung identifiziert, weil diese Stoffe im Allgemeinen in der Umwelt persistent sind [ECHA 2023]. Ein entsprechender Beschränkungsvorschlag, der auch einige nicht-aromatische bromierte Flammschutzmittel enthalten könnte, wird für 2025 in Aussicht gestellt.

Die Substanz 6PPD wird Gummimischungen für Fahrzeugreifen zugesetzt, um die oxidative Zerstörung der Reifenmatrix durch Ozon aus der Luft zu verhindern. Dabei wird 6PPD selbst durch Ozon zu 6PPD-Chinon oxidiert, um seine gewünschte Funktion zu erfüllen (s. 6.3.3, Abschnitt Antioxidantien). Dieses Folgeprodukt, welches außerordentlich giftig auf Silberlachse wirkt [Tian et al. 2020; 2022] und bei bestimmungsgemäßem Gebrauch in erheblichen Mengen beabsichtigt entsteht, muss jedoch nach derzeit geltendem Chemikalienrecht nicht auf evtl. gefährliche Eigenschaften untersucht und bewertet werden. Diese Lücke im EU-Chemikalienrecht REACH muss geschlossen werden.

Der Import von Bedarfsgegenständen und anderen verbrauchernahen Produkten aus Nicht-EU-Staaten entzieht sich bei Bestellungen über das Internet bislang weitgehend der behördlichen Kontrolle auf Schadstoffe. Der BUND hat 2024 stichprobenartig 15 Partyartikel aus dem Online-Handel auf Schadstoffbelastungen untersuchen lassen. In mehr als der Hälfte der Produkte waren gesetzliche Grenzwerte von gesundheitsschädlichen und verbotenen Additiven wie DEHP, anderen Phthalat-Weich-

machern und kurzkettigen Chlorparaffinen teilweise drastisch überschritten [BUND 2024]. Eine wirksame Kontrolle ist in diesem Bereich allein aufgrund der riesigen Zahl der online gehandelten Produkte kaum möglich. Allerdings sind die analytischen Kapazitäten der Marktüberwachungsbehörden völlig unzureichend. Ein umfangreiches Verbot von Schadstoffen in Produkten, das es bisher im EU-Chemikalienrecht REACH nicht gibt, ist dringend erforderlich.

6.4 ANFORDERUNGEN AN DAS RECYCLING

Bei Kunststoffen mit einem hohen Anteil an Additiven ist stoffliches Recycling problematisch, denn die Verschleppung gefährlicher Stoffe in verbrauchernahe Gegenstände ist leicht möglich. So fanden Behnisch et al. hohe Gehalte bromierter Flammschutzmittel und bromierter Dioxine/Furane in 48 Proben von Verbraucherprodukten und Spielzeug aus vier Kontinenten, die aus schwarzem Plastik hergestellt waren [Behnisch et al. 2023].

Das stoffliche Recycling geht am besten mit einfachen Kunststoffen, die keine oder nur geringe Gehalte an Additiven bzw. nur unproblematische Stoffe enthalten. Eine Reihe von Additiven wie Antioxidantien und UV-Lichtschutzmittel ist allerdings notwendig, um Kunststoffprodukte möglichst langlebig zu machen; die Erhöhung der Konzentration dieser Additive verlängert die Lebensdauer der Produkte. Ein Beispiel ist der Zusatz des Antioxidans 6PPD (s. 6.3.3), um den Gummi von Fahrzeugreifen vor der oxidativen Zerstörung durch Ozon aus der Luft zu schützen. Andererseits können auch viele anorganische Zusatzstoffe für das stoffliche Recycling störend sein. Es gibt einen gewissen Bedarf an Kunststoffen, die hochkomplex und hoch angepasst sind und viele Additive enthalten. Diese werden sich kaum recyceln lassen [Neubauer, 2023].

Alle anderen Kunststoffe sollten, sofern sie notwendig sind, so gestaltet werden, dass wir sie getrennt erfassen und mechanisch recyceln können. Die fehlende Deklaration von Additiven und ihre Vielfalt be- bzw. verhindert in vielen Fällen das werkstoffliche Recycling von Kunststoffen (s. Kap. 7.) Ein hochwertiges stoffliches Recycling lässt sich nur erreichen, wenn bei Massenkunststoffen die Vielfalt der Additive deutlich beschränkt würde [Steinhäuser & Große Ophoff 2025]. Eine verpflichtende transparente Positivliste der erlaubten Additive würde vor unvorhergesehenen Gefährdungen und Qualitätseinbußen in Recyclat-Kunststoffen schützen.

GESUNDHEITLICHE GEFAHREN DURCH ADDITIVE

Über 16.000 Chemikalien kommen für Plastik oder Plastikprodukte zur Anwendung oder können darin enthalten sein. Mehr als 4.200 dieser Chemikalien gelten aufgrund ihrer Eigenschaften als gefährlich, für 10.000 von ihnen fehlen Daten [Wagner et al. 2024].

Den direkten Zusammenhang zwischen einer Krankheit und Chemikalien als Auslöser festzustellen, ist bei der Vielzahl an Chemikalien in unserem Alltag und anderen Umweltfaktoren nicht leicht. Doch in der Gesellschaft sehen wir seit Jahrzehnten einen massiven Anstieg an Krankheiten, die durch Störungen an unserem Hormonsystem ausgelöst werden, wie etwa Brust- und Hodenkrebs. Die Anzahl von Spermien in der Samenflüssigkeit nimmt seit Jahren ab, von 1973–2018 im weltweiten Durchschnitt um 51 %. Dies führt zu steigender Unfruchtbarkeit bei

Männern [Levine et al. 2022]. Dieser massive Anstieg an hormonell bedingten Krankheiten lässt die Weltgesundheitsorganisation WHO zu dem Schluss kommen, dass die zunehmende Chemikalienbelastung einen Einfluss hierauf haben muss [WHO 2012].

Plastikadditive können aus den Produkten ausdünsten und über Hautkontakt, die Raumluft oder indirekt über Hausstaub in den Körper gelangen.

Ein Beispiel sind Phthalate, welche als Weichmacher vor allem in PVC eingesetzt werden (s. 6.3.1). Produkte aus PVC können zum Beispiel Kinderspielfiguren, Plastiktischdecken und Vinylböden sein. Da sie Jungs und Männer unfruchtbar machen können, wurde die Verwendung einiger Phthalate in der EU beschränkt [ECHA 2025a, Entry 51]. Diese Beschränkung kam spät, Studien über die hormonelle Wirksamkeit der Phthalate gab es bereits seit den 1990er Jahren [Gray jr. 2000] und man findet Phthalate bereits im Körper fast aller Deutschen. Die vierte Deutsche Umweltstudie zur Gesundheit in 2009 (GerES IV) ergab, dass alle untersuchten Phthalat-Metaboliten in fast allen Urinproben (N=599) nachweisbar waren. Kinder wiesen dabei drei- bis fünfmal höhere Konzentrationen auf als Erwachsene, die im gleichen Zeitraum analysiert wurden. Einige Kinder überschritten sogar den Human-Biomonitoring-Wert I (HBM I) von 500 µg/l für die Summe der Metaboliten 5OH-MEHP und 5oxo-MEHP, was darauf hindeutet, dass gesundheitliche Beeinträchtigungen bei diesen Individuen nicht mit aus-

reichender Sicherheit ausgeschlossen werden können [Becker et al. 2009]. Weich-PVC kommt ohne Weichmacher nicht aus, da es sonst spröde werden kann, die Additive können über 50 % ausmachen. Nach der Beschränkung der vier Phthalate werden nun häufig andere Phthalate sowie DINCH und Bis(2-ethylhexyl)terephthalat (DEHT) eingesetzt (s. 6.3.1). Dabei bleibt die Frage, ob diese weniger gut untersuchten Ersatzstoffe ähnliche negativen Auswirkungen haben.

Ähnliches ist der Fall bei Bisphenolen. Neben der Verwendung von Bisphenol A als Ausgangsstoff für Polycarbonat, ein durchsichtiger Kunststoff, welcher etwa für Messbecher oder für Getränkeflaschen bis 2024 eingesetzt wurde, ist es auch der Baustein für Epoxidharze die u.a. als Einbrennlacke zur Innenbeschichtung von Konservendosen verwendet werden. Weiter wurde Bisphenol A lange Zeit als Kupplungskomponente zur Schriftbildung in Thermopapieren für Kassenbons eingesetzt. Auch Bisphenole beeinträchtigen die Fruchtbarkeit und das Hormonsystem. Auch hier dauerte es viele Jahre für die Regulierung [Beronius et al. 2010]. Lange Zeit war BPA nur in Babyfläschchen (2011) danach in Kassenbons und anderen Thermopapieren verboten [ECHA 2025a, Entry 66]. 2023 erkannte die EU-Behörde für Lebensmittelsicherheit eine höhere Gefährdung durch BPA und senkte den bis dahin geltenden Grenzwert für die sogenannte duldbare tägliche Aufnahmemenge (TDI) um das 20.000-fache, von 4 Mikrogramm auf 0,2 Nanogramm pro Kilogramm

Körpergewicht und Tag. Erst darauf folgte Ende 2024 das Verbot in Lebensmittelkontakt-Materialien. In Frankreich gilt ein solches BPA-Verbot bereits seit Januar 2015. Das Verbot in Lebensmittelkontaktmaterialien gilt für Bisphenol A und Bisphenol S. Längst weisen Studien allerdings darauf hin, dass auch andere Bisphenole, welche als Alternativen eingesetzt werden, hormonell wirksam sind [Reininger & Oehlmann 2024]. Die Fälle zeigen, dass zum einen die Regulierung von Schadstoffen unter der Chemikaliengesetzgebung REACH sehr langsam ist und oft nur einzelne Chemikalien verboten werden, die das Problem zu ähnlich problematischen Chemikalien verschieben. Daher befürworten viele Forschende, ganze Gruppen von (schädlichen) Chemikalien zu regulieren. Außerdem sind die hohen Gesundheitskosten zu bedenken, die durch Plastikmaterialien entstehen. Es wird geschätzt, dass allein in den USA die Chemikalien in Kunststoffen Gesundheitskosten von \$22,4 Milliarden US Dollar jedes Jahr verursachen [Trasande et al. 2024].

LEBENSMITTELKONTAKT-MATERIALIEN

Chemikalien aus Lebensmittelkontaktmaterialien (FCM) können in verpackte Lebensmittel übergehen und vom Menschen aufgenommen werden. Insbesondere Plastikverpackungen enthalten eine Vielzahl von Chemikalien. Mehr als 14.000 Chemikalien aus Lebensmittelkontaktmaterialien sind in Datenbanken erfasst, wovon ca. 12.000 absichtlich hinzugefügt und ca. 2.000 nicht gezielt zugesetzt werden, wie Restmonomere, Degradations- und Abbauprodukte. Viele dieser Chemikalien können in Lebensmittel migrieren und zur Chemikalienbelastung des Menschen beitragen [Geueke et al., 2024; Muncke et al., 2025]. Um systematisch Daten über Chemikalien zu sammeln, die aus Lebensmittelkontaktmaterialien extrahiert werden können oder in Lebensmittel oder Lebensmittelsimulanzien¹ migrieren, wurde von einer internationalen Arbeitsgruppe eine Datenbank erstellt [Groh et al., 2021]. Diese Datenbank enthält 12.285 Chemikalien und ist öffentlich zugänglich. Plastik ist das am häufigsten untersuchte Material, mit 1.975 analytisch nachgewiesenen Chemikalien [Geueke et al., 2023]. Dies spiegelt die hohe chemische Komplexität und die breite Verwendung von Plastik in Lebensmittelverpackungen wider. In Biomonitoringstudien mit menschlichem Blut oder Nabelschnurblut wurden zahlreiche Chemikalien aus Lebensmittelkontaktmaterialien nachgewiesen [Wang et al., 2021]. Am häufigsten wurden Phthalate und ihre Metabolite, die Anti-

¹ Modellstoffe, die in Migrationstests anstelle von Lebensmitteln eingesetzt werden.

oxidantien tert.-Butylhydroxytoluol (E 321) und 2,4-Di-tert-butylphenol, sowie Decamethylcyclopentasiloxan und Dodecamethylcyclohexasiloxan und auch Bisphenole und per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) nachgewiesen [Muncke et al., 2023]. Das Vorkommen von PFAS in Lebensmittelkontaktmaterialien ist besonders bedenklich, da diese mehrere Tausend Chemikalien umfassende Stoffgruppe als sogenannte Ewigkeitschemikalien nicht abgebaut werden und sich deshalb in steigenden Konzentrationen über den gesamten Globus verteilen [Brunn et al., 2023]. Viele Vertreter dieser Stoffgruppe sind bei sehr niedrigen Konzentrationen chronisch toxisch. Insbesondere Papier und kompostierbare Behälter, aber auch mehrere Plastikmaterialien zur Verpackung von Lebensmitteln sind mit PFAS beschichtet, wobei Fluortelomeralkohole, Phosphorsäureester und seitenkettenfluorierte Polymere besonders häufig sind [Barhoumi et al., 2022, Schwartz-Narbonne et al., 2023]. Die OECD veröffentlichte einen Bericht, in dem sie Alternativen zu PFAS in Lebensmittelverpackungen aufzeigt [OECD 2020]. Bei einigen dieser Stoffe ist inzwischen die Verwendung in Lebensmittelkontaktmaterialien in der EU verboten oder stark eingeschränkt. So sind seit Dezember 2024 in der EU einige Bisphenole und Bisphenol-Derivate nicht mehr in Lebensmittelkontaktmaterialien zugelassen [Europäische Kommission, 2024b]. Die Chemikalien können zwar auch auf anderen Expositionswegen in den Menschen gelangen. Lebensmittelkontaktmaterialien leisten jedoch offensichtlich einen wesentli-

chen Beitrag. Alarmierend ist, dass von 235 im Biomonitoring nachgewiesenen Chemikalien aus Lebensmittelkontaktmaterialien 100 besorgniserregende Chemikalien (chemicals of concern) sind – mit krebserzeugenden, erbgutverändernden, reproduktionstoxischen und hormonellen Wirkungen oder spezifischer Organtoxizität. Eine systematische Analyse von 470 Studien zu Chemikalien in Plastikverpackungen zeigt, dass 1.086 der 1.346 analysierten unter bestimmten Bedingungen auf Lebensmittel übergehen könnten. Dies bedeutet, dass 81 % der Chemikalien laut den Studien vom Menschen aufgenommen werden können (Exposition) [Geueke et al. 2023]. Die übliche Beurteilung der Toxizität auf der Basis einzelstoffspezifischer Daten greift hier zu kurz, da die schädliche Wirkung sich aus dem Zusammenwirken zahlreicher Komponenten ergibt [Muncke et al., 2023]. So zeigen viele Eluate aus Plastikverpackungen eine höhere in vitro-Toxizität als sich aus den Daten der Einzelstoffe ergibt [Zimmermann et al., 2021].

In der EU sind Lebensmittelkontaktmaterialien durch die Verordnung 1935/2004 geregelt [EU 2004]. Demnach bedürfen neue Zusatzstoffe einer Zulassung. Daten sind bei der Lebensmittelbehörde EFSA einzureichen, wobei durch Migrationstests der Übergang in Lebensmittel zu prüfen ist [EFSA 2021]. Derzeit sind ca. 1.000 Chemikalien aus Lebensmittelkontaktmaterialien gelistet [EU 2011b], wobei für viele dieser Stoffe keine allgemein verfügbaren Analyseverfahren existieren, was die Überwachung erschwert [Muncke

et al., 2023]. Eine besondere Kategorie sind die „aktiven und intelligenten“ Chemikalien aus Lebensmittelkontaktmaterialien, die in der Verordnung 450/2009 geregelt sind [EU 2009]. Diese treten in Wechselwirkung mit dem verpackten Lebensmittel, indem sie anzeigen, dass es verdorben ist oder es länger frisch halten. Derartige Chemikalien sind überflüssig und vermeidbar und leisten auch keinen nützlichen Beitrag zur Verminderung von Lebensmittelabfällen.

Recyceltes Plastik ist nur selten als Lebensmittelkontaktmaterial geeignet, da sich Schadstoffe im Plastik während des Recyclingprozesses anreichern können und Bruchstücke des Polymers und Transformationsprodukte enthalten sein können.

Biokunststoffe (bioabbaubare Kunststoffe und Kunststoffe aus biologischen Grundstoffen) und andere pflanzenbasierte Materialien werden oft als nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Kunststoffen angepriesen. Diese können jedoch ebenfalls gefährliche Chemikalien enthalten und zeigen ähnliche toxikologische Profile wie klassische Kunststoffe [Zimmermann et al., 2020].

Besonders hoch sind die Konzentrationen von Chemikalien aus Lebensmittelkontaktmaterialien in hochverarbeiteten Lebensmitteln (ultraprocessed food, UPF), deren Marktanteil steigt [Yates et al., 2024, Muncke et al., 2025]. Hochverarbeitete Lebensmittel werden häufig in kleinen Packungsgrößen angeboten. Bei der Zubereitung kommen

sie auf vielfältige Weise mit Plastik in Kontakt. Epidemiologische Studien zeigen höhere Chemikalienbelastungen bei Bevölkerungsgruppen, die sich vorwiegend von hochverarbeiteten Lebensmitteln ernähren [Lane et al. 2024].

Offensichtlich reichen die rechtlichen Bestimmungen nicht aus, um die Bevölkerung hinreichend vor der Aufnahme gesundheitsgefährdender Chemikalien aus Lebensmittelkontaktmaterialien zu schützen. Zimmermann et al. stellen heraus, dass 388 Chemikalien aus Lebensmittelkontaktmaterialien die Kriterien erfüllen, die in der EU „Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit“ [EU-Kommission 2020] genannt werden. Bei vielen ist die Migration in Lebensmittel nachgewiesen [Zimmermann et al., 2022]. Sofern Lebensmittelverpackungen überhaupt erforderlich sind, gibt es auch sichere Produkte auf dem Markt, die keine bekannten gefährlichen Chemikalien enthalten oder zumindest diese nicht in Lebensmittel übertragen. Hersteller müssen die chemische Zusammensetzung und die Verarbeitungsschritte ihrer Kunststoffprodukte offenlegen. Grundsätzlich sollte mindestens gelten, dass Lebensmittelkontaktmaterialien keine gefährlichen und keine ungeprüften Chemikalien enthalten dürfen.

7 Recycling von Kunststoffen

7.1 MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN DES STOFFLICHEN RECYCLINGS

Nicht mehr mechanisch rezyklierbare Kunststoffabfallfraktionen werden in Zementwerken, Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen meist energetisch verwertet. Im Jahr 2023 wurden 34 % der gesammelten, sortierten und vorbehandelten Kunststoffabfälle (Post-Consumer-Abfälle und Post-Industrial-Abfälle) in Deutschland wieder als Rezyklat eingesetzt. Weniger als 1 % der Abfälle wurden deponiert, weniger als 4 % wurden für das stoffliche Recycling in das Ausland verbracht und über 60 % thermisch verwertet; in Müllverbrennungsanlagen oder als Ersatzbrennstoff zum Beispiel in Zementfabriken. Der Anteil von Rezyklat aus Post-Consumer-Abfällen in der Gesamt-Kunststoffverarbeitung betrug 12,8 % [Jepsen et al., 2020]. Der Einsatz von Rezyklat aus Post-Consumer-Abfällen hat in allen Anwendungsbereichen zugenommen, zum Beispiel im Bauwesen, bei den Verpackungen, im Bereich Landwirtschaft, Gartenbau & Forstwirtschaft sowie im Bereich Fahrzeuge [Conversio 2024].

Das stoffliche Recycling von Kunststoffabfällen wird durch verschiedene Faktoren begrenzt. Generell sind die meisten Kunststoffe nur bedingt kreislauffähig: Ein Qualitäts- und Materialverlust sowohl während der Gebrauchsphase als auch beim Recycling ist unvermeidbar. Recycling hat physikalische, technische, wirtschaftliche und logistische Grenzen.

Physikalische und technische Grenzen sind der Materialverschleiß, die Thermodynamik, Farbsortierung, Geruch und Verunreinigungen. Kunststoffe verlieren mit jedem Recyclingzyklus an Qualität (Downcycling) und an Material (Dissipation). Auch können rein thermody-

namisch Polymere und Additive nicht mehr entmischt werden. Andere Verluste sind funktional bedingt, wie z. B. Reifenabrieb. Zudem benötigt Recycling Energie, um Materialien aufzubereiten – oft mehr als die Neuproduktion. Für den Rezyklateinsatz entscheidend sind die mechanischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften der Rezyklate. Die Qualität der Rezyklate wird durch Alterungsprozesse (u.a. infolge von UV-Strahlung, Feuchtigkeit oder Temperatur), den Recyclingprozess selbst (mechanische, thermische Beanspruchung) oder sog. Vermischungsschäden (unvollkommene Trennprozesse oder Compoundierung der Ausgangsstoffe) beeinflusst [Quicker & Seitz 2024]. Die den Kunststoffen zugesetzten, unbekanntem Additive und Fremdstoffe (IAS und NIAS) finden sich in dem Rezyklat wieder.

Vermischte oder beschichtete Materialien (z. B. Mischkunststoffe oder Kunststoffe mit anderen Materialien wie z. B. Papier) sind schwer und oft nicht recycelbar und werden daher verbrannt. Kunststoffe wie Epoxydharze und andere Duroplaste (z. B. Polyurethan) lassen sich nach aktuellem technischem Stand nicht stofflich verwerten.

Wirtschaftliche Grenzen sind die hohen Kosten, fehlende Nachfrage, fehlende Subventionen und Anreize wie Quoten. Recycling ist heute oft teurer als die Produktion aus neuen Rohstoffen. Viele recycelte Materialien haben geringere Qualität und wenige Abnehmer/innen. Ohne politische Unterstützung ist Recycling wirtschaftlich oft nicht tragfähig.

Logistische und gesellschaftliche Herausforderungen sind die unzureichende Trennung, globale Abfallströme und fehlende Infrastruktur. Verbraucher/innen trennen oft unsachgemäß, was Recycling unmöglich oder ineffi-

zient macht. Schlechtes Verpackungsdesign, fehlende Sammelinfrastruktur (u.a. Trennung in Lebensmittel und Nicht-Lebensmittel) und fehlendes Wissen sind die Gründe. Gemischter Plastikmüll darf laut der Basel Konvention nicht mehr exportiert werden, dennoch landet deutscher Plastikmüll noch immer in Ländern wie der Türkei. Dort gibt es keine geeigneten Recyclinganlagen und auf wilden Müllhalden kommt es zu Bränden. Deutschland, einst Vorreiter bei der Kreislaufwirtschaft, rangiert nur noch im Mittelfeld [Eurostat 2021]. Einigkeit herrscht darüber, dass Deutschland zwar die Entsorgung stetig optimiert hat, sich jedoch zu wenig auf den Aufbau jener Systeme konzentriert hat, in denen Abfälle als Rohstoffe für die hiesige Wirtschaft, die zumeist und insbesondere im Plastik- und Chemiebereich auf fossilen Rohstoffen basiert, rückgewonnen werden.

Auch der EU-Kommission ist bekannt, dass die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, Rohstoffen und die fehlende Kreislaufwirtschaftsinfrastruktur Europas größte wirtschaftliche Schwäche ist [Europäische Kommission 2024b]. Eine zirkuläre Wirtschaft könnte diese Lücke schließen, doch Schlüssel-Investitionen in notwendige Infrastrukturen insbesondere für die ersten Stufen der Abfallhierarchie wie Plastikvermeidung, Wiederverwendung und mechanisches Recycling fehlen genauso wie Designvorgaben, die die Vielfalt, Transparenz und Sicherheit der verwendeten Chemikalien regeln. Ein Ausbau von Recycling-Infrastrukturen könnte jedoch zu Lock-In Prozessen führen [Syberg 2022], die verhindern, dass man Ressourcen auf wirksamere regulatorische Hebel wie die Vermeidung von Plastik und Wiederverwendung (Pfandsysteme) fokussiert [Wang et al. 2023], die zudem weniger klimaschädlich sind.

Kunststoffe enthalten Chemikalien (Additive), die beim Recycling stören bzw. freigesetzt werden können. Kritisch sind nicht nur besonders

besorgniserregende Stoffe (SVHC) zu sehen, sondern auch wenig toxische Störstoffe wie Carbon Black, das die Nahinfrarot-Erkennung in der Sortieranlage stört. Alle Weichmacher beeinträchtigen die Extrusion des Sekundärplastik.

In Deutschland werden folgende kunststoffenthaltende Fraktionen getrennt gesammelt: Verpackungen und Plastikfraktionen über haushaltsnahe Wertstofffassung sowie von Gewerbe („gelbe Tonne“), meist bereits nach Fraktionen getrennte Bau- und Abbruchabfälle, Sperrmüll, Altfahrzeuge sowie Elektro- und Elektronikaltgeräte. Es gibt vielfach einen erheblichen Abstand zwischen dem Stand der Technik und der industriellen Praxis. Es zeigt sich, dass die Praxis des Kunststoffrecyclings vor allem in der Umsetzung des bereits vorhandenen Standes der Technik sowie in einem anderen Produktdesign liegt und weniger in der Erschließung weiterer technischer Innovationen [Quicker & Seitz 2024].

Die Umsetzung einer verbesserten Sammlung und Sortierung sind nötig, denn eine hochwertige Verwertung ist darauf angewiesen, dass eine saubere Auftrennung nach Sorten erfolgt. Oft reicht eine Auftrennung nach Polymerarten nicht. Problematisch sind Additive (und Verunreinigungen), denn diese können die für die Detektion und Sortierung genutzten physikalischen oder chemischen Eigenschaften überlagern, so dass sich nicht einmal die Kunststoffarten sauber auftrennen lassen. Daher sollten u.a. folgende Potenziale zur Verbesserung der Sortierung weiterverfolgt und in Anwendung gebracht werden: Nutzung von Markern und digitalen Wasserzeichen, Sortierung nach Produktform in Zusammenhang mit KI-unterstützter Bilderkennung, ggf. Flotationsverfahren und Einsatz weiterer Detektoren bzw. Sensoren. Der digitale Produktpass sollte die Anforderungen der Recycling-Industrie unbe-

dingt berücksichtigen. Im Rahmen der weiteren Verarbeitung nach Auftrennung der Plastikabfälle in Kunststofffraktionen sollten folgende Themen Beachtung finden: Verbesserung der Reinigungsleistung der Wäsche, Verringerung des Energie- und Wassereinsatzes in der Wäsche, anforderungsgerechte Aufbereitung.

Durch neue Technologien, die Lasertechnologie, Spektroskopie und Digitalisierung miteinander kombinieren bestehen zukünftig deutlich verbesserte Möglichkeiten für das mechanische Recycling. Eine Technologie arbeitet z.B. nach dem folgenden Muster: Zunächst werden die Kunststoffe oder anderen Werkstoffe wie Metalle in kleine Stücke aufgeteilt (Flakes). Diese Flakes werden dann mit einem Laser angestrahlt und die reflektierten Lichtemissionen gemessen. Durch eine digitale spektroskopische Auswertung kann die Art des Kunststoffs oder der Metalllegierung in Sekundenbruchteilen erkannt werden. Die Sortierung erfolgt dann durch Luftstrahlen, die jedes einzelne erkannte Flake in entsprechende Behälter befördern. Pro Sekunde können so viele 100.000 Teile erkannt und sortiert werden. Die Laser können zudem Oberflächenverschmutzungen oder Beschichtungen durch einen kurzen energiereichen Impuls verdampfen, dem dann der Messimpuls für die gereinigte Stelle des Flakes folgt. Diese Verfahren sind bereits beim Recycling von PET-Einwegflaschen bewährt und etabliert. Sie sind in der Lage zielgenau das PET der Flaschen vom PVC der Flaschenverschlüsse abzutrennen. Außerdem erkennt die Spektroskopie auch verunreinigten Kunststoff, beispielsweise, wenn Altöl in einer solchen Flasche gelagert wurde, und kann diesen verunreinigten Kunststoff sicher ausschleusen. Das gewonnene Recycling-PET liegt wieder in Lebensmittelqualität vor und es können daraus neue Flaschen hergestellt werden [Spilok 2015, Unisensor 2025].

Recycling allein kann die komplexe Multikrise (Biodiversitäts-, Ressourcen-/Verschmutzungs-, Klima-) nicht lösen. Vermeidung und Wiederverwendung von Kunststoffen sind effektiver und ressourcenschonender, es müssen daher zunächst alle bestehenden Vermeidungsmaßnahmen ausgeschöpft werden. Auch hochwertiges stoffliches Recycling hat Grenzen: technischer, infrastruktureller, physikalischer und wirtschaftlicher Art. Große Potentiale bestehen im Produkt-Design (Design for Recycling) und im Design von Systemen, im Ausbau der Sammel-, Sortier- und Aufbereitungsinfrastruktur für das hochwertige mechanische Recycling und in der Beschränkung auf bestimmte Kunststoffe und Zusatzstoffgruppen sowie die Transparenz über die Inhaltsstoffe. Erst wenn diese Potentiale (durch striktere Regulierung und/oder finanzielle Anreize) gehoben sind, können thermochemische Verfahren in bestimmten Sektoren und bei bestimmten Produkten sinnvoll sein. Um tatsächlich ressourcenschonend zu wirtschaften im Sinne der Kreislaufwirtschaft der EU [Europäisches Parlament 2023] sind interdisziplinäre Ansätze, akkurate Analysen und systemische Veränderungen sowie Infrastrukturaufbau nötig, um Primärressourcenverbrauch und Umweltbelastung wirksam zu reduzieren. Kreislaufwirtschaft ist kein „magischer Schlüssel“ zu einer nachhaltigen Wirtschaft, der „grünes Wachstum“ ermöglicht. Die Minderung der Stoffströme durch Suffizienz ist zur Erreichung der Umweltziele notwendig. Bereits seit Jahrzehnten bewerben Konzerne wie Exxon-Mobil und ihre Verbände Recycling als Lösung, obwohl sie wussten, dass mechanisches Recycling technisch und wirtschaftlich nicht flächendeckend umsetzbar ist. Intern räumte ein Exxon-Mitarbeiter bereits 1994 ein: „we are committed to the activities, but not committed to the results“ [Allen et al. 2024]. Irreführende Marketingkampagnen dienen vor allem dazu, Regulierungen zu vermeiden und den Absatz

von Einwegkunststoffen zu sichern. Indem Recycling als Lösung dargestellt wurde, konnte das Wachstum der Produktion ungehindert fortgesetzt werden.

Da es Hinweise darauf gibt, dass Industrieverbände seit langem wider besseres Wissen falsche Versprechen hinsichtlich der Recycelbarkeit von Kunststoffen machen, hat Kalifornien ein Gerichtsverfahren gegen Exxon begonnen [Allen et al.2024].

7.2 SINN UND UNSINN DES CHEMISCHEN RECYCLINGS (FÜR SYNTHESGRUNDSTOFFE)

Den Verfahren des sogenannten chemischen Recyclings wird das Potenzial zugeschrieben, künftig auch Kunststoffabfälle stofflich zu verwerten, die derzeit in Zementwerken oder Müllverbrennungsanlagen energetisch genutzt werden. Neben der Erschließung neuer Stoffströme für die Kreislaufwirtschaft wird als weiterer Vorteil die Möglichkeit zur Entfernung von Schadstoffen („Detoxifikation“) aus dem Kreislauf genannt.

Die unter dem Begriff „chemisches Recycling“ zusammengefassten Verfahren unterscheiden sich stark hinsichtlich der Einsatzstoffe, Technologie, Hilfsenergie- und Verwendung von Hilfsmitteln, Qualität der erzeugten Produkte sowie Aufwand zur weiteren stofflichen Nutzung.

Das Umweltbundesamt [Quicker & Seitz 2024] sieht diese Verfahren in technisch ausgereiften, energieintegrierten und optimierten Anlagen als potenziell positiven Beitrag zur Kreislaufwirtschaft – aber nur wenn die Potenziale des mechanischen Recyclings (insbesondere durch Produktdesign, Sammlung, Sortierung, Aufbereitung) ausgeschöpft sind sowie nur für bestimmte Sektoren und Produkte.

Die Datenlage zu chemischem Recycling ist lückenhaft. Systemgrenzen werden oft nicht benannt, insbesondere Daten zu Chemikalien oder Schadstoffen fehlen oder werden nicht veröffentlicht.

Laut Umweltbundesamt [Quicker & Seitz2024] ist chemisches Recycling wie folgt definiert: „Prozessketten, in denen Polymere ganz oder teilweise in ihre Bestandteile zerlegt werden, die anschließend stofflich – zur Erzeugung neuer Polymere oder anderer Stoffe – verwendet werden. Eine energetische Nutzung (abgesehen von Nebenprodukten) findet nicht statt.“ Enthalten in dieser Definition sind ebenfalls lösungsmittelbasierte Verfahren wie Solvolyse, diese können ein Entgiftungspotenzial besitzen. So werden im CreaSolv-Verfahren bromierte Flammschutzmittel in Polystyrol erfolgreich abgetrennt, während im Vinyloop-Verfahren es nicht gelang, Phthalat-Weichmacher aus PVC zu entfernen [Altnau & Hamann 2024, VINYLOOP 2001, 2018].

Thermochemische Verfahren (Verölung, Pyrolyse, Gasifizierung) wurden von Quicker und Seitz insbesondere hinsichtlich Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen analysiert [Quicker & Seitz 2024]. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass mechanisches Recycling energieeffizienter ist. Die thermochemischen Verfahren können jedoch gegenüber energetischer Verwertung durch Verbrennung signifikant Treibhausgase einsparen. Die Datenlage ist jedoch unterschiedlich zu bewerten, fundierter lassen sich Aussagen treffen zu den Ansätzen der Verölung und Pyrolyse, im Bereich Gasifizierung bestehen noch größere Wissenslücken.

Die Nutzenkorbmethode angewendet durch Quicker & Seitz zeigte eindeutig: Die thermochemischen Verfahren sind dem mechanischen Recycling eindeutig und der Verwertung

im Zementwerk nur moderat unterlegen. Die Verfahren bieten aber teils Möglichkeiten zur Schadstoffentfernung aus den Rezyklaten, dazu liegen aber keine belastbaren, unabhängigen Studien vor.

Die Verölung kommt auf Kohlenwasserstoffausbeuten von ca. 80 % und die Pyrolyse auf ca. 70 %.

Die in dem Input-Material enthaltenen Schadstoffe und Heteroatome werden zu relevanten Anteilen in die Kohlenwasserstofffraktionen überführt und müssen vor der weiteren Verwertung entfernt werden. Quelle für die Verunreinigungen bei Polyolefinen sind Füll- und Farbstoffe, Lackierungen und andere Additive. Eine Aufbereitung der Öle durch Wäsche, Destillation, Filterung, Adsorption und Hydrierung ist erforderlich, um Metalle, Asche, Chlor, Stickstoff, Sauerstoff und andere Verunreinigungen sowie auch den hohen Anteil an ungesättigten Verbindungen, zu entfernen oder zu hydrieren [Quicker & Seitz 2024]. Um die entstehenden Öle in Steamcrackern für die Kunststoffproduktion einzusetzen, müssen sie Qualitätskriterien erfüllen, die von den Betreibern definiert werden.

Die drei Verfahren – Gasifizierung, Pyrolyse und Verölung – können wasserintensive Reinigungsprozesse benötigen, insbesondere durch den Einsatz von Nasswäschern, was zu hohem Wasserverbrauch und möglicher Wasserverunreinigung durch Schadstoffe wie Halogene, Teere und Stickstoffverbindungen führt. Die Gasifizierung ist hierbei besonders komplex und sensibel gegenüber Schadstoffen im Rohgas. Konkrete Zahlen zu Verbräuchen und Verschmutzung sind aktuell nicht bekannt.

Während die Pyrolyse und Vergasung ohne reaktive Zusatzstoffe betrieben wird, benötigen die anderen Prozesse chemische Reaktionen

mit Lösungsmitteln oder anderen Reaktanden zur Depolymerisation. Die wichtigsten Verfahren sind Solvolyse, Verölung (engl. Liquefaction) sowie die hydrothermale Depolymerisation.

Die Solvolyse, also Zersetzung der Polymere in Oligomere oder Monomere, wird in erster Linie bei sogenannten Kondensationspolymeren angewendet, wobei diese wieder „Schritt für Schritt“ zu Monomeren rückgebaut werden, [Maisels et al., 2021]. Die wichtigsten Vertreter sind Polyurethan (PU(R)), Polyethylenterephthalat (PET) und Polyamid (PA). Für die Solvolyse werden angepasste Lösungs- bzw. Reaktionsmittel eingesetzt, woraus die verschiedenen Bezeichnungen für die jeweiligen Prozesse resultieren, z. B.: Glycolyse - Ethylenglykol, Aminolyse – Ethylenamin, Methanolyse – Methanol, Hydrolyse – Wasser. Insofern ist die Solvolyse ein deutlich selektiveres Recyclingverfahren als die Pyrolyse.

Das PU-Recycling wird für Matratzen- und Polsterschäume angewandt. Es resultieren Polyole, die wieder polymerisiert werden können. Beim PET-Recycling handelt es sich meist um Verpackungsmaterial aus der Lebensmittelindustrie sowie Fasern. Endprodukte sind monomere Verbindungen wie Terephthalsäure und Ethylenglycol. Für beide Polymergruppen, PU und PET, kommen meist die Glycolyse oder Methanolyse zum Einsatz. Polyamid aus technischen sowie textilen Anwendungen und Fischernetzen kann z. B. über Aminolyse recycelt werden [Maisels et al. 2021].

Bei der Verölung wird unter Zuhilfenahme eines Startöls gearbeitet. Die Kunststoffabfälle werden direkt thermisch oder katalytisch in einem Rührkesselreaktor zersetzt. Hauptprodukt ist ein flüssiges Kohlenwasserstoffgemisch. Bisherige Verölungsprozesse wurden vor allem zur Dieselgewinnung und auch selten aus Kunststoffabfall praktiziert. Die Verölung

wird als perspektivreiches Verfahren zur Verwertung ausgewählter Kunststoffe und kunststoffreicher Reststoffgemische eingeschätzt. Allerdings bedarf es einer Reihe weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Verölungungsverfahren sind keine „Allesfresser“. Für Verölungsprozesse sind Kunststoffe aus der Gruppe der Polyolefine, vornehmlich PE und PP, geeignet.

Bei der hydrothermalen Verflüssigung werden Kunststoffabfälle unter Zusatz von überkritischem Wasser und Katalysator unter hohem Druck zu ähnlichen Produkten wie in der Pyrolyse gespalten (Naphtha, leichtes Öl). Industrielle Wachse und Bitumen entstehen jedoch dabei kaum.

2024 wurden ca. 100.000 Tonnen/Jahr durch die o.g. Verfahren in Europa verwertet, 2025 sollten es 1,2 Millionen Tonnen sein, dies wurde aber nicht erreicht. Laut C4C-Studie [VCI & VDI 2023] könnten 2045 in Deutschland 2,23 Millionen Tonnen chemisch verwertet werden (und 3,16 mechanisch). Der Rest muss energetisch verwertet werden.

Expert/-innen aus Politik und Wissenschaft zweifeln an der Relevanz der chemischen Verwertungsverfahren. Es wird prognostiziert, dass 2040 global nur ca. 3 % aller Kunststoffabfälle so verwertet werden können (15,4 Mio. t) [Nordischer Ministerrat 2023]. Auch das UBA prognostiziert, dass auch künftig der Beitrag von Pyrolyseöl zur Chemieindustrie nur 5–12 % des Inputs für Steamcracker in Deutschland abdecken könnte [Umweltbundesamt 2025b]. Zero Waste Europe stellt fest, dass auch nach 50 Jahren bisheriger Entwicklung Pyrolyse-Verfahren keine nachhaltige oder effektive Lösung sind [Veillard 2024]. Insbesondere sei Pyrolyse teuer, ineffizient und benötige große Mengen fossiler Rohstoffe. In einem Report weist UNEP darauf hin: Die-

se Verfahren reinigen Polymere theoretisch, aber es bleibt unklar, ob bedenkliche Stoffe im Output verbleiben [UNEP 2023]. Auch müssen Emissionen (Luft, Wasser, feste Rückstände) berücksichtigt werden. Darauf verweisen ebenso weitere Studien zur Pyrolyse, die Emissionen von Stickoxiden, Ammoniak und Dioxinen neben anderen relevanten Emissionen nennen [Sphera Solutions 2022, Pivato et al., 2024]. UNEP schlussfolgert, dass chemische Verwertungsverfahren zukünftig mit Bedacht skaliert werden sollten und weitere Arbeiten erforderlich sind, um das tatsächliche Potenzial (Kosten, Ertrag, Treibhausgasemissionen und gesundheitliche Auswirkungen) zu bewerten [UNEP 2023]. Auch das Center for Climate Integrity [Allen et al., 2024] kritisiert in einem Bericht die Versprechungen, die unter anderem mit der Bezeichnung „Advanced Recycling“ getätigt werden und konstatiert: Die Öl- und Kunststoffindustrie propagiert diese Verfahren als bahnbrechende Lösung für Plastikmüll. Doch interne Dokumente und Expert*innen zeigen, dass diese Methoden seit Jahrzehnten bekannt, technisch limitiert und wirtschaftlich kaum praktikabel sind. Man wisse intern, dass Rohstoffqualität und Menge oft unzureichend sind und gemischte Kunststoffabfälle schlecht genutzt werden können, auch würden häufig Kraftstoffe produziert, nicht neues Plastik [Allen et al. 2024].

8 Szenarien zur Reduktion der Stoffströme

8.1 STATUS VON PLASTIKPRODUKTION UND PLASTIKABFALL

Die Produktion von Plastik ist in den vergangenen Jahrzehnten deutlich gewachsen. So betrug die weltweite Produktion im Jahr 2000 noch 234 Mio. t und stieg bis 2019 auf 460 Mio. t an [OECD, 2022a]. Plastikmüll wuchs im selben Zeitraum von 156 Mio. t auf 353 Mio. t.

Hauptproduzent ist China mit 32 %; die EU produziert 14 % des weltweit hergestellten Plastiks mit leichtem Exportüberschuss [PlasticEurope 2024]. Für Deutschland betrug die Produktion 2021 21,1 Mio. t, wovon 17,7 Mio. t aus fossilen Rohstoffen und 1,65 Mio. t aus Recyclaten hergestellt wurden. Der Anteil von Bioplastik war sehr gering (ca. 1 %) [Umweltbundesamt 2025a, Conversio 2022]. Verarbeitet wurden 2021 14 Mio. t, wovon ca. 58 % auf die Polymere Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid (PVC) entfielen. Die wichtigsten Anwendungsbereiche für Kunststoffe sind Verpackung (31,2 %) der Baubereich (26,3 %), Automobile (8,8 %) und Elektro/Elektronik (6,4 %). Betrachtet man die Verwendung von Recyclaten, dominieren ebenfalls die Verpackungen (28 %) und der Baubereich (40 %), aber auch die Landwirtschaft (12 %) [Umweltbundesamt 2025a]. Dies deutet darauf hin, dass Recyclate oft in minderwertigen Anwendungsbereichen eingesetzt werden („Downcycling“).

Das Abfallaufkommen in Deutschland ist deutlich geringer als die Produktion: Betrug es 1994 noch 2,8 Mio. t, ist die Abfallmenge 2021 auf 5,67 Mio. t angestiegen, weit überwiegend Endverbraucherabfälle (Post Consumer Waste) (5,44 Mio. t), die auch für die starke Zunahme verantwortlich sind [Umweltbundesamt

2025a, Conversio 2022]. Die Gebrauchsdauer von Plastik und Plastikprodukten unterscheidet sich beträchtlich. Während Verpackungen meist nach weniger als einem Jahr im Abfall landen sind z. B. im Baubereich Lebensdauern bis 50 Jahre nicht selten [Plastics Europe 2022]. Je Person und Jahr fielen 2016 in Deutschland 38 kg Plastikabfall an [Heinrich Böll Stiftung 2019]. Der Plastikverbrauch pro Person und Jahr in der EU betrug im Jahr 2020 hingegen 187 kg [Pottinger et al., 2024]. Der Recyclinganteil in der EU beträgt 35 %, wobei seit 2019 gemäß einer Durchführungsentscheidung der EU-Kommission nicht mehr die Menge der angelieferten Plastikabfälle als Berechnungspunkt gilt, sondern die deutlich geringere Menge der zerkleinerten und gewaschenen Kunststoffteile, die in die Anlage eingeführt wird. Dort gehen weitere Anteile verloren, so dass die Menge des gewonnenen Recyclats noch geringer ist.

Kunststoffe, die nicht recycelt werden, werden in Deutschland verbrannt oder in Zementwerken als Ersatzbrennstoff genutzt („energetische Verwertung“). In der EU spielt die Verbrennung eine geringere Rolle: 25 % werden deponiert. Außerhalb der EU werden Kunststoffabfälle meist nicht verbrannt, sondern deponiert, soweit sie überhaupt regulär eingesammelt und entsorgt werden und nicht ungeregelt offen verbrannt, vergraben („mismanagement“) oder weggeworfen und in die Umweltmedien (Flüsse, Meere etc.) eingetragen werden („leakage“). Einige Berichte gehen davon aus, dass insbesondere in Ländern mit wenig entwickeltem Abfallmanagement der Anteil des ungeregelt entsorgten und in die Umwelt eingetragenen Abfalls bis zu 32 % beträgt [World Economic Forum et al. 2016)].

In den Ländern des globalen Südens existiert zwar meist kein entwickeltes Abfallmanagement wie in den Industrieländern. Allerdings sind sowohl der pro-Kopf-Plastikverbrauch als auch das Abfallaufkommen deutlich geringer als in den Industrieländern.

8.2 DAS „WEITER SO“ SZENARIO (BUSINESS AS USUAL)

Die OECD veröffentlichte 2022 einen Global Plastics Outlook [OECD 2022a]. Darin werden Szenarien vorgestellt, wie sich weltweit die Produktion, das Abfallaufkommen und das Vorkommen von Plastik in der Umwelt bis 2060 entwickeln werden, ausgehend vom Basisjahr 2019. Das „Baseline Szenario“ beschreibt die Entwicklung, wenn sich an den bisherigen politischen Randbedingungen nichts Wesentliches ändert. Demnach

- steigert sich die Produktion bis 2060 von 460 Mio. t auf 1.260 Mio. t (2,7 fach), wovon nur 143 Mio. t Sekundärplastik sind.
- werden von 1.014 Mio. t Plastikabfall, was einer Verdreifachung entspricht, 507 Mio. t deponiert und 179 Mio. t verbrannt. 153 Mio. t werden nicht ordnungsgemäß behandelt („mismanaged“) – prozentual zwar eine leichte Verbesserung gegenüber 2019 aber absolut eine erhebliche Zunahme. 38 Mio. t hiervon landen in der terrestrischen oder aquatischen Umwelt.
- steigert sich auf diese Weise der Bestand an Plastik in der aquatischen Umwelt auf 493 Mio. t – hiervon 145 Mio. t in den Ozean – wo es allmählich in Mikroplastik zerfällt.
- tragen die Plastikproduktion und -verwendung 2019 3,4 % (entsprechend 1,8 Mrd. t CO₂eq) zu den Treibhausgasemissionen bei. Für 2060 werden 4,3 Mrd. t CO₂eq im Baseline Szenario kalkuliert.

In einer Aktualisierung von 2024 prognostiziert die OECD etwas geringere Steigerungsraten

bis 2040 [OECD 2024b]. Zusätzlich spezifiziert die OECD in einem Working Paper die aktuelle Entwicklung von Kunststoffabfällen [OECD 2024a]. Demnach hat der Export von Plastikabfällen in Nicht-OECD-Länder nach einer Änderung der Basler Konvention deutlich abgenommen (2022: 6,3 Mio. t gegenüber 2017: 12,4 Mio. t), wobei ein Großteil der Müllexporte weiterhin in südostasiatische Länder gelangt.

Andere Projektionen in die Zukunft nennen etwas andere Zahlen. So erwarten im Baseline Szenario Pottinger et al. für 2050 einen Plastikverbrauch von 749 Mio. t (davon 86 % Primärplastik) und 121 Mio. t nicht ordnungsgemäß behandelten Abfall [Pottinger et al. 2024]. Lau et al. rechnen für das Jahr 2040 mit einer Steigerung der Einträge in die Ozeane auf 29 Mio. t [Lau et al. 2020, The Pew charitable Trusts 2020].

8.3 ALTERNATIVE SZENARIEN FÜR WENIGER PRODUKTION, ABFALL UND UMWELTEINTRÄGE

Die OECD entwickelt zwei Szenarien zur Minderung der Plastikbelastung. Dabei kommen in unterschiedlicher Stringenz drei Maßnahmenpakete zum Einsatz [OECD 2022a und 2022b]:

- a. Verminderung von Plastikproduktion und -gebrauch durch eine Steuer auf den Gebrauch von Plastik sowie Erhöhung der Lebensdauer von Plastikprodukten (kreislauffähiges Design, Haltbarkeit, Reparierbarkeit)
- b. Erhöhung der Recyclingrate durch Aufbau von Kapazitäten, Förderung von Sekundärprodukten und erweiterte Herstellerverantwortung
- c. Schließung von Einträgen unsachgemäß behandelten Plastikabfalls durch Investition in Abfallsammlung und -behandlung, Sortierung an der Quelle.

Das „Regional Action Scenario“ erhebt eine Steuer auf den Gebrauch von Plastik von 750 US\$ je Tonne (für Einwegplastik 1.000 US\$). Der Gebrauch von Sekundärplastik wird gefördert, so dass sich die Recyclingrate auf 40 % (global) erhöht. Der unsachgemäße Eintrag in die Umwelt wird durch besseres Abfallmanagement reduziert. Die Wirksamkeit der Maßnahmen bleibt allerdings begrenzt: Statt einer Verdreifachung von Produktion und Abfallaufkommen ist eine Verdopplung zu erwarten.

Beim „Global Ambition Scenario“ ist die Steuer doppelt so hoch, die Recyclingrate soll 60 % erreichen, was zu einem Marktanteil von Sekundärplastik von 40 % führt. Verbrauch von Primärplastik und Abfallaufkommen wären um 33 % niedriger. Dies bedeutet immer noch eine Steigerung der Plastikproduktion von 460 Mio. t (2019) auf 827 Mio. t (2060); die Autoren sind aber zuversichtlich, dass sich diese Mengen bewältigen lassen. Der Ansatz setzt auf weiterentwickelte Recycling- und Reinigungstechnologien, lässt sich durch regionale Aktionen nicht mehr umsetzen und erfordert einen globalen Ansatz mit internationaler Kooperation [OECD 2022 a und 2022 b].

The Pew charitable trusts entwirft ein „System Change Scenario“, um die Plastikwelle zu brechen und die Einträge in das Meer um 78 % gegenüber dem Baseline Szenario zu reduzieren. Der Plastikverbrauch soll sich dadurch um 30 % vermindern. Dabei sollen acht Maßnahmen greifen [The Pew Charitable Trusts 2020, Lau et al. 2020]:

- a. Reduktion von Plastikproduktion und -gebrauch, die insbesondere auf die Vermeidung von Plastik im Verpackungssektor abzielt
- b. Substitution von Plastik durch Papier und kompostierbare Materialien

- c. Änderung des Produktdesigns, um den Anteil des recycelbaren Plastiks auf bis zu 54 % zu erhöhen
- d. Steigerung des Anteils gesammelten Abfalls in Ländern mit geringem Einkommen auf 90 % (in Städten) und 50 % (auf dem Land)
- e. Verdopplung der Kapazitäten für mechanisches Recycling auf 86 Mio. t im Jahr 2040
- f. Entwicklung des chemischen Plastik zu Plastik-Recycling auf eine Kapazität von 13 Mio. t im Jahr 2040
- g. Errichtung von sicheren Deponien und Verbrennungsanlagen für die 23 % des nicht recycelbaren Plastiks
- h. Reduktion des Exports von Plastikabfall um 90 % bis 2040.

Diese Maßnahmen sollen durch einen Mix an staatlichen Vorgaben, Kontrollen und Anreizen, erweiterte Herstellerverantwortung und marktwirtschaftliche Instrumente (z. B. Steuern, Abgaben und Zertifikatehandel beim Recycling) umgesetzt werden.

Ein besonderes Problem stellen allerdings die Einträge von Mikroplastik, insbesondere Reifenabrieb und Textilfasern, in die Meere dar. Im Business as Usual -Szenario werden 3 Mio. t Mikroplastik-Einträge im Jahr 2040 erwartet.

Weitere Maßnahmen zur Vermeidung des Anstiegs von Plastikproduktion und -gebrauch

In der Studie „The New Plastics Economy“ zeigt die Ellen McArthur Foundation auf, insbesondere bei Plastikverpackungen die Zirkularität deutlich zu erhöhen (Ellen McArthur 2016). Die Schaffung eines Marktes für Sekundärplastik wird vorgeschlagen durch Ausbau des Recyclings, wiederverwendbare Verpackungen und Anreize, zirkuläre Produkte vorzuziehen. Dazu bedarf es auf dem Verpackungssektor

einer weitgehenden Standardisierung mit einheitlichem Labelling, Beschränkung auf wenige Kunststofftypen ohne gefährliche Inhaltsstoffe, d.h. mehr Transparenz über die Zusammensetzung und Spezifikation der verwendeten Kunststoffe – und das idealerweise in globalem Maßstab. Mit Pilotanlagen in großem Maßstab sollen Innovationen entwickelt und erprobt werden, zur Vereinheitlichung des Designs und der Sortier- und Recyclingsysteme. Eine weitere Herausforderung ist die Entwicklung von Mehrschichtfolien, die sich leicht wieder trennen lassen.

In ihrer aktuellen Studie von 2024 hebt die OECD hervor, dass es eines ambitionierten globalen Maßnahmenpakets bedarf, um die Stoffströme von Plastik wirksam zu reduzieren [OECD 2024 b]. Regionale Maßnahmen in den Industrieländern reichen ebenso wenig aus wie eine Beschränkung auf das Abfallmanagement. Eine entschlossene Politik zur Begrenzung von Plastikproduktion und -verbrauch, hohe Recyclingquoten, Ausbau eines effektiven Systems zur Abfallsammlung und -Sortierung sowie international harmonisierte Ökodesign-Standards für Plastikverwendungen sind notwendig. Die makroökonomischen Kosten sind verkraftbar, bedürfen aber einer internationalen Kooperation bei der Finanzierung wegen der prozentual höheren Belastung der Länder des globalen Südens. Die Studie spricht auch weitere Aspekte an wie die Risiken von Mikroplastik, die Vermeidung besorgniserregender Chemikalien und die Notwendigkeit zur Sanierung von Umweltschäden.

In Europa hat die EU einige Maßnahmen ergriffen, um dem Plastikproblem zu begegnen. Recyclingmaßnahmen wurden entwickelt und gefördert, Kreislaufführung angestrebt, einige überflüssige Plastikprodukte vom Markt genommen und das Bewusstsein über das Plastikproblem in der Bevölkerung gestärkt

[Europäische Kommission 2018, EEA 2020]. Im Vergleich zu anderen Weltregionen wurden Fortschritte erreicht. Insgesamt sind aber einige Maßnahmen wie das Verbot einzelner Plastikverwendungen in der Single Use Richtlinie sehr kleinteilig und wenig geeignet, eine Trendwende herbeizuführen.

Pottinger et al. berechneten die Wirksamkeit globaler Maßnahmen auf Verbrauch, Abfallmenge, Treibhausgasemissionen und ungeregelten Abfall [Pottinger et al. 2024]. Er betrachtete folgende Handlungsansätze:

- a. Gebrauchtes Plastik enthält mindestens 40 % Sekundärplastik
- b. Die Plastikproduktion wird auf dem Niveau von 2020 eingefroren (Cap)
- c. 50 Mrd. US\$ werden in Sammlung und Behandlung des Plastikabfalls investiert (vor allem in Ländern des Südens)
- d. 100 Mrd. US\$ werden in Recyclingkapazitäten und -technologien investiert
- e. Die Recyclingrate gesammelten Abfalls beträgt mindestens 40 % (bezogen auf die Menge gesammelten Plastikabfalls)
- f. Es wird eine Steuer auf Verpackungsplastik erhoben
- g. Anwendungen von Verpackungsplastik werden beschränkt oder verboten
- h. Wiederverwendung von Verpackungsplastik (z. B. Pfandflaschen)

Eine Kombination der Maßnahmen a, b, c und f würde eine sehr wirksame Reduktion erzielen. Statt 121 Mio. t ungeregeltem Plastikabfall fielen 2050 nur 11 Mio. t an. Die Treibhausgasemissionen gingen von 3,35 Gt CO₂eq auf 2,09 Gt CO₂eq zurück.

8.4 WIRKSAME REDUKTION DES PLASTIKVERBRAUCHS

Eine wirksame Reduktion des Plastikverbrauchs, der Menge an Plastikabfall und des ungeregelt in die Umwelt eingetragenen Abfalls lässt sich nur durch globale Maßnahmen erreichen. Kleinteilige Maßnahmen wie Verbote und Beschränkung einzelner Plastikverwendungen sind wenig wirksam. Am sinnvollsten erscheint eine Kombination von sektorbezogenen Obergrenzen der Plastikproduktion [Erdle & Erikson, 2023]: Verpflichtung auf ein Mindestmaß an Recyclingplastik, eine Steuer auf die Verwendung von (Verpackungs-)Plastik und Investitionen in ein wirksames Abfallmanagement vor allem in den Ländern des globalen Südens. Ein Markt für Sekundärplastik kann die Erreichung hoher Recyclingquoten unterstützen. Hierzu ist allerdings noch vieles ungeklärt, z. B.: Wie verteilt sich die Begrenzung der Produktion auf Länder und Firmen? Wie kann die Verwendung von Sekundärplastik ohne Downcycling erhöht werden, wenn die Vielfalt von Plastik und der Inhaltsstoffe zumindest bei den Massenanwendungen nicht reguliert wird? Wer erhebt die Steuer und wie verteilt sich das Steuereinkommen auch zugunsten der Länder des globalen Südens, die erst noch in den Aufbau eines wirksamen Abfallmanagements investieren müssen?

9 Forderungen

Der BUND fordert ein radikales Umdenken beim Thema Plastik. Dafür braucht es ein nachhaltiges Stoffstrommanagement von Kunststoffen (siehe Abschnitt 9.1), eine konsequente Politik (siehe Abschnitt 9.2), ein globales Plastikabkommen (siehe Abschnitt 9.3) sowie Förderung von Forschung und Bildung (Abschnitt 9.4).

9.1 FÜR EIN NACHHALTIGES STOFFSTROMMANAGEMENT VON KUNSTSTOFFEN

Kunststoffe sollten nur dann eingesetzt werden, wenn dies insgesamt konkrete Vorteile für die Umwelt und die Gesellschaft bringt. Die aktuell große Zahl an Anwendungen mit wenig oder keinem gesellschaftlichen Nutzen sollte möglichst vollständig vermieden werden. Es sollte daher immer die Frage nach der Notwendigkeit der Anwendung bzw. des Produktes gestellt werden (Suffizienz²) [IKHAPP 2024, INEBB 2018]. Weiterhin sollten grundsätzlich natürliche (nicht chemische) Alternativen, wie Holz statt Kunststoff oder Naturfasern statt Kunstfasern in Textilien, ohne bedenkliche chemische Zusätze bevorzugt werden, ohne durch deren Anbau die Nahrungsmittelsicherheit zu gefährden [Helm et al., 2025].

Essenzielle Kunststoffprodukte sind so zu konstruieren, dass sie wiederverwendet werden können. Ist dies nicht der Fall, ist ein werkstoffliches Recycling von Kunststoffen klar vor anderen Verfahren zu bevorzugen. Für das werkstoffliche Recycling kommen Rückgabe- und Rücknahmeverpflichtungen ggf. mit Bepfandung sowie Dienstleistungs- und Servicemodelle als Ersatz für (Einweg-)Kunststoffanwendungen in Frage.

Es sollten (durch die Umweltverwaltung der EU, EEA, ECHA, EFSA) nach wissenschaftlichen Kriterien die grundlegenden Rahmenbedingungen für eine begrenzte Anzahl von Standardkunststoffen mit wenigen umweltverträglichen Additiven für essenzielle Anwendungen mit großen Mengenströmen definiert werden. Ziel ist es, dass diese Standardkunststoffe nach der Nutzung gut sortiert und erneut werkstofflich genutzt werden können. Bei diesen Standardkunststoffen sollte eine regelmäßige Überprüfung stattfinden, damit diese durch Innovationen weiterentwickelt und unter Umweltsichtspunkten optimiert werden können.

Umweltoffene Anwendungen von Kunststoffen, wie Mulchfolien oder Kunststoffe als „Bodenverbesserer“ sollten minimiert werden bzw. so weiterentwickelt werden, dass Einträge in die Umwelt vermieden werden.

Ein besonderes Augenmerk muss auf die Umweltschäden durch Mikro- und Nanoplastik gelegt werden. Primäres Mikroplastik muss daher verboten werden. Für sekundäres Mikroplastik wie den Abrieb von Kunststoffen, der bei der Zersetzung bzw. Nutzung entsprechender Plastikprodukte (insbesondere Reifenabrieb) entsteht, müssen dringend Wege zur Minimierung dieser Einträge in die Umwelt gefunden werden.

Ein weiteres Problem stellen flüssige Kunststoffe dar, die direkt in die Umwelt eingebracht werden. Die Anwendung von flüssigen bzw. wasserlöslichen Kunststoffen, insbesondere von Hydrogelen sollte minimiert werden.

Die Belastungen der Innenraumluft durch Kunststoffe bzw. deren Inhaltsstoffe (z. B. synthetische Textilien, Möbel, Bodenbeläge) sollte

2 https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/suffizienz_2034.htm

minimiert werden. Insbesondere bei Kunststoffen in Kontakt mit Lebensmitteln oder mit Kindern sind hohe Maßstäbe an die Schadstofffreiheit und eine umfassende Kenntnis über deren Zusammensetzung erforderlich.

Kunststoffe sollten im Hinblick auf ihre Wirkung auf verschiedene Biosysteme getestet werden. Es sollten dabei neben aquatischen Systemen auch Boden, Luft und Wirkungen auf den Menschen bzw. Tiere geprüft werden (Leaching und Ausgasung). Durch solche Wirkungstests können auch Wirkungen von Inhaltsstoffen, die noch gar nicht bekannt sind, erfasst werden.

Problematische Inhaltsstoffe und Stoffgruppen sollten verboten werden. Solche Verbote müssen über die REACH-Prozesse auch zeitnah umgesetzt werden. Ausnahmen sollte es nur für notwendige Anwendungen mit einem hohen gesellschaftlichen Nutzen geben (Essential Uses) [Scientists Coalition, 2024]. Solche Ausnahmen sollten befristet sein und regelmäßig überprüft werden, damit weiter nach nachhaltigen unbedenklichen Alternativen für solche Anwendungen gesucht wird.

9.2 FORDERUNGEN AN DIE POLITIK

In der internationalen und nationalen Gesetzgebung sollten Regelungen geschaffen werden, die den Einsatz von Kunststoffen in kurzlebigen potenziell umweltoffenen Anwendungen beschränken. Entsprechende gesetzliche Regelungen (beispielsweise in einem Ressourcenschutzgesetz oder einem Kunststoffgesetz) auf nationaler und europäischer Ebene sollten beinhalten:

- Kurzlebige Kunststoffe brauchen eine Zulassung. Für alle Kunststoffe, deren Einsatzzeitraum bei den Kunden*innen weniger als ein Jahr beträgt, muss bei der unabhängigen Zulassungsbehörde der Nutzen der Anwendung

dargelegt, Alternativen geprüft und, wenn sich die Anwendung als sinnvoll erweist, ein Konzept für ein werkstoffliches Recycling und die Abwesenheit von problematischen Stoffen (siehe unten) vorgelegt werden. Falls der Hersteller die oben genannten Anforderungen nicht erfüllen kann (oder will), dann muss er eine Kunststoffabgabe mit Lenkungswirkung zahlen. Die Abgabe ist abhängig von dem Grad der Nichterfüllung der oben genannten Vorgaben.

- Das werkstoffliche Recyclingkonzept für diese kurzlebigen Kunststoffe liegt in der Verantwortung des Herstellers (erweiterte Herstellerverantwortung). Er muss sicherstellen, dass der Kunststoff nach der Nutzungsphase weiter genutzt, oder dem werkstofflichen Recycling zugeführt und dann auch entsprechend verwertet wird. Für seine eigene Produktion muss er den Einsatz von Recyclingkunststoff in der höchstmöglichen Menge nach dem Stand von Wissenschaft und Technik anstreben [Betz et al., 2022].
- Kompostierung, thermische Verwertung, Pyrolyse und ähnliche Verfahren sind sowohl energetisch als auch in Bezug auf die Ressourcenschonung deutlich schlechter als werkstoffliche Verfahren. Diese Verfahren sollten daher nur dann zum Einsatz kommen, wenn bestehende Vermeidungsmaßnahmen nicht ausgeschöpft sind und die werkstoffliche Aufbereitung erwiesenermaßen nicht möglich ist. In fortschrittliche Sortierverfahren, die es ermöglichen sortenreine Fraktionen von Kunststoffen zu erzielen, muss investiert werden. Die Finanzierung kann über eine Kunststoffabgabe (s. Punkt 1) erfolgen. Kunststoffe sollen keine problematischen Stoffe enthalten. Alle „Substances of Very High Concern“ (SVHC) in Kunststoffprodukten für Konsumenten werden verboten. Die Liste der verbotenen Stoffe in Kunststoffen ist zu erweitern um Stoffe, die zu Umwelt und

Gesundheitsproblemen führen können und schnell ersetzt werden sollten. Grundlage dafür kann die SIN-Liste³ sein [Chemsec]. Ganze Stoffgruppen werden verboten, wenn die Substitution von einem Schadstoff mit einem ähnlichen Schadstoff droht.

- Bei Massenkunststoffen ist die Zahl der verwendeten Additive deutlich zu beschränken, um ein hochwertiges werkstoffliches Recycling zu ermöglichen, z. B. durch Erstellung einer transparenten Positivliste.
- Nicht verwertbare Restfraktionen sind umweltverträglich zu entsorgen. Die in den Kunststoffen enthaltenen Stoffe sollten – wo möglich – im Kreislauf geführt werden. Eine Schadstoffverschleppung muss weitgehend vermieden werden.
- Die Ziele des Pariser Klimaschutz Abkommens müssen eingehalten werden. Spätestens ab dem Datum der Erreichung des danach vorgegebenen Restbudgets an Treibhausgasemissionen sind Kunststoffe nur noch dann zulässig, wenn sie ausschließlich aus nicht-fossilen Rohstoffquellen hergestellt werden (Defossilisierung).
- Für alle (Massen)-Kunststoffprodukte soll eine Beurteilung der Umweltwirkungen nach unabhängigen wissenschaftsbasierten Kriterien (Ökobilanz) erfolgen. Da fast alle Kunststoffe persistent sind, sollte eine Gefahrenbeurteilung erfolgen (und keine Risikobewertungen; siehe BUND-Position 69).
- Die Herstellung, der Einsatz und das Inverkehrbringen von primärem Mikroplastik wird verboten. Es werden Verfahren entwickelt und Anforderungen formuliert, um den Anfall von sekundärem Mikroplastik zu minimieren.
- Die Umsetzung einer verbesserten Sammlung und Sortierung von Kunststoffen ist nötig, Potenziale zur Verbesserung der Sortierung sind auszubauen, um hochwertige Rezyklate zu erzeugen.
- Erst nach Ausschöpfung der Potentiale im Produkt-Design, der Wiederverwendung und im Ausbau der Sammel-, Sortier- und Aufbereitungsinfrastruktur für das hochwertige mechanische Recycling können thermochemische Verfahren in bestimmten Sektoren und bei bestimmten Produkten sinnvoll sein.
- Für kurzlebige Produkte wie Verpackungen, ist das chemische Recycling zu ressourcen- und energieintensiv und sollte nicht genutzt werden.
- Die Anwendung von flüssigen bzw. wasserlöslichen Kunststoffen, die nicht bei der ordnungsgemäßen Anwendung aushärten (Polymerdispersionen in Lacken und Farben) wird minimiert, insbesondere bei umweltoffenen Anwendungen (Hydrogele).
- Alle oben genannten Kriterien gelten auch für „Bio“-Kunststoffe, deren Lösungspotenzial teils überschätzt wird. Für „Bio“-Kunststoffe sind zudem die spezifischen Forderungen aus dem BUND-Hintergrundpapier „Bio“-Kunststoffe zu berücksichtigen.⁴
- Angesichts enormer und wachsender Mengen an Polymeren, denen Mensch und Umwelt ausgesetzt sind, müssen Polymere denselben gesetzlichen Anforderungen genügen, wie andere chemische Stoffe auch. Im Zuge der REACH-Revision muss deshalb eine Registrierungspflicht für alle Polymere (bei einer Produktion oder Import über einer Tonne) eingeführt werden, insbesondere im Hinblick auf ihr Schadstoffpotential (inkl. Mikro-/Nanoplastik).
- Die Additive in Kunststoffen müssen deklariert werden. Ein hochwertiges werkstoffliche

3 Die SIN-Liste ist eine Liste gefährlicher Chemikalien, die in einer Vielzahl von Artikeln, Produkten und Herstellungsverfahren auf der ganzen Welt verwendet werden. Die Abkürzung SIN - Substitute It Now - bedeutet, dass diese Chemikalien so schnell wie möglich beseitigt werden sollten, da sie eine Gefahr für die menschliche Gesundheit und die Umwelt darstellen. Die SIN-Liste wird von der gemeinnützigen Organisation ChemSec in enger Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern und technischen Experten sowie einem beratenden Ausschuss aus führenden Umwelt-, Gesundheits- und Verbraucherorganisationen erstellt.

4 <https://www.bund.net/service/publikationen/detail/publication/bio-kunststoffe/>

Recycling lässt sich nur erreichen, wenn bei Massenkunststoffen die Vielfalt der Additive deutlich beschränkt würde. Eine verpflichtende transparente Positivliste der erlaubten Additive würde vor unvorhergesehenen Gefährdungen und Qualitätseinbußen in Recycelat-Kunststoffen schützen.

- Bei der Bewertung von Chemikalien, die als Additive Verwendung finden, ist zu prüfen, ob sie in der Umwelt bestimmungsgemäß mit anderen Stoffen Folgeprodukte bilden. Diese Transformationsprodukte sind zu identifizieren, zu untersuchen und zu bewerten.
- Im Rahmen des EU-Prozesses zur PFAS-Beschränkung muss ein strenger Maßstab angelegt werden, was die Gewährung von Ausnahmen auch für polymere PFAS betrifft. In verbrauchernahen Anwendungen sollten polymere PFAS grundsätzlich verboten sein.
- Eine zentrale Einrichtung auf europäischer Ebene (z. B. ECHA) ist mit den folgenden Aufgaben zu betrauen:
 - Monitoring für den Umgang mit Kunststoffen
 - Kataster der Inhaltstoffe von Kunststoffen
 - Führung einer Liste von in Kunststoffen verbotenen Stoffen
 - Festlegung von Recyclingwegen und -quoten für Kunststoffe nach ökologischen Kriterien

Daten für Kunststoffe entlang des Lebenswegs sollen offengelegt und zugänglich gemacht werden. Dies betrifft den gesamten Produktionsweg und insbesondere auch alle Additive und Inhaltstoffe. Diese Daten sollen in einem Kunststoffkataster als Datenbank zugänglich gemacht werden.

9.3 FÜR EIN GLOBALES PLASTIKABKOMMEN

Jedes Jahr werden weltweit über 460 Millionen Tonnen Kunststoff produziert. Wächst die Plastikproduktion weiter wie bisher, so wird sich diese Menge bis 2060 fast verdreifachen. Das gefährdet die ökologische, soziale und wirtschaftliche Nachhaltigkeit. Studien zeigen, dass Recycling und ein effektives Abfallmanagement allein nicht ausreichen, um die Krise zu bewältigen. Wissenschaftliche Berechnungen zeigen, dass eine drastische Reduzierung der Plastikproduktion die wirksamste Lösung ist.

Damit ein globales Plastikabkommen wirksam ist, muss es klare Ziele und verbindliche Maßnahmen enthalten. Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen fordern folgende zentrale Punkte [IKHAPP 2024]:

- Ein ganzheitliches Ziel: Das Abkommen muss den gesamten Lebenszyklus von Kunststoffen abdecken. Sein Ziel muss sein, die Umwelt und die menschliche Gesundheit zu schützen und Plastikverschmutzung bis 2040 zu beenden.
- Reduktion der Plastikproduktion: Es braucht ehrgeizige, rechtsverbindliche Ziele zur Senkung der Plastikherstellung. Anreize sollen geschaffen werden, um nicht nur Plastik selbst, sondern auch die darin enthaltenen Chemikalien und Ersatzstoffe zu reduzieren.
- Verbot gefährlicher Chemikalien: Viele Plastikadditive sind schädlich. Ihre Regulierung muss auf globaler Ebene erfolgen. Aktuell werden nur sehr wenige dieser Chemikalien durch internationale Umweltabkommen kontrolliert.
- Maßnahmen gegen Mikro- und Nanoplastik: Diese winzigen Plastikpartikel sind besonders problematisch. Sie machen etwa ein Viertel der gesamten Plastikverschmutzung in der Umwelt aus und können nicht wieder aus der Umwelt entfernt werden. Daher muss

ihre Entstehung über den gesamten Kunststoff-Lebenszyklus hinweg minimiert werden.

- **Verbot nicht essenzieller Plastikprodukte:** Plastikprodukte und -chemikalien, die nicht zwingend notwendig sind, sollten schrittweise verboten werden. Ausnahmen sollten nur für unverzichtbare Kunststoffe gelten, die für Gesundheit, Sicherheit und das Funktionieren der Gesellschaft notwendig sind – und für die es derzeit keine nachhaltigen Alternativen gibt.
- **Sicherheits- und Nachhaltigkeitsstandards:** Es braucht klare, international einheitliche wissenschaftsbasierte Kriterien für Kunststoffe, Ersatzstoffe und neue Technologien. Vor der Markteinführung müssen umfassende Tests durchgeführt werden.
- **Priorisierung von Vermeidung und Wiederverwendung:** Die Abfallhierarchie muss eingehalten werden. Das bedeutet: Plastikmüll soll zuerst vermieden, dann wiederverwendet und erst zuletzt entsorgt werden. Abfallmanagementsysteme müssen sicherer und umweltfreundlicher gestaltet werden. Dafür sollten verbindliche Mindestrecyclingquoten eingeführt werden.
- **Transparenz und Kontrolle:** Unternehmen müssen offenlegen, welche Plastikchemikalien, Materialien und Produkte sie verwenden. Die gesamte Lieferkette muss überwacht werden. Dafür braucht es klare Regeln mit messbaren Indikatoren.
- **Finanzielle Unterstützung und Zusammenarbeit:** Entwicklungsländer und besonders betroffene Gemeinschaften müssen unterstützt werden. Dazu braucht es einen speziellen Finanzierungsmechanismus, technische Zusammenarbeit und Handelsabkommen, die den Übergang zu weniger Plastik ermöglichen. Für die Umsetzung des Plastikabkommens und der dazu erforderlichen Prozesse braucht es eine angemessene Finanzierung, z. B. eine Steuer auf Plastikproduktion und /

oder -gebrauch. Die Finanzierung sollte entsprechend dem Verursacherprinzip (polluter pays principle) realisiert werden.

- **Unabhängige wissenschaftliche Beratung:** Eine neutrale Expertengruppe soll den Fortschritt überwachen und Empfehlungen aussprechen. Dabei müssen klare Mechanismen geschaffen werden, um Interessenkonflikte auszuschließen. (In Abstimmung mit den Aufgaben anderer Gremien und Institutionen.)

Ein wirksames Plastikabkommen braucht ambitionierte Maßnahmen und Durchsetzungsmechanismen. Nur wenn Plastikproduktion und gefährliche Chemikalien drastisch reduziert werden, kann die globale Plastikkrise eingedämmt werden. Die Wissenschaft hat die Fakten geliefert – jetzt sind Politik und Wirtschaft gefordert.

STAND DER VERHANDLUNGEN FÜR EIN INTERNATIONALES PLASTIKABKOMMEN

Die fünfte Verhandlungsrunde des UN-Intergovernmental Negotiating Committee (INC-5.1) für ein internationales Plastikabkommen fand im November/Dezember 2024 in Busan, Südkorea, statt, endete jedoch ohne eine endgültige Einigung. Zentrale Konfliktpunkte waren die Fragen, ob das Abkommen verbindliche Obergrenzen für die weltweite Plastikproduktion, Regelungen zur chemischen Zusammensetzung enthalten soll und welche Finanzierungsmechanismen für beschlossene Maßnahmen eingerichtet werden sollen. Mehr als 100 Staaten, darunter die EU, Mexiko, Panama und Ruanda, befürworteten solche Begrenzungen. Im Gegen-

satz dazu lehnten erdölproduzierende Länder wie Saudi-Arabien, Russland, Iran und Indien diese ab und plädieren stattdessen für eine Beschränkung auf eine effiziente Abfallwirtschaft.

Eine weitere Verhandlungsrunde (INC-5.2) im August 2025 ist ebenfalls ohne Ergebnis gescheitert. Ziel war es, ein global verbindliches Abkommen zu erreichen, das den gesamten Lebenszyklus von Kunststoffen berücksichtigt, schädliche Chemikalien reguliert und eine nachhaltige Finanzierung sicherstellt [UNEP 2024]. Ein dringend notwendiges Plastikabkommen ist damit verjagt oder sogar insgesamt gefährdet.

Umweltschutzorganisationen kritisierten, dass es zu keiner Einigung kam und warfen einigen Staaten vor, die Verhandlungen in der Absicht zu führen, dass kein wirksames Abkommen zustande kommt. Zivilgesellschaftliche Organisationen begrüßen die beabsichtigte Fortsetzung der Verhandlungen, um nicht unter Zeitdruck schwache Vereinbarungen zu treffen.

9.4 FORDERUNGEN IM HINBLICK AUF DIE FORSCHUNGS- UND BILDUNGSPOLITIK

Viele wissenschaftliche Erkenntnisse zur Be- und Überlastung der Erde mit Kunststoffen sind Ergebnisse der Forschung der vergangenen Jahrzehnte. Zahlreiche Fragen sind noch offen, viele Zusammenhänge nicht bekannt. Zur weiteren Entwicklung einer nachhaltigen Stoffpolitik für Kunststoffe besteht weiterhin deutlicher Forschungsbedarf, der insbesondere im Rahmen staatlicher Forschungsprogram-

me berücksichtigt werden sollte. Außerdem ist es notwendig, nachhaltige Chemie und Stoffstrommanagement in Studiengängen sowie in der Aus- und Fortbildung zu verankern.

Forderungen zur Forschung:

- **Stärkung der Unabhängigkeit der Forschung.** Die wissenschaftliche Forschung zu stofflichen Risiken von Kunststoffen darf nicht abhängig von der Finanzierung durch die Industrie sein. Interessenkonflikte sind zu vermeiden. Mittel aus der Plastikabgabe der Hersteller sollen auch zur Finanzierung entsprechender unabhängiger Forschung eingesetzt werden.
- Ein Forschungsschwerpunkt, wie sich der Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt vermeiden oder verringern lässt und wie die Transformation der chemischen Produktion in Richtung auf eine nachhaltige Stoffpolitik gelingen kann, ist einzurichten.
- Ein Forschungsschwerpunkt zu den stofflichen Belastungen von vorhandenen und neuen Kunststoffen mit Schadstoffen durch Additive und Zusatzstoffe ist zu entwickeln. Ziel soll die Minimierung der Additive und – wo notwendig – die Entwicklung von umweltfreundlichen Alternativen sowie die Ausschleusung der Problemstoffe bei der Verwertung von Kunststoffen sein.
- Ein Forschungsschwerpunkt zur Vereinheitlichung der Kunststoffe in Massenanwendungen, zu entsprechenden werkstofflichen Recyclingverfahren und angepassten Logistikstrukturen für die Rücknahmen der entsprechenden Abfälle ist einzurichten.

Forderungen zur Bildung:

- Die Fächer „Nachhaltige Chemie“ und „umweltgerechte Produktentwicklung“ müssen zumindest in den Studiengängen Chemie, Verfahrenstechnik, Ingenieurwesen (Textil, Maschinenbau, Papier...) verankert und entsprechende Lehrmaterialien entwickelt

werden.

- Die Themen Lebenszyklusanalyse, Stoffstrommanagement und Kreislaufwirtschaft sind in das Curriculum aller Ingenieurstudiengänge und naturwissenschaftlichen Fächer aufzunehmen.
- Aus- und Weiterbildungsangebote für einen verantwortlichen, nachhaltigen Umgang mit Kunststoffen, Stoffen und Produkten sind auszubauen.
- Bildungsangebote für Schulen und Weiterbildungseinrichtungen zum nachhaltigen Umgang mit Kunststoffen sollten entwickelt und ausgebaut werden.
- Fachlich fundierte Informationen zur Nachhaltigkeitsbewertung von Kunststoffen, die von unabhängigen Expert*innen erarbeitet und geprüft werden, sollten bereitgestellt werden.
- Der Zugang zu Informationen zur Nachhaltigkeit von Kunststoffen für Verbraucher und Verbände sollte verbessert werden. Die Hersteller müssen dazu die entsprechenden Informationen in nachprüfbarer Weise bereitstellen.
- Schulbuchverlage sollten bei Neuauflagen dem Bereich nachhaltiger Umgang mit Kunststoffen mehr Raum geben.

10 Glossar

Biokunststoffe

Kunststoffe aus biologischen, nicht fossilen Grundstoffen (Pflanzen, Mikroorganismen). Wird manchmal auch für biologisch abbaubare Kunststoffe verwendet

Chemisches Recycling

Ein Verfahren zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus Kunststoffabfällen durch chemische Umwandlung (z. B. Depolymerisation, Pyrolyse). Es entstehen Öle, die fossilen Rohstoffen für die Herstellung von Kunststoffen ähneln, häufig aber Verunreinigungen enthalten, die für die Produktion problematisch sein können.

Duroplast

Kunststoffe, die nach der Aushärtung nicht mehr verformbar sind. Aufgrund ihrer chemischen Struktur sind sie schwer recycelbar und verbleiben oft langfristig in der Umwelt.

ECHA (Europäische Chemikalienagentur)

Europäische Behörde zur Umsetzung der Chemikalienverordnung REACH. Bewertet Risiken von Chemikalien, einschließlich der in Kunststoffen enthaltenen Stoffe.

EEA (Europäische Umweltagentur)

Europäische Behörde zur Bewertung des Zustands der Umwelt

EFSA (Europäische Lebensmittelbehörde)

Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit. Bewertet Pflanzenschutzmittel, Lebensmittel- und Futtermittelzusatzstoffe und Lebensmittelkontaktmaterialien.

Elastomer

Weiche, elastische Kunststoffe mit hoher Dehnbarkeit, die nach Verformung in ihre Ausgangsform zurückkehren. Aufgrund ihrer Vernetzung sind sie schwer zu recyceln.

Endokrine Substanzen

Chemikalien, die hormonelle Systeme von Menschen und Tieren stören können. In Kunststoffen als Additive enthalten, z. B. Weichmacher oder Flammschutzmittel.

Exposition

Konzentration eines Stoffes in einem Umweltmedium (Wasser, Boden, Luft – Umweltexposition) oder Konzentration/Dosis der Aufnahme eines Stoffes z. B. durch Atemluft oder Nahrung – Humanexposition

In vitro Toxizität

Toxizität gegenüber Zellkulturen

In vivo Toxizität

Toxizität gegenüber lebenden Organismen

Lebensmittelkontaktmaterialien

Stoffe in Verpackungsmaterialien für Lebensmittel

Mechanisches Recycling

Physikalisches Verfahren zur Wiederverwertung von Kunststoffen durch Zerkleinern, Waschen, Sortieren und Wiederaufbereitung ohne Veränderung der chemischen Struktur.

Mikroorganismen

Mikroskopisch kleine Organismen die aus einer oder wenigen Zellen bestehen (z. B. Bakterien, Pilze, Algen).

Mikroplastik

Plastikpartikel kleiner als 5 mm, die durch Abrieb, Zerfall oder gezielte Produktion entstehen. Sie verbreiten sich in der Umwelt und gelangen in Nahrungsketten.

Monomer

Einzelmolekül, das durch chemische Reaktionen zu Polymeren verknüpft wird.

Mulchfolien

Dünne Kunststofffolien in der Landwirtschaft zur Bodenabdeckung. Problematisch wegen Verbleib von Kunststoffresten im Boden und unzureichender Entsorgung.

Nanoplastik

Sehr kleine Plastikpartikel mit weniger als 100 nm. Entsteht durch weitere Zersetzung von Mikroplastik.

NIAS

NIAS = non intentional added substances oder unbeabsichtigt eingebrachte Stoffe. Bei der Herstellung und Verwendung von Plastikgegenständen können Reaktions- und Abbauprodukte entstehen. Diese sind unbeabsichtigt im jeweiligen Artikel enthalten.

PA (Polyamid)

Thermoplastischer Kunststoff mit hoher Festigkeit, z. B. in Textilien. Kann Mikroplastik emittieren, insbesondere beim Waschen von Kleidung.

PAM (Polyacrylamid)

Polymer mit vielfältigen Anwendungen, z. B. in Kläranlagen. Abbauprodukte wie Acrylamid gelten als toxisch und potenziell krebserregend.

Pathogene

Krankheitserregende Mikroorganismen, die sich an Mikroplastikpartikeln anlagern können, was deren Verbreitung und Übertragbarkeit erhöht.

PBAT (Polybutylenadipat-terephthalat)

Biologisch langsam abbaubarer Kunststoff auf fossiler Basis. Wird z. B. in kompostierbaren Plastiktüten verwendet, zersetzt sich aber nur unter industriellen Bedingungen.

PE (Polyethylen)

Einer der weltweit am häufigsten verwendeten Kunststoffe. Aufgrund seiner chemischen Stabilität in der Umwelt sehr persistent.

Persistenz

Eigenschaft von Stoffen, in der Umwelt langfristig stabil zu bleiben. Persistente Kunststoffe zerfallen nicht vollständig, sondern bilden Mikro- und Nanoplastik.

PFAS (Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen)

Fluorhaltige synthetische Chemikalien mit meist wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften. Sehr langlebig in der Umwelt und toxisch für Mensch und Umwelt.

PLA (Polymilchsäure)

Biobasierter und potenziell biologisch abbaubarer Kunststoff. Die tatsächliche Abbaubarkeit ist jedoch stark von den Umweltbedingungen abhängig und nur unter industriellen Bedingungen über längere Zeiten möglich. Kompostwerke in Deutschland nehmen PLA-Kunststoffe nicht an.

Polymer

Makromolekül, das aus der Wiederholung vieler Monomereinheiten besteht. Alle Kunststoffe sind Polymere.

PP (Polypropylen)

Leichter Thermoplast mit breiter Anwendung (z. B. Verpackungen, Textilien). Schwer biologisch abbaubar und häufig in Mikroplastikform nachweisbar.

PS (Polystyrol)

Spröder Thermoplast, oft als Schaumstoff (Styropor) oder für Verpackungen genutzt. Zerfällt leicht in kleine Partikel und trägt erheblich zur Mikroplastikbelastung bei.

PVC (Polyvinylchlorid)

Weich oder hart einsetzbarer Kunststoff mit hoher chemischer Beständigkeit. Enthält häufig problematische Additive wie Weichmacher oder Stabilisatoren.

Pyrolyse

Thermisches Verfahren zur chemischen Zersetzung von Kunststoffen bei hohen Temperaturen unter Ausschluss von Sauerstoff. Es entsteht Pyrolyseöl, Pyrolysegas und Pyrolysekohle in unterschiedlichen Zusammensetzungen.

Solvolyse

Chemisches Recyclingverfahren, bei dem Lösungsmittel zur Depolymerisation von Kunststoffen verwendet werden. Ermöglicht selektive Rückgewinnung von Monomeren.

Thermoplast

Kunststoff, der bei Erhitzung schmilzt und verformbar wird. Thermoplaste lassen sich im Gegensatz zu Duroplasten gut mechanisch recyceln.

11 Literatur

(Alle nachfolgend angegebenen Internetquellen wurden zuletzt am 04.07.2025 abgerufen.)

Abbasi, S., Turner, A. 2021. Human exposure to microplastics. A study in Iran. *Journal of Hazardous Materials* 403: 123799. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123799>.

Akdemir, T., Terzi, Y., Gundoğdu, S., Ozturk, R.C., Gedik, K. 2025. Microplastic contamination in highaltitude glacier lakes in Northern Anatolia. *Environmental Sciences Europe* 37: 92. <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01139-0>.

Allen, D., Spoelman, N., Linsley, C., Johl, A. 2024. The Fraud of Plastic Recycling. How Big Oil and the plastics industry deceived the public for decades and caused the plastic waste crisis. CCI (Center for Climate Integrity) (Ed.). <https://climateintegrity.org/uploads/media/Fraud-of-Plastic-Recycling-2024.pdf>.

Altnau, G., Hamann, J., Dias Fonseca, J.M. 2021: Material Recycling in a Circular Economy for Plastics – A Critical Assessment. CreaSolv® Process. Position Paper. https://www.creasolv.de/images/2021.04.15_CreaSolv_Positionspapier_EN.pdf.

Amato-Lourenço, L.F., Carvalho-Oliveira, R., Ribeiro jr., G., Dos Santos Galvão, L., Ando, R.A., Mauad, T. 2021. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. *Journal of Hazardous Materials* 416: 126124. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>.

Amato-Lourenço, L.F., Dantas, K.C., Ribeiro jr., G., Ribeiro Paes, V., Ando, R.A., de Oliveira Freitas, R., Menezes M da Costa, O.M., Rabelo, R.S., Soares Bispo, K.C., Carvalho-Oliveira, R., Mauad, T. 2024. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. *JAMA Network Open* 7(9): e2440018. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>.

Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute e.V. (AGÖF). 2007. Vorläufige AGÖF-Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen im Hausstaub (Stand Herbst 2007 mit einer Änderung zu Phthal säure/-anhydrid in Tabelle 3 im Frühjahr 2022). <https://www.agoef.de/orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte-2007.html>.

Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute e.V. (AGÖF). 2013. AGÖF-Orientierungswerte für flüchtige organische Verbindungen in der Raumluft. Aktualisierte Fassung vom 28.11.2013. <https://www.agoef.de/orientierungswerte/agoef-voc-orientierungswerte.html>.

Aurisano, N., Weber, R., Fantke, P. 2021. Enabling a circular economy for chemicals in plastics. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 31: 100513. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100513>.

AZUR. 2025. Reifen im Kreislauf halten. Nachhaltige Neureifen möglichst lange nutzen und durch Recycling im Wertstoffkreislauf halten. *Forum Nachhaltig Wirtschaften* 01/2025. <https://azur-netzwerk.de/wp-content/uploads/fnw-2025-1-reifen.pdf>.

Barhoumi, B., Sander, S.G., Tolosa, I. 2022. A review on per- and polyfluorinated alkyl substances (PFASs) in microplastic and food-contact materials. *Environmental Research* 206: 112595. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112595>.

Beard, A. 2002. Flammschutzmittel in der Diskussion. *Mitteilungen der GDCh-Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie* 8(1): 6-8.

Becker, K., Göen, T., Seiwert, M., Conrad, A., Pick-Fuss, H., Müller, J., Wittascek, M., Schulz, C., Kolossa-Gehring, M. 2009. GerES IV: phthalate metabolites and bisphenol A in urine of German children. *International Journal of Hygiene and Environmental* 212(6): 685-92. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19729343/>.

Behnisch, P., Petrlik, J., Budin, C., Besselink, H., Felzel, E., Strakova, J., Bell, L., Kuepou, G., Gharbi, S., Bejarano, F., Jensen, G.K., DiGangi, J., Ismawati, Y., Speranskaya, O., Da, M., Pulkrabova, J., Gramblicka, T., Brabcova, K., Brouwer, A. 2023. Global survey of dioxin- and thyroid hormone-like activities in consumer products and toys. *Environment International* 178: 108079. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108079>.

Bejgarn, S., MacLeod, M., Bogdal, C., Breitholtz, M. 2015. Toxicity of Leachate from Weathering Plastics: An Exploratory Screening Study with *Nitocra spinipes*. *Chemosphere* 132: 114-119. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.010>.

Bendix, P., Berg, H., Sebestyén, J., Ritthoff, M., Perschel, L., Eckert, D., Kocina, R., Achenbach, H. 2021. Förderung einer hochwertigen Verwertung von Kunststoffen aus Abbruchabfällen sowie der Stärkung des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten im Sinne der europäischen Kunststoffstrategie. *Texte 151/2021. Umweltbundesamt* (Hrsg.), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-11-23_texte_151-2021_rebaupro_0.pdf.

Beronius, A., Rudén, C., Håkansson, H., Hanberg, A. 2010. Risk to all or none?: A comparative analysis of controversies in the health risk assessment of Bisphenol A. *Reproductive Toxicology* 29(2): 132-146. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2009.11.007>.

Bertling, J., Bertling, R., Hamann, L. 2018. Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Oberhausen. <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/publikationen/2018/kunststoffe-id-umwelt-konsortialstudie-mikroplastik.pdf>.

Betz, J., Hermann, A., Bulach, W. 2022. Rezyklateinsatzquoten für Kunststoffe. Einfache Möglichkeit zur Stärkung der Rezyklatnachfrage?! Vorstellung von Projektergebnissen zum UBA-Projekt „Prüfung konkreter Maßnahmen zur Steigerung der Nachfrage nach Kunststoffrezyklaten und rezyklathaltigen Kunststoffprodukten“, FKZ 3719 34 306 0. Vortrag vom 14.09.2022. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Tasima_Rezyklateinsatzquoten_Betz.pdf.

BMUV. 2022. Berichtspflicht gemäß Art. 16 Absatz 4 der Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE-Richtlinie) – Berichtsjahr 2022. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/elektronikgeraete_daten_2022_bf.pdf.

BMUV. 2023. Plastikmüll bekämpfen – Deutschland tritt internationaler Initiative gegen „Geisternetze“ bei. <https://www.bundesumweltministerium.de/meldung/plastikmuell-bekaempfen-deutschland-tritt-internationaler-initiative-gegen-geisternetze-bei>.

Boctor, J., Hoyle, F.C., Farag, M.A., Ebaid, M., Walsh, T., Whiteley, A.S., Murphy, D.V. 2025. Microplastics and nanoplastics: fate, transport, and governance from agricultural soil to food webs and humans. *Environmental Sciences Europe* 37: 68. <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01104-x>.

Bonnet, M. 2013. *Kunststofftechnik - Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele*. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden.

Borgmann, A., Friege, H., Zeschmar-Lahl, B. 2019. Gefährliche Stoffe in der „Circular Economy“: II. Cadmium in PVC-Fensterprofilen. *Müll und Abfall* 2019(1): 38-41. <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2019.01.07>.

Boucher, J., Friot, D. 2017. Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources. IUCN (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources) (Ed.), Gland, Schweiz. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2017-002-En.pdf>.

- Brunn, H., Arnold, G., Körner, W., Steinhäuser, K. G., Valentin, I. 2023. PFAS: forever chemicals – persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. *Environmental Sciences Europe* 35: 20. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>.
- Bryant, J.A., Clemente, T.M., Viviani, D.A., Fong, A.A., Thomas, K.A., Kemp, P., Karl, D.M., White, A.E., deLong, E.F. 2016. Diversity and Activity of Communities Inhabiting Plastic Debris in the North Pacific Gyre. *MSystems* 1(3): e00024-16. <https://doi.org/10.1128/msystems.00024-16>.
- Buchholz, F. L., Graham, A.T. (Eds.). 1997. *Modern Superabsorbent Polymer Technology*. John Wiley & Sons. 1. Auflage Dezember 1997.
- BUND. 2019a. Mikroplastik aus Textilien. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/meere/meere_mikroplastik_aus_textilien_faltblatt.pdf.
- BUND. 2019b. Umweltbelastung durch Mikroplastik aus Kunstrasenplätzen. BUND-Hintergrund. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/meere/meere_mikroplastik_kunstrasen_hintergrund.pdf.
- BUND. 2019c. Umweltbelastung durch Mikroplastik und andere Kunststoffe in Kosmetika. BUND-Hintergrund. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/meere/meere_mikroplastik_in_kosmetika.pdf.
- BUND. 2019d. Reifenabrieb als größte Eintragsquelle von Mikroplastik in die Meere. BUND-Hintergrund. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/meere/meere_mikroplastik_reifenabrieb_hintergrund.pdf.
- BUND. 2023. Blackbox Chemieindustrie. Die Energieintensivste Industrie Deutschlands. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/blackbox-chemieindustrie-die-energieintensivste-industrie-deutschlands-studie-bund.pdf.
- BUND. 2024. Partyartikel voller verbotener Schadstoffe: BUND-Test findet Schadstoffe in Produkten von Shein, Temu und AliExpress. <https://www.bund.net/themen/aktuelles/detail-aktuelles/news/partyartikel-voller-verbotener-schadstoffe-bund-test-findet-schadstoffe-in-produkten-von-shein-temu-und-aliexpress/>.
- BUND. 2025. Kleine Plastik-Pellets – riesiges Problem. <https://www.bund.net/meere/mikroplastik/plastik-pellets/>.
- Butterworth, A., Clegg, I., Bass, C. 2012. *Marine Debris: A Global Picture of the Impact on Animal Welfare and of Animal-Focused Solutions*. WSPA International, 222 Grays Inn Road, London, WC1X 8HB. https://www.researchgate.net/profile/Isabella-Clegg-2/publication/263444260_Marine_debris_a_global_picture_of_the_impact_on_animal_welfare_and_of_animal-focused_solutions/links/56f3acee08ae7c1fda2859fb/Marine-debris-a-global-picture-of-the-impact-on-animal-welfare-and-of-animal-focused-solutions.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxyY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxyY2F0aW9uIn19 oder http://www.wspa-international.org/Images/Untangled%20Report_tcm25-32499.pdf.
- Capolupo, M., Sørensen, L., Ranil Jayasena, K.D., Booth, A.M., Fabbri, E. 2020. Chemical Composition and Ecotoxicity of Plastic and Car Tire Rubber Leachates to Aquatic Organisms. *Water Research* 169: 115270. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115270>.
- Ceresana. 2024a. Marktstudie: Flammschutzmittel. Weltreport, 8. Auflage. <https://ceresana.com/produkt/marktstudie-flammschutzmittel>.
- Ceresana. 2024b. Marktstudie Füllstoffe – Welt. Weltreport, 7. Auflage. <https://ceresana.com/produkt/marktstudie-fuellstoffe-welt>.
- Ceresana. 2025. Marktstudie Kunststoff-Additive. Weltreport, 4. Auflage. <https://ceresana.com/produkt/marktstudie-kunststoff-additive>.
- ChemAnalyst. 2022. Impact Modifier Market: Plant Capacity, Production, Operating Efficiency, Demand & Supply, End-User-Industries, Distribution Channel, Regional Demand, 2015-2030. Decode the Future of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS). Last Update July 2022. <https://www.chemanalyst.com/industry-report/impact-modifier-market-341>.
- ChemAnalyst. 2023. Aluminium Hydroxide Market Analysis: Industry Market Size, Plant Capacity, Production, Operating Efficiency, Demand & Supply, End-Use, Sales Channel, Regional Demand, Foreign Trade, Company Share, Manufacturing Process, and Policy and Regulatory Landscape, 2015-2032. Decode the Future of Aluminium Hydroxide. Last Update August 2023. <https://www.chemanalyst.com/industry-report/aluminium-hydroxide-market-102>.
- Chemsec. 2025. SIN List. Search, explore and substitute it now. Don't let hazardous chemicals ruin your product. <https://sinlist.chemsec.org/>.
- Chen, C., Chen, A., Zahn, F., Wania, F., Zhang, S., Li, L., Liu, J. 2022. Global Historical Production, Use, In-Use-Stocks, and Emissions of Short-, Medium-, and Long-Chain Chlorinated Paraffins. *Environmental Science & Technology* 56: 7895-7904. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00264>.
- Chen, S., Gong, Y., Luo, Y., Cao, R., Yang, J., Cheng, L., Gao, Y., Zhang, H., Chen, J., Gen, N. 2023. Toxic effects and toxicological mechanisms of chlorinated paraffins: A review for insight into species sensitivity and toxicity difference. *Environment International* 178: 108020. doi.org/10.1016/j.envint.2023.108020.
- CIEL (Center for International and Environmental Law) (Ed.). 2022. *Sowing a Plastic Planet: How Microplastics in Agrochemicals Are Affecting Our Soils, Our Food, and Our Future*. Wahington, USA. <https://www.ciel.org/reports/microplastics-in-agrochemicals>.
- Composites United (CU). 2023. Der europäische Markt für faserverstärkte Kunststoffe / Composites 2022. <https://composites-united.com/der-europaeische-markt-fuer-faserverstaerkte-kunststoffe-composites-2022/#:~:text=Neben%20den%20bisher%20behandelten%20Materialgruppen,lag%20bei%209%2C6%20%25>.
- Conversio. 2022. Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Kurzfassung der Conversio Studie. https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf.
- Conversio. 2024. Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 - Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Kurzfassung der Conversio Studie. <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/kurzfassung-stoffstrombild-2023.pdf>.
- Covaci, A., Harrad, S., Abdallah, M.A.E., Ali, N., Law, R.J., Herzke, D., de Wit, C.A. 2011. Novel brominated flame retardants: A review of their analysis, environmental fate and behaviour. *Environment International* 37: 532-556. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.11.007>.
- DIN. 2018. DIN EN 17033-2018: Kunststoffe – Biologisch abbaubare thermoplastische Mulchfolien für den Einsatz in Landwirtschaft und Gartenbau – Anforderungen und Prüfverfahren. <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-17033/275787663>.
- Donkers, J.M., Höppener, E.M., Grigoriev, I., Will, L., Melgert, B.N., van der Zaan, B., van de Steeg, E., Kooter, I.M. 2022. Advanced Epithelial Lung and Gut Barrier Models Demonstrate Passage of Microplastic Particles. *Microplastics and Nanoplastics* 2(1): 6. <https://doi.org/10.1186/s43591-021-00024-w>.
- ECHA (European Chemicals Agency). 2023. Regulatory strategy for flame retardants. <https://doi.org/10.2823/854233>.

ECHA (European Chemicals Agency). 2025a. Liste der Beschränkungen. <https://echa.europa.eu/de/substances-restricted-under-reach>.

ECHA (European Chemicals Agency). 2025b. Liste der für eine Zulassung in Frage kommenden besonders besorgniserregenden Stoffe. <https://echa.europa.eu/de/candidate-list-table>.

ECHA (European Chemicals Agency). 2025c. Verzeichnis der zulassungspflichtigen Stoffe. <https://echa.europa.eu/de/authorisation-list>.

EEA (European Environment Agency). 2020. Plastics, the circular economy and Europe's environment – A priority for Action. EEA Report 18/2020. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/plastics-the-circular-economy-and>.

EFSA (European Food Safety Agency). 2021. Administrative guidance for the preparation of applications on substances to be used in plastic food contact materials (amended 2024). <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2021.EN-6514>.

Ehret, G. 2023. Mikroplastik im Pferdesport – Hundert Tonnen Mikroplastik im Jahr: Reitplätze haben Plastikproblem. Wochenblatt 11.08.2023. <https://www.wochenblatt-dlv.de/feld-stall/tierhaltung/hundert-tonnen-mikroplastik-jahr-reitplaetze-haben-plastikproblem-573986>.

Ekvall, T., Granström, L., Jansson, R., Moberg, E., Rydberg, T. 2025. Comparing High-Quality Recycling and Downcycling of Plastics. Calculating Carbon Footprints Using a Basket of Functions Approach. IVL (Svenska Miljöinstitutet) Report No. B2498. <https://www.svenskplastatervinning.se/wp-content/uploads/Comparing-high-quality-recycling-and-downcycling-of-plastics.pdf>.

Elfers, K., Benz, P., Burmester, M., Hein, S., Hansen, K., Sieg, H., Böhmert, L., Paul, M.B., Mazzuoli-Weber, G. 2025. Effect of Nano-and Micro-Polystyrene Particles on Small Intestinal Epithelial Functions and Enteric Neuronal Activity in vitro. *Microplastics and Nanoplastics*. 5(1): 3. <https://doi.org/10.1186/s43591-025-00110-3>.

Erdle, L.M., Eriksen, M. 2023. Monitor compartments, mitigate sectors: A framework to deconstruct the complexity of plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin* 193: 115198. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115198>.

EU. 2004. Verordnung (EG) Nr. 1935/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Oktober 2004 über Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen und zur Aufhebung der Richtlinien 80/590/EWG und 89/109/EWG. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:338:0004:0017:de:PDF>.

EU. 2009. Verordnung (EG) Nr. 450/2009 der Kommission vom 29. Mai 2009 über aktive und intelligente Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:135:0003:0011:DE:PDF>.

EU. 2011a. Verordnung (EU) Nr. 494/2011 der Kommission vom 20. Mai 2011 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) hinsichtlich Anhang XVII (Cadmium). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R0494>.

EU. 2011b. Verordnung (EU) Nr. 10/2011 der Kommission vom 14. Januar 2011 über Materialien und Gegenstände aus Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R0010>.

EU. 2023. Verordnung (EU) 2023/923 der Kommission vom 3. Mai 2023 zur Änderung des Anhangs XVII der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf Blei und seine Verbindungen in PVC. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0923>.

EU. 2025. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission. (Konsolidierte Fassung vom April 2025). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:02006R1907-20250422>.

Europäische Kommission. 2018. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Eine europäische Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft. COM(2018) 28 final. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_3&format=PDF.

Europäische Kommission. 2020. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit. Für eine schadstofffreie Umwelt. COM(2020) 667 final. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:f815479a-0f01-11eb-bc07-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF und https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:f815479a-0f01-11eb-bc07-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_2&format=PDF.

Europäische Kommission. 2023. Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über die Vermeidung der Freisetzung von Kunststoffgranulat zur Verringerung der Umweltverschmutzung durch Mikroplastik. COM(2023) 645. [https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=COM\(2023\)645&lang=de](https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=COM(2023)645&lang=de).

Europäische Kommission. 2024a. Verordnung (EU) 2024/3190 der Kommission vom 19. Dezember 2024 über die Verwendung von Bisphenol A (BPA) und anderen Bisphenolen und Bisphenolderivaten, die aufgrund spezifischer gefährlicher Eigenschaften eine harmonisierte Einstufung erhalten haben, in bestimmten Materialien und Gegenständen, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen, zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 10/2011 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) 2018/213. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L:202403190>.

Europäische Kommission. 2024b. The future of European competitiveness: Part B | In-depth analysis and recommendations. https://commission.europa.eu/document/download/ec1409c1-d4b4-4882-8bdd-3519f86bbb92_en?filename=The%20future%20of%20European%20competitiveness_%20In-depth%20analysis%20and%20recommendations_0.pdf.

Europäisches Parlament. 2023. Circular economy: definition, importance and benefits. The circular economy: find out what it means, how it benefits you, the environment and our economy. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>.

Eurostat. 2021. EU's circular material use rate increased in 2020. <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/products-eurostat-news/-/ddn-20211125-1>.

Friege H., Zeschmar-Lahl, B., Borgmann, A. 2018. Managing Cd Containing Waste—Caught by the Past, the Circular Economy Needs New Answers. *Recycling* 3(2): 18. <https://doi.org/10.3390/recycling3020018>.

Gardon, T., Reisser, C., Soyez, C., Quillien, V., Le Moullac, G. 2018. Microplastics Affect Energy Balance and Gametogenesis in the Pearl Oyster *Pinctada margaritifera*. *Environmental Science & Technology* 52(9): 5277-5286. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00168>.

Gasper, J., Wright, S.L., Dris, R., Collard, F., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., Kelly, F.J., Tassin, B. 2018. Microplastics in Air: Are We Breathing It In?. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 1: 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.002>.

- Gebbink, W.A., van Leeuwen, S.P.J. 2020. Environmental contamination and human exposure to PFASs near a fluorochemical production plant: Review of historic and current PFOA and GenX contamination in the Netherlands. *Environment International* 137: 105583. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105583>.
- Guecke, B., Groh, K.J., Maffini, M.V., Martin, O.V., Boucher J.M., Chian, Y.-T., Gwosdz, F., Jieh, Ph., Kassotis, Ch.D., Łańska, P., Peterson Myers, J., Odermatt, A., Parkinson, L.V., Schreier, V.N., Srebny, V., Zimmermann, L., Scheringer, M., Muncke, J. 2023. Systematic evidence on migrating and extractable food contact chemicals: Most chemicals detected in food contact materials are not listed for use. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 63(28): 9425-9435. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2067828>.
- Guecke, B., Parkinson, L.V., Groh, K.J., Kassotis, C.D., Maffini, M.V., Martin, O.V., Zimmermann, L., Scheringer, M., Muncke, J. 2024. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 35: 330-341. <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>.
- Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3: e1700782. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5517107/pdf/1700782.pdf>.
- Grandjean, P., Clapp, R. 2015. Perfluorinated alkyl substances: Emerging insights into health risks. *New Solutions* 25(2): 147-163. <https://doi.org/10.1177/1048291115590506>.
- Gray jr., L., Earl, Ostby, J., Furr, J., Price, M., Veeramachaneni, D.N.R., Parks, L. 2000. Perinatal Exposure to the Phthalates DEHP, BBP, and DINP, but Not DEP, DMP, or DOTP, Alters Sexual Differentiation of the Male Rat. *Toxicological Sciences* 58(2): 350-365. <https://doi.org/10.1093/toxsci/58.2.350>.
- Groh, K.J., Guecke, B., Martin, O., Maffini, M., Muncke, J. 2021. Overview of intentionally used food contact chemicals and their hazards. *Environment International* 150: 106225. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106225>.
- Guida, Y., Matsukami, H., de Carvalho, G.O., Weber, R., Vetter, W., Kajiwara, N. 2023. Homologue Composition of Technical Chlorinated Paraffins Used in Several Countries over the Last 50 Years – SCPPs Are Still Out There. *Environmental Science & Technology* 57(35): 13136-13147. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c02243>.
- GUTEX. 2025. Gutex Pyroresist Wall. <https://www.gutex.de/produkte-systeme/daemmstoffe/gutex-pyroresist-wall~p388>.
- Haram, L.E., Carlton, J.T., Centurioni, L., Crowley, M., Hafner, J., Maximenko, M., Murray, C.C., Shcherbina, A.Y., Hormann, V., Wright, C., M. Ruiz, G.M. 2021. Emergence of a Neopelagic Community through the Establishment of Coastal Species on the High Seas. *Nature Communications* 12(1): 6885. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27188-6>.
- Hartmann, N.B., Hüffer, T., Thompson, R.C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A.E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M.P., Hess, M.C., Ivleva, N.P., Lusher, A.L., Wagner, M. 2019. Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. *Environmental Science & Technology* 53(3): 1039-1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>.
- Hayes, D.G., Anunciado, M. B., DeBruyn, J. M., Bandopadhyay, S., Schaeffer, S., English, M., Ghimire, S., Miles, C., Flury, M., Sintim, H. Y. (2019). Biodegradable plastic mulch films for sustainable specialty crop production. In: T. J. Gutiérrez (Ed.), *Polymers for agrifood applications*. Springer International Publishing, Cham: 183–213. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19416-1_11.
- Heinrich-Böll-Stiftung, BUND (Hrsg.). 2019. Plastikatlas – Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff. https://www.boell.de/sites/default/files/2022-01/Boell-Plastikatlas%202019%20Auflage_V01_kommentierbar.pdf.
- Helm, L. T., Venier-Cambron, C., Verburg, P. H. 2025. The potential land-use impacts of bio-based plastics and plastic alternatives. *Nature Sustainability* 8(2): 190-201. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01492-7>.
- Hong, Y., Feng, C., Yan, Z., Wang, Y., Liu, D., Liao, W., Bai, Y. 2020. Nonylphenol Occurrence, Distribution, Toxicity and Analytical Methods in Freshwater. *Environmental Chemistry Letters* 18: 2095-2106. <http://dx.doi.org/10.1007/s10311-020-01060-3>.
- Huang, X., Saha, S.C., Saha, G., Francis, I., Luo, Z. 2024. Transport and Deposition of Microplastics and Nanoplastics in the Human Respiratory Tract. *Environmental Advances* 16: 100525. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100525>.
- IKHAPP (International Knowledge Hub Against Plastic Pollution). 2024. The Global Plastics Treaty – What science shows are essential elements for its success. Oslo. <https://ikhapp.org/material/the-global-plastics-treaty-what-science-shows-are-essential-elements-for-its-success/>.
- Initiative ERDE. 2022. Initiative ERDE startet 2022 mit der Sammlung von Mulchfolie. Pressemitteilung von April 2022. https://www.erde-recycling.de/fileadmin/user_upload/ERDE_recycling.de/Dateien/Presse_News/20220427_PM_Mulchfolie/2022-02-23-erdepmulchfolie2022_de_01.pdf.
- Integration nachhaltiger Entwicklung in die Berufsbildung (INEBB). 2018. Infoblatt Modul M3. Effizienz, Suffizienz und Rebound-Effekt. https://inebb.org/wp-content/uploads/2018/12/M3-06_Effizienz-Suffizienz-Rebound-Effekt.pdf.
- Jacobsen, J.K, Massey, L., Gulland, F. 2010. Fatal Ingestion of Floating Net Debris by Two Sperm Whales (*Physeter macrocephalus*). *Marine Pollution Bulletin* 60(5): 765-767. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.03.008>.
- Jani, P.U., Florence, A.T., McCarthy, D.E. 1992. Further Histological Evidence of the Gastrointestinal Absorption of Polystyrene Nanospheres in the Rat. *International Journal of Pharmaceutics* 84(3): 245-252. [https://doi.org/10.1016/0378-5173\(92\)90162-U](https://doi.org/10.1016/0378-5173(92)90162-U).
- Jepsen, D., Zimmermann, T., Spengler, L., Rödig, L., Bliklen, R., Wagner, J., Struck, K., Hiestermann, L., Schulz, H. 2020. Kunststoffe in der Umwelt - Erarbeitung einer Systematik für erste Schätzungen zum Verbleib von Abfällen und anderen Produkten aus Kunststoffen in verschiedenen Umweltmedien. *Texte 198/2020. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_11_24_texte_198_2020_kunststoffe_in_der_umwelt.pdf.
- Jiang, Y., Wang, C., Ma, L., Gao, T., Wāng, Y. 2025. Correspondence to “Environmental Profiles, Hazard Identification, and Toxicological Hallmarks of Emerging Tire Rubber-Related Contaminants 6PPD and 6PPD-Quinone” [Environ. Int. 187 (2024) 108677]. *Environment International* 195: 109228. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109228>.
- Karali, N., Khanna, N., Shah, N. 2024. Climate Impact of Primary Plastic Production. Lawrence Berkeley National Laboratory, Sustainable Energy and Environmental Systems Department. LBL Publications LBNL-2001585. <https://escholarship.org/uc/item/12s624vf>.
- Körner, W. 2023. Terrestrisches Umweltmonitoring – Messen wir die richtigen Stoffe? *Mitteilungen der GDCh-Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie* 29(3): 68-72. https://www.gdch.de/fileadmin/downloads/Netzwerk_und_Strukturen/Fachgruppen/Umweltchemie_Oekotoxikologie/mblatt/2023/Heft323.pdf.
- Kuczynski, B., Vargas Poulsen, C., Gilman, E.L., Musyl, M., Geyer, R., Wilson, J. 2022. Plastic Gear Loss Estimates from Remote Observation of Industrial Fishing Activity. *Fish and Fisheries* 23(1): 22-33. <https://doi.org/10.1111/faf.12596>.

- Kühne, C., Stapf, D., Holz, P., Baumann, W., Mühlhopt, S., Wexler, M., Hauser, M., Kalkreuth, J., Mahl, J., Zeller, M., Yogish, S., Gehrman, H.-J., Volk, R., Stallkamp, C., Steffl, S., Schultmann, F., Schweppe, R., Pico, D., Seiler, E., Forberger, J., Brantsch, P., Brenken, B., Beckmann, M. 2022. Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter. Texte 92/2022. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau Roßlau.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_92-2022_entwicklung_von_rueckbau-_und_recyclingstandards_fuer_rotorblaetter_0.pdf.
- Lahl, R., Bleischwitz, R., Lahl, U., Zeschmar-Lahl, B. 2025. Third-generation biodegradable plastics – A complementary strategy to tackle the marine litter problem. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 44: 101925.
<https://doi.org/10.1016/j.scp.2025.101925>.
- Lahl, U., Zeschmar-Lahl, B. 2024. More than 30 Years of PVC Recycling in Europe – A Critical Inventory. *Sustainability* 16(9): 3854.
<https://doi.org/10.3390/su16093854>.
- Lane, M.M., Gamage, E., Du, S., Ashtree, D.N., McGuinness, A.J., Gauci, S., Baker, Ph., Lawrence, M., Rebholz, C.M., Srouf, B., Touvier, M., Jacka, F.N., O’Neil, A., Segasby, T., Marx, W. 2024. Ultra-processed food exposure and adverse health outcomes: umbrella review of epidemiological meta-analyses. *BMJ* 2024 384: e077310.
<https://www.bmj.com/content/384/bmj-2023-077310>.
- Lau, W.W.Y., Shiran, Y., Bailey, R.M. Cook, E., Stuchtey, M.R., Koskella, J., Velis, C.A., Godfrey, L., Boucher, J., Murphy, M.B., Thompson, R.C., Jankowska, E., Castillo, A., Pilditch, T.D., Dixon, B., Koerselman, L., Kosio, E., Favoino, E., Gutberlet, J., Baulch, S., Atreya, M.E., Fischer, D., He, K.K., Petit, M.M., Sumaila, U.R., Neil, E., Bernhofen, M.V., Lawrence, K., Palardy, J.E. 2020. Plastic Pollution. Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science* 369: 1455-1461.
<https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.aba9475>.
- Levine, H., Jørgensen, N., Martino-Andrade, A., Mendiola, J., Weksler-Derri, D., Jolles, M., Pinotti, R., Swan, S.H. 2022. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. *Human Reproduction Update* 29(2): 157-176.
<https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>.
- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt). 2013. Medienübergreifende Umweltanalytik persistenter Perfluorotenside und Bestimmung (semi)flüchtiger Vorläuferverbindungen – PVC in der Umwelt.
[https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL\(artdtl.htm,APGxNODENR:200594,AARTxNR:lfu_all_00110,AARTxNODENR:282560,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X](https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL(artdtl.htm,APGxNODENR:200594,AARTxNR:lfu_all_00110,AARTxNODENR:282560,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X).
- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt). 2025. OPTIMON - Umweltmonitoring 2020 - Optimierung des immissionsökologischen Umweltmonitorings am LfU.
https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/projekte_alpenschutz/purealps/publikationen/index.htm.
- Lithner, D., Nordensvan, I., Dave, G. 2012. Comparative Acute Toxicity of Leachates from Plastic Products Made of Polypropylene, Polyethylene, PVC, Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, and Epoxy to *Daphnia magna*. *Environmental Science and Pollution Research* 19: 1763-1772.
<https://doi.org/10.1007/s11356-011-0663-5>.
- MacLeod, M., Arp, H.P.H., Tekman, M.B., Jahnke, A. 2021. The Global Threat from Plastic Pollution. *Science* 373(6550): 61-65.
<https://doi.org/10.1126/science.abg5433>.
- Maes, T., Preston-Whyte, F., Lavelle, S., Gomiero, A., Booth, A.M., Belzunce-Segarra, M.J., Bellas, J., Brooks, S., Bakir, A., Devriese, L.I., Pham, C.K., De Witte, B. 2023. A recipe for plastic: Expert insights on plastic additives in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 196: 115633.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115633>.
- Maga, D., Aryan, V., Blömer, J. 2023. A comparative life cycle assessment of tyre recycling using pyrolysis compared to conventional end-of-life pathways. *Resources, Conservation and Recycling* 199: 107255.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107255>.
- Maier, R.D., Schiller, M. 2016. *Handbuch Kunststoff-Additive*. 4. Auflage. Carl Hanser, München.
- Maisels, A., Hiller, A., Simon, F.-G. 2021. Chemisches Recycling für Kunststoffe: Status und Perspektiven. *Chemie Ingenieur Technik* 93(11): 1742-1750.
<https://doi.org/10.1002/cite.202100115>.
- Materić, D., Ludewig, E., Brunner, D., Röckmann, T., Holzinger, R. 2021. Nanoplastics transport to the remote, high-altitude Alps. *Environmental Pollution* 288: 117697.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117697>.
- Mehmood, T., Hassan, M.A., Faheem, M., Shakoor, A. 2022. Why is inhalation the most discriminative route of microplastics exposure? *Environmental Science and Pollution Research* 29(33): 49479-49482.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-20653-9>.
- Muncke, J., Touvier, M., Trasande, L., Scheringer, M. 2025. Health impacts of exposure to synthetic chemicals in food. *nature medicine* 31: 1431-1443.
<https://doi.org/10.1038/s41591-025-03697-5>.
- Muncke, J., Zimmermann, L. 2023. Chemicals in Plastic Packaging: Challenges for Regulation and the Circular Economy. In: Kramm, J., Völker, C. (Eds.). *Living in the Plastic Age – Perspectives from Humanities, Social Sciences and Environmental Sciences*. Campus-Verlag, Frankfurt/New York: 197-233.
<https://doi.org/10.12907/978-3-593-44902-9>.
- Napper, I.E., Wright, L.S., Barrett, A.C., Parker-Jurd, F.N.F., Thompson, R.C. 2022. Potential microplastic release from the maritime industry: Abrasion of rope. *Science of The Total Environment*, 804: 150155.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150155>.
- Neubauer, U. 2023. Chemisches Recycling ist keine neue Idee. Interview mit Kerstin Kuchta. *Nachrichten aus der Chemie* 71(7-8): 32-33.
<https://www.gdch.de/publikationen/nachrichten-aus-der-chemie.html>.
- Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E., Liu, R., Olewine, M., Kingston, J.D., Castillo, E.F., Gullapalli, R.R., Howard, T., Bleske, B., Scott, J., Gonzalez-Estrella, J., Gross, J.M., Spilde, M., Adolphi, N.L., Gallego, D.F., Jarrell, H.S., Dvorscak, G., Zuluaga-Ruiz, M.E., Andrew B. West, A.B., Matthew J. Campen, M.J. 2025. Bioaccumulation of Microplastics in Decedent Human Brains. *nature medicine* 31: 1114-1119.
<https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>.
- Nor, N.H.M., Kooi, M., Diepens, N.J., Koelmans, A.A. 2021. Lifetime Accumulation of Microplastic in Children and Adults. *Environmental Science & Technology* 55(8): 5084-5096.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07384>.
- Nordischer Ministerrat. 2023. *Towards Ending Plastic Pollution by 2040*. 15 Global Policy Interventions for Systems Change. Nordic Council of Ministers. Kopenhagen, Dänemark.
<https://pub.norden.org/temanord2023-539/temanord2023-539.pdf>.
- Obeng, E.M., Hodge, C., You, J. 2025. Microplastic pollution: a review of specific blood-tissue barrier breaches and health effects. *Environmental Pollution* 376: 126416.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126416>.
- OECD. 2020. PFASs and alternatives in food packaging (paper and paperboard): Report on the commercial availability and current uses. Series on Risk Management, No. 58. OECD Publishing, Paris.
https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2020/09/pfas-and-alternatives-in-food-packaging-paper-and-paperboard-report-on-the-commercial-availability-and-current-uses_e2df38c9/6db0c033-en.pdf.
- OECD. 2022a. *Global Plastics Outlook – Policy Scenarios to 2060*. OECD Publishing, Paris.
<https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.
- OECD. 2022b. *Global Plastics Outlook - Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. OECD Publishing, Paris. OECD Publishing, Paris.
<https://doi.org/10.1787/de747aef-en>.

- OECD. 2023. Climate change and Plastics: Synergies between two crucial environmental challenges. OECD Environment Policy Papers, No. 45, OECD Publishing, Paris.
<https://doi.org/10.1787/5e0bfe87-en>.
- OECD. 2024a. Monitoring trade in Plastics Waste and Scrap 2024, OECD Environment Working Papers, No. 233. OECD Publishing, Paris.
<https://dx.doi.org/10.1787/013bcfdd-en>.
- OECD. 2024b. Policy Scenarios for Eliminating Plastic Pollution by 2040, OECD Publishing, Paris.
<https://doi.org/10.1787/76400890-en>.
- Oehlmann, J., Schulte-Oehlmann, U., Bachmann, J., Oetken, M., Lutz, I., Kloas, W., Ternes, T.A. 2006. Bisphenol A Induces Superfeminization in the Ramshorn Snail *Marisa cornuarietis* (Gastropoda: Prosobranchia) at Environmentally Relevant Concentrations. *Environmental Health Perspectives* 114(Suppl. 1): 127-133.
<https://doi.org/10.1289/ehp.8065>.
- Osterath, B. 2015. Plastik, das den Flammen trotzt. *Nachrichten aus der Chemie* 63(2): 122-125.
<https://www.gdch.de/publikationen/nachrichten-aus-der-chemie.html>.
- PAVATEX. 2022. Geniale Lösungen für den Holzbau: Hocheffiziente Holzständerwände.
https://www.pavatex.de/fileadmin/user_upload/45_Flyer/Daemmstoffe/Flyer_PAVATEX_Brand-_und_Schallschutz_f%C3%BCr_Holzstaenderwaende.pdf.
- Pfaller, J.B., Gil, M.A. 2016. Sea Turtle Symbiosis Facilitates Social Monogamy in Oceanic Crabs Via Refuge Size. *Biology Letters* 12(9): 20160607.
<https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0607>.
- Pfaller, J.B., Goforth, K.M., Gil, M.A., Savoca, M.S., Lohmann, K.J. 2020. Odors from Marine Plastic Debris Elicit Foraging Behavior in Sea Turtles. *Current Biology* 30(5): R213-R214.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.01.071>.
- Pimentel, J.C., Avila, R., Lourenço, A.G. 1975. Respiratory Disease Caused by Synthetic Fibres: A New Occupational Disease. *Thorax* 30(2): 204.
<https://doi.org/10.1136/thx.30.2.204>.
- Pivato, A., Gohar, H., Antille, D.L., Schievano, A., Beggio, G., Reichardt, P., Maria, F.D., Peng, W., Castegnaro, S., Lavagnolo, M.C. 2024. Air Polluting Emissions from Pyrolysis Plants: A Systematic Mapping. *Environments* 11(7): 149.
<https://doi.org/10.3390/environments11070149>.
- PlasticsEurope. 2022. A circular economy for plastics – A European Overview 2022. Brüssel, Belgien.
<https://plasticseurope.org/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-overview-2/>.
- PlasticsEurope. 2024. Plastics – the Facts 2023.
<https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>.
- Pottinger, A.S., Geyer, R., Biyani, N., Martinez, C.C., Nathan, N., Morse, M.R., Liu, Ch., Hu, S., de Bruyn, M., Boettiger, C., Baker, E., McCauley, D.J. 2024. Pathways to reduce global plastic waste mismanagement and greenhouse gas emissions by 2050. *Science* 386(6726): 1168-1173.
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.adr3837>.
- Pro Market Reports. 2025. Long Chain Chlorinated Paraffins (LCCP) Charting Growth Trajectories 2025-2033: Strategic Insights and Forecasts. Base Year 2024.
<https://www.promarketreports.com/reports/long-chain-chlorinated-paraffins-lccp-62246#summary>.
- Quicker, P., Seitz, M. 2024. Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecyclings. *Texte* 154/2024. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/154_2024_texte_thermochemisches_kunststoffrecycling.pdf.
- Rahman, M., Brazel, C. S. 2004. The plasticizer market: an assessment of traditional plasticizers and research trends to meet new challenges. *Progress in Polymer Science* 29(12): 1223-1248.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2004.10.001>.
- Ruert, C., Charlton, N., Bagley, A., Dunlop, S.A., Symeonides, C., Thomas, K.V. 2025. Assessing the Efficacy of Pyrolysis–Gas Chromatography–Mass Spectrometry for Nanoplastic and Microplastic Analysis in Human Blood. *Environmental Science & Technology* 59(4): 1984-1994.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.4c12599>.
- Reininger, N., Oehlmann, J. 2024. Regrettable Substitution? Comparative Study of the Effect Profile of Bisphenol A and Eleven Analogues in an in vitro Test Battery. *Environmental Sciences Europe* 36: 76.
<https://doi.org/10.1186/s12302-024-00900-1>.
- Roman, L., Schuyler, Q., Wilcox, C., Hardesty, B.D. 2021. Plastic pollution is killing marine megafauna, but how do we prioritize policies to reduce mortality? *Conservation Letters* 14(2): e12781.
<https://doi.org/10.1111/conl.12781>.
- Römpf, H., Falbe, J., Regitz, M., Amelingmeier, E., Berger, M., Bergsträsser, U. 1999. *Römpf Kompakt. Basislexikon Chemie*. Thieme-Verlag, Stuttgart.
- Rummel, C.D., Jahnke, A., Gorokhova, E., Kühnel, D., Schmitt-Jansen, M. 2017. Impacts of Biofilm Formation on the Fate and Potential Effects of Microplastic in the Aquatic Environment. *Environmental Science & Technology Letters* 4(7): 258-267.
<https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00164>.
- Savoca, M.S., Wohlfeil, M.E., Ebeler, S.E., Nevitt, G.A. 2016. Marine Plastic Debris Emits a Keystone Infochemical for Olfactory Foraging Seabirds. *Science Advances* 2(11): e1600395.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>.
- Schwartz-Narbonne, H., Xia, C., Shalin, A., Whitehead, H.D., Yang, D., Peaslee, G.F., Wang, Z., Wu, Y., Peng, H., Blum, A., Venier, M., Diamond, M.L. 2023. Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Canadian Fast Food Packaging. *Environmental Science & Technology Letters* 10(4): 343-349.
<https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00926>.
- Scientists' Coalition for an Effective Plastics Treaty. 2024. The Essential Use Concept for the Global Plastics Treaty. Policy Brief.
<https://ikhapp.org/wp-content/uploads/2024/04/The-Essential-Use-Concept-for-the-Global-Plastics-Treaty.pdf>.
- Senathirajah, K., Attwood, S., Bhagwat, G., Carbery, M., Wilson, S., Palanisami, T. 2021. Estimation of the Mass of Microplastics Ingested – a Pivotal First Step Towards Human Health Risk Assessment. *Journal of Hazardous Materials* 404(Part B): 124004.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>.
- Shruti, V.C., Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F. 2024. Microplastisphere Antibiotic Resistance Genes: A Bird's-Eye View on the Plastic-Specific Diversity and Enrichment. *Science of The Total Environment* 912: 169316.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169316>.
- Sojka, R.E., Bjorneberg, D.L., Entry, J.A., Lentz, R.D., Orts, W.J. 2007. Polyacrylamide in Agriculture and Environmental Land Management. *Advances in Agronomy* 92: 75-162.
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)92002-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)92002-0).
- Song, S., van Dijk, F., Vasse, G.F., Liu, Q., Gosselink, I.F., Weltjens, E., Remels, A.H.V., de Jager, M.H., Bos, S., Li, C., Stoeger, T., Rehberg, M., Kutschke, D., van Eck, G.W.A., Wu, X., Willems, S.H., Boom, D.H.A., Kooter, I.M., Spierings, D., Wardenaar, R., Cole, M., Nawijn, M.C., Salvati, A., Gosens, R., Melgert, B.N. 2024. Inhalable Textile Microplastic Fibers Impair Airway Epithelial Differentiation. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 209(4): 427-443.
<https://doi.org/10.1164/rccm.202211-20990C>.

- Sphera Solutions. 2022. Life Cycle Assessment of Chemical Recycling for Food Grade Film. On behalf of The Consumer Goods Forum. <https://www.theconsumergoodsforum.com/wp-content/uploads/2022/04/Life-Cycle-Assessment-of-Chemical-Recycling-for-Food-Grade-Film.pdf>.
- Spilok, K. 2015. Kunststoffrecycling nach dem Aschenputtelprinzip, VDI-Nachrichten, 16.10.2015 <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/umwelt/kunststofftrennung-nach-dem-aschenputtelprinzip/>.
- Statista Research Departmentpro. 2023. Market volume of plasticizer worldwide from 2015 to 2022, with a forecast for 2023 to 2030. <https://www.statista.com/statistics/1245193/plasticizer-market-volume-worldwide/>.
- Steinhäuser, K.G., Große Ophoff, M. 2025. The Need for Change: A Roadmap for the Sustainable Transformation of the Chemical Industry. *Sustainable Chemistry* 6(2): 16. <https://doi.org/10.3390/suschem6020016>.
- Stock, V., Böhmert, L., Coban, G., Tyra, G., Vollbrecht, M.-L., Voss, L., Paul, M.B., Braeuning, A., Sieg, H. 2022. Microplastics and Nanoplastics: Size, Surface and Dispersant – What Causes the Effect? *Toxicology in Vitro* 80: 105314. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2022.105314>.
- Syberg, K. 2022. Beware the false hope of recycling. Reusing plastics and other materials is not enough. To achieving a circular economy, we must make less stuff to begin with. *Nature* 611(7936): S6. <http://dx.doi.org/10.1038/d41586-022-03645-0>.
- Tang, S., Xu, B., Zheng, Y., Zhao, Y. 2025. Nonwoven Fabrics: The Giant of Micro(nano)plastic Pollution Hidden in the Corners of Life. *Environmental Science & Technology* 59(23): 11429-11432. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c04448>.
- Tekman, M.B., Walther, B.A., Peter, C., Gutow, L., Bergmann, M. 2022. Impacts of plastic pollution in the oceans on marine species, biodiversity and ecosystems. WWF Germany (Ed.), Berlin. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5898684>.
- ten Hietbrink, S., Materić, D., Holzinger, R., Groeskamp, S., Niemann, H., 2025. Nanoplastic concentrations across the North Atlantic. *Nature* 643: 412-430. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09218-1>.
- Tetu, S.G., Sarker, I., Schrameyer, V., Pickford, R., Elbourne, L.D.H., Moore, L.R., Paulsen, I.T. 2019. Plastic Leachates Impair Growth and Oxygen Production in *Prochlorococcus*, the Ocean's Most Abundant Photosynthetic Bacteria. *communications biology* 2: 184. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0410-x>.
- The Pew Charitable Trusts, SYSTEMIQ (Eds.). 2020. Breaking the Plastics Wave. A Comprehensive Assessment of Pathways Towards Stopping Ocean Plastic Pollution. https://www.pewtrusts.org/-/media/assets/2020/10/breakingtheplasticwave_mainreport.pdf.
- Thermo-Hanf, HempFlax Building Solutions GmbH. 2021. Nature wins! – Ihr Leitfaden für unsere Hanf-Dämmstoffe. https://www.thermo-hanf.de/wp-content/uploads/2021/10/TH-Leitfaden-2021_DE.pdf.
- Thornton Hampton, L.M., Lowman, H., Coffin, S., Darin, E., de Frond, H., Hermabessiere, L., Miller, E., de Ruijter, V.N., Faltynkova, A., Kotar, S., Monclús, L., Siddiqui, S., Völker, J., Brander, S., Koelmans, A.A., Rochman, C.M., Wagner, M., Mehinto, A.C. 2022. A living tool for the continued exploration of microplastic toxicity. *Microplastics and Nanoplastics* 2: 13. <https://doi.org/10.1186/s43591-022-00032-4>.
- Thornton, J. 2001. Pandora's Poison: Chlorine, Health, and a New Environmental Strategy. MIT Press.
- Thrift, E., Nouvellet, P., Mathews, F. 2023. Plastic Entanglement Poses a Potential Hazard to European Hedgehogs *Erinaceus europaeus* in Great Britain. *Animals* 13(15): 2448. <https://doi.org/10.3390/ani13152448>.
- Tian, Z., Gonzalez, M., Rideout, C.A., Zhao, H.N., Hu, X., Wetzel, J., Mudrock, E., James, C.A., McIntyre, J.K., Kolodziej, E.P. 2022. 6PPD-Quinone: Revised Toxicity Assessment and Quantification with a Commercial Standard. *Environmental Science & Technology Letters* 9(2): 140-146. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00910>.
- Tian, Z., Zhao, H., Peter, K.T., Gonzalez, M., Wetzel, J., Wu, C., Hu, X., Prat, J., Mudrock, E., Hettinger, R., Cortina, A.E., Biswas, R.G., Kock, F.V.C., Soong, R., Jenne, A., Du, B., Hou, F., He, H., Lundeen, L., Gilbreath, A., Sutton, R., Scholz, N.L., Davis, J.W., Dodd, M.C., Simpson, A., McIntyre, J.K., Kolodziej, E.P. 2020. A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon. *Science* 371(6525): 185-189. <https://doi.org/10.1126/science.abd6951>.
- Trasande, L., Krithivasan, R., Park, K., Obsekov, V., Belliveau, M. 2024. Chemicals Used in Plastic Materials: An Estimate of the Attributable Disease Burden and Costs in the United States. *Journal of the Endocrine Society* 8(2): bvad163. <https://doi.org/10.1210/jendso/bvad163>.
- Troitzsch, J. 2011. Trendbericht Flammschutzmittel: Gebremstes Boomen. *Kunststoffe* 4: 70-74. <https://www.kunststoffe.de/a/fachartikel/trendbericht-flammschutzmittel-gebremste-257455>.
- U.S. National Library of Medicine, National Center for Biotechnology Information. 2025. PubChem Compound Summary for CID 13101, N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine. Last Update July 2025. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/N_1_3-Dimethylbutyl_N-phenyl-p-phenylenediamine.
- Umweltbundesamt (UBA). 2019. Kunststoffe in der Umwelt. Dessau Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/190515_uba_fb_kunststoffe_bf.pdf.
- Umweltbundesamt (UBA). 2025a. Internetsite zu Kunststoffabfällen. Stand 30.04.2025. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#kunststoffproduktion-verwendung-und-verwertung>.
- Umweltbundesamt (UBA). 2025b. Politische Schlussfolgerungen der UBA Studie „Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecycling“. Präsentation Dr. Julia Vogel (Umweltbundesamt), Berliner Konferenz Abfallwirtschaft und Energie BKAW 2025.
- Umweltbundesamt Österreich. 2025. Was ist Mikroplastik? <https://www.umweltbundesamt.at/umwelthemen/stoffradar/was-ist-mikroplastik>.
- Umweltbundesamt Österreich, LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (Hrsg.). 2021. PureAlps 2016-2020. Monitoring von persistenten organischen Schadstoffen und Quecksilber im Alpenraum (Immission, Deposition und Biota). Abschlussbericht. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/dp156bfz.pdf>.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2023. Chemicals in Plastics – A Technical Report. Genf, Schweiz. <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report>.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2024. Intergovernmental Negotiating Committee to develop an international legally binding instrument on plastic pollution, including in the marine environment. Chair's Text 01 December 2024. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/46710/Chairs_Text.pdf.

- UNEP (United Nations Environment Programme). 2025. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs) - All POPs listed in the Stockholm Convention. <https://www.pops.int/TheConvention/ThePOPs/AllPOPs/tabid/2509/Default.aspx>.
- Unisensor. 2025. Unisensor Sensorsysteme. UNISPECTRE 400, Hocheffizientes refPET Sniffer-System zum Aufspüren von Fremdstoffen und Verunreinigungen. <https://www.unisensor.de/produkte/product-details/getraenkeindustrie/unispectre-400.html>.
- VCI (Verband der Chemischen Industrie e.V.), VDI (Verband Deutscher Ingenieure e.V.) (Hrsg.). 2023. Chemistry4Climate. Wie die Transformation der Chemie gelingen kann. Abschlussbericht. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschure-langfassung.pdf>.
- Veillard, L. 2024. Fifty Years: Chemical Recycling's Fading Promise. Executive summary. Zero Waste Europe (Ed.). https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2024/11/ZWE_Nov24_FiftyYearsChemicalRecycling_ExecSummary.pdf.
- Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M., Cornell S. E. (2024). "Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries." *One Earth* 7(12): 2119-2138. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>.
- VINYLOOP®. 2001. A New Process to regenerate PVC Compounds from Composite Residues. A New Product. The Precipitated PVC Compound. <https://p2infohouse.org/ref/38/37438.pdf>.
- VINYLOOP®. 2018. Closure of Operation in Italy. Phthalates Issue under REACH Brings Down European PVC Recycling Project. https://www.plasteurope.com/news/Closure_of_operation_in_Italy_Phthalates_issue_under_REACH_brings_do_t240095/.
- Vorkamp, K., Rigét, F.F. 2014. A review of new and current-use contaminants in the Arctic environment: Evidence of long-range transport and indications of bioaccumulation. *Chemosphere* 111: 379-395. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.04.019>.
- Wagner, M., Monclús, L., Arp, H.P.H., Groh, K.J., Løseth, M.E., Muncke, J., Wang, Z., Wolf, R., Zimmermann, L. 2024. State of the science on plastic chemicals – Identifying and addressing chemicals and polymers of concern. Zenodo. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10701706>.
- Wang, A., Abrahamsson, D., Jiang, T., Wang, M., Morello-Frosch, R., Park, J.-S., Sirota, M., Woodruff, T.J. 2021. Suspect screening, prioritization and confirmation of environmental chemicals in maternal-newborn pairs from San Francisco. *Environmental Science & Technology* 55(8): 5037-5049. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05984>.
- Wang, M., Bauer, F., Syberg, K., Gammage, T. 2023. Finance plastics reuse, redesign, and reduction. *Science* 382(6670): 526-526. <http://dx.doi.org/10.1126/science.adl4491>.
- Watts, A.J.R., Urbina, M.A., Corr, S., Lewis, C., Galloway, T.S. 2015. Ingestion of Plastic Microfibers by the Crab *Carcinus maenas* and its Effect on Food Consumption and Energy Balance. *Environmental Science & Technology* 49(24): 14597-14604. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04026>.
- Weber, R., Hollert, H., Kamphues, J., Ballschmiter K., Blepp, M., Herold, C. 2015. Analyse und Trendabschätzung der Belastung der Umwelt und von Lebensmitteln mit ausgewählten POPs und Erweiterung des Datenbestandes der POP-Dioxin-Datenbank des Bundes und der Länder mit dem Ziel pfadbezogener Ursachenaufklärung. Dokumentationen 114/2015. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/doku_114_2015_analyse_und_trendabschaetzung_der_belastung_6.pdf.
- Weltmeyer, A., Roßnickoll, M. 2024. Different mulch films, consistent results: soil fauna responses to microplastic. *Environmental Monitoring and Assessment* 196: 943. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13096-x>.
- WHO (World Health Organization) (Ed.). 2012. State of the Science of Endocrine Disrupting Chemicals - 2012. An assessment of the state of the science of endocrine disruptors prepared by a group of experts for the United Nations Environment Programme and World Health Organization. Genf, Schweiz. <https://www.who.int/publications/i/item/state-of-the-science-of-endocrine-disrupting-chemicals>.
- Wiesinger, H., Wang, Z., Hellweg, S. 2021. Deep Dive into Plastic Monomers, Additives, and Processing Aids. *Environmental Science & Technology* 55(13): 9339-9351. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00976>.
- Winiarska, E., Jutel, M., Zemelka-Wiacek, M. 2024. The Potential Impact of Nano- and Microplastics on Human Health: Understanding Human Health Risks. *Environmental Research* 251(Part 2): 118535. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>.
- World Economic Forum, Ellen Mc Arthur Foundation, McKinsey & Company. 2016. The new plastics economy: Rethinking the Future of Plastics. <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/1775fbba280fa21/original/The-New-Plastics-Economy-Rethinking-the-future-of-plastics.pdf>.
- Wu, B., Wu, X., Liu, S., Wang, Z., Chen, L. 2019. Size-Dependent Effects of Polystyrene Microplastics on Cytotoxicity and Efflux Pump Inhibition in Human Caco-2 Cells. *Chemosphere* 221: 333-341. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.056>.
- Xu, J., Hao, Y., Yang, Z., Li, W., Xie, W., Huang, Y., Wang, D., He, Y., Liang, Y., Matsiko, J., Wang, P. 2022. Rubber Antioxidants and Their Transformation Products: Environmental Occurrence and Potential Impact. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(21): 14595. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114595>.
- Xu, J.-L., Wright, S., Rauer, C., Thomas, K.V. 2025. Are microplastics bad for your health? More rigorous science is needed. *Nature* 639: 300-302. <https://doi.org/10.1038/d41586-025-00702-2>.
- Yan, Z., Liu, Y., Zhang, T., Zhang, F., Ren, H., Zhang, Y. 2021. Analysis of Microplastics in Human Feces Reveals a Correlation between Fecal Microplastics and Inflammatory Bowel Disease Status. *Environmental Science & Technology* 56(1): 414-421. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03924>.
- Yates, J., Kadiyala S., Deeney, M., Carriedo, A., Gillespie, S., Heindel, J.J., Maffin, M.V., Martin, O., Monteiro, C.A., Scheringer, M., Touvier, M., Muncke, J. 2024. A toxic relationship: ultraprocessed foods & plastics. *Globalization and Health* 20: 74. <https://doi.org/10.1186/s12992-024-01078-0>.
- Yuan, B., Rüdell, H., de Wit, C.A., Koschorreck, J. 2022. Identifying emerging environmental concerns from long-chain chlorinated paraffins towards German ecosystems. *Journal of Hazardous Materials* 424: 127607. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127607>.
- Zadjelovic, V., Wright, R.J., Borsetto, C., Quarrey, J., Cairns, T.N., Langille, M.G.I., Wellington, E.M.H., Christie-Oleza, J.A. 2023. Microbial Hitchhikers Harboring Antimicrobial-Resistance Genes in the Riverine Plasticsphere. *Microbiome* 11(1): 225. <https://doi.org/10.1186/s40168-023-01662-3>.
- Zhang, Y., Slade, J.H., Ault, A.P., Chan, A.W.H. 2025. An Atmospheric Chemistry Perspective on Airborne Micro- and Nanoplastic Particles. *Environmental Science & Technology* 59(16): 7810-7819. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c03264>.
- Zhu, X., Konik, J., Kaufman, H. 2025. The knowns and unknowns in our understanding of how plastics impact climate change: a systematic review. *Frontiers in Environmental Science, Sec. Environmental Systems Engineering* 13: 1563488. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1563488>.

Zimmermann, L., Bartosova, Z., Braun, K., Oehlmann, J., Völker, C., Wagner, M. 2021. Plastic Products Leach Chemicals That Induce In Vitro Toxicity under Realistic Use Conditions. *Environmental Science & Technology* 55(17): 11814-11823.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01103?urlappend=%3Fref%3DPDF&jav=VoR&rel=cite-as>.

Zimmermann, L., Dombrowski, A., Völker, C., Wagner, M. 2020. Are bioplastics and plant-based materials safer than conventional plastics? In vitro toxicity and chemical composition. *Environment International* 145: 106066.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106066>.

Zimmermann, L., Scheringer, M., Geueke B., Boucher, J.M., Parkinson, L.V., Groh, K.J., Muncke, J. 2022. Implementing the EU Chemicals Strategy for Sustainability: The case of food contact chemicals of concern. *Journal of Hazardous Materials* 437: 129167.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129167>.

IMPRESSUM

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND)

Bundesgeschäftsstelle | Kaiserin-Augusta-Allee 5 | 10553 Berlin

Tel. +49 30 27586-40 | Fax +49 30 27586-440 | bund@bund.net

www.bund.net

Arbeitskreis Umweltchemikalien/Toxikologie im wissenschaftlichen Beirat des Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. BUND

Autor*innen:

Gottfried Arnold, Eva Bittmann, Hubertus Brunn, Markus Große Ophoff, Janine Korduan, Wolfgang Körner, Stefan Lips, Gerd Rippen, Klaus Steinhäuser

Wir danken Melanie Bergmann für die Durchsicht des Manuskriptes und wertvolle Hinweise.

Layout:

dieprojektoren.de

V. i. S. d. P.: Nicole Anton

September 2025