

BMBF-Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt –  
Quellen • Senken • Lösungsansätze“

# Kernbotschaften



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**FONA**

Forschung für Nachhaltigkeit

# Impressum

## Herausgeber

Ecologic Institut gemeinnützige GmbH  
Pfalzburger Str. 43/44, 10717 Berlin  
Geschäftsführerin: Dr. Camilla Bausch  
Sitz: Berlin, AG Charlottenburg HRB 57947;  
UST ID: DE 811963464

## Ansprechpartner:innen für den BMBF-Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt – Quellen · Senken · Lösungsansätze“:

### Beim BMBF

Thomas Bartelt  
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
Referat 726 – Ressourcen, Kreislaufwirtschaft, Geoforschung  
53170 Bonn  
Tel.: +49(0)228 9957 - 38 90  
Fax: +49(0)228 9957 - 838 90  
E-Mail: Thomas.Bartelt@bmbf.bund.de

### Beim Projektträger

Dr.-Ing. Saskia Ziemann  
Projektträgerschaft Ressourcen, Kreislaufwirtschaft, Geoforschung  
Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen  
Tel.: +49(0)721 608 - 232 35  
Fax: +49(0)721 608 - 923 235  
E-Mail: saskia.ziemann@kit.edu

### Editor

Wissenschaftliches Begleitvorhaben (PlastikNet) des BMBF-Forschungsschwerpunkts  
„Plastik in der Umwelt – Quellen • Senken • Lösungsansätze“  
Doris Knoblauch, Dr. Ulf Stein, Linda Mederake, Hannes Schritt, Mandy Hinzmann  
Ecologic Institut gemeinnützige GmbH  
E-Mail: plastiknet@ecologic.eu  
Tel: +49(30) 868 80 - 0  
Fax: +49(30) 868 80 - 100  
Website: <https://bmbf-plastik.de>  
Twitter: @plastik\_umwelt

### Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor:innen.  
Die Kernbotschaften sind nicht für den gewerblichen Vertrieb bestimmt (© CC BY-NC).

2., überarbeitete Auflage, Juli 2022

### Graphisches Konzept, Layout

Lena Aebli, Jennifer Rahn

<https://bmbf-plastik.de/de/Publikation/Kernbotschaften>

ISBN: 978-3-937085-36-4

### Zitiervorschlag

Hinzmann, Mandy; Knoblauch, Doris; Mederake, Linda; Schritt, Hannes; Stein, Ulf (Hrsg.) [2022]:  
Kernbotschaften zum Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt“.

# Inhaltsverzeichnis

Glossar	04
<b>Einleitung</b>	<b>06</b>
<b>01 Quellen und Eintragspfade von Plastik in die Umwelt</b>	<b>08</b>
<b>02 Ökotoxikologische Bewertung von Mikroplastik als komplexe Aufgabe</b>	<b>12</b>
<b>03 Plastik im Abwasser: erfassen, untersuchen, entfernen.</b>	<b>16</b>
<b>04 Plastik in Böden: Einträge, Verhalten und Verbleib</b>	<b>19</b>
<b>05 Unternehmen müssen mehr Verantwortung übernehmen</b>	<b>23</b>
<b>06 Noch nicht ausreichend effizient: Abfallwirtschaft und Recycling</b>	<b>26</b>
<b>07 Wie Kommunen zu weniger Kunststoffemissionen beitragen können</b>	<b>29</b>
<b>08 Begrenzte Möglichkeiten: Welchen Einfluss haben Verbraucher:innen?</b>	<b>33</b>
<b>09 Wesentliche Fortschritte in der Mikroplastik-Analytik</b>	<b>36</b>
<b>10 Rechtliche Empfehlungen zur Reduktion von Kunststoffemissionen</b>	<b>39</b>
<b>Fazit</b>	<b>44</b>
Literaturverzeichnis	46
Abbildungsverzeichnis	51

# Glossar

<b>Additive</b>	Zusatzstoff/Intermolekulare Verbindungen in einem Kunststoff neben dem überwiegend vorliegenden Polymer.
<b>Analyt</b>	Zu untersuchender Stoff – hier zumeist Mikroplastik.
<b>Biofilm</b>	Organismen, die sich aktiv an eine Oberfläche anheften.
<b>bioverfügbar</b>	Anteil eines Stoffes, der in einem Lebewesen zur Wirkung kommt.
<b>Blindwert</b>	Messwert, der ohne Hinzugabe der zu untersuchenden Probe generiert wird.
<b>Bodenmikrobiom</b>	Die Zusammensetzung der Mikroorganismen im Boden.
<b>Charakterisierung</b>	Stoffliche Eigenschaft eines Analyten oder Mediums.
<b>Depolymerisation</b>	Zersetzung der Polymere in Monomere.
<b>Deposition</b>	Ablagerung.
<b>Detritus</b>	Zerfallende organische Substanzen in Gewässern.
<b>Duroplast</b>	Polymer, das durch eine chemische Reaktion [Polymerisation] aushärtet.
<b>Diffuse Quelle</b>	Nicht exakt feststellbare Quellen, aus denen Stoffe in die Umwelt gelangen.
<b>Downstream</b>	Unterer Teil der Produktions-/Lieferkette (Lagerung, Transport, Nutzung, Entsorgung, Recycling).
<b>Elastomer</b>	Polymer mit elastischen Eigenschaften, umgangssprachlich Gummi.
<b>Elementanalytik</b>	Analytisches Verfahren zum Nachweis spezifischer Elemente in Mikroplastik.
<b>End-of-Pipe-Lösung</b>	Nachgeschaltete Maßnahmen zur Reduktion von Umweltbelastungen, z. B. Reinigungsprozesse.
<b>Feld-Fluss-Fraktionierung</b>	Trennmethodik für die anschließende Detektion von Mikroplastik im Nanobereich.
<b>humanpathogen</b>	Erreger mit der Fähigkeit, Erkrankungen beim Menschen hervorzurufen.
<b>Kalorimetrie</b>	Analytisches Verfahren zur Charakterisierung von Phasenübergängen von Kunststoffen.
<b>Kunststoffe</b>	Hauptsächlich auf (teil-)synthetischen Polymeren aufgebaute Werkstoffe, umgangssprachlich Plastik.
<b>Laminar-Flow-Box</b>	Laborgerät, das einen parallelen Luftstrom von oben nach unten herstellt und so eine möglichst geringe Kontamination aus der Umgebung/Luft ermöglicht.

<b>Makroplastik</b>	Plastikfragmente größer als 5 Millimeter.
<b>Matrix/Probenmatrix</b>	Bestandteile einer zu untersuchenden Probe, die nicht analysiert werden.
<b>Microbeads</b>	Reibkörper in Kosmetikartikeln
<b>Mikroplastik</b>	Plastikfragmente in der Größe von 1 - 1.000 Mikrometer.
» Sekundäres	Entsteht durch die Fragmentierung von größerem Plastik.
» Primäres	Wird bewusst als partikulärer Stoff eingesetzt.
<b>Monomer</b>	Moleküle, die als strukturelle Wiederholungseinheit zu Polymeren reagieren können.
<b>Polymer</b>	Makromolekulare Verbindung, die sich aus strukturellen Wiederholungseinheiten (Monomere) zusammensetzt.
<b>Polymerisation</b>	Reaktion, bei der aus Monomeren als Ausgangsstoffe Polymere als Produkt entstehen.
<b>Punktquelle</b>	Klar definier- und abgrenzbare Quelle von Stoffeinträgen in die Umwelt.
<b>Rebound-Effekt</b>	Phänomen, wenn erwartete Einsparpotenziale durch Effizienzsteigerungen nicht erreicht werden, weil eingesparte Ressourcen an anderer Stelle eingesetzt werden und damit auch der Verbrauch wieder steigen kann.
<b>Senke</b>	Lokale Orte oder Medien (inklusive Lebewesen), an bzw. in denen sich Kunststoffe sammeln bzw. anreichern.
<b>Spektroskopie</b>	Analytische Verfahren zum Nachweis von Mikroplastik-Partikeln anhand der chemischen Struktur.
<b>Stakeholder</b>	Akteur:innen, die ein berechtigtes Interesse am Verlauf oder Ergebnis eines Prozesses oder Projektes haben.
<b>Thermoanalytik</b>	Analytische Verfahren zum Nachweis von Mikroplastikgehalten anhand der chemischen Struktur.
<b>Thermoplast</b>	Polymer, das in einem Temperaturbereich plastisch verformbar ist.
<b>Umweltkompartiment</b>	Voneinander abgrenzbare Bereiche der Erde, z. B. Wasser, Boden, Luft.
<b>Upstream</b>	Der obere Teil der Produktions-/Lieferkette (Rohstoffgewinnung, Entwicklung, Design, Fertigung).
<b>Validierung</b>	Durch die Validierung wird der dokumentierte Beweis erbracht, dass ein Prozess oder ein System die vorher spezifizierten Anforderungen wiederholbar erfüllt.
<b>Vibrionen</b>	Bakteriengattung, zu der unter anderem der Choleraerreger gehört.

# Einleitung

**Plastikmüll ist ein globales Umweltproblem mit ökologischen Folgen. Es ist noch zu wenig darüber bekannt, wie Kunststoffpartikel eingetragen und verbreitet werden und wie sie sich auf Menschen und Tiere auswirken. Um diese Wissenslücken zu schließen und wirksame Gestaltungshebel zu entwickeln, mit denen der Eintrag von Plastikabfällen und Mikroplastik in die Weltmeere vermieden beziehungsweise erheblich vermindert werden kann, ist umfassende Forschungsarbeit notwendig.**

Im Jahr 2017 hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) den nationalen Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt“ aufgelegt. Ziel der geleisteten Arbeiten ist es, eine systemische Betrachtungsweise anzustoßen und ein besseres Verständnis der Umweltauswirkungen von Plastikmüll zu erhalten. Es werden insgesamt 20 Verbundprojekte mit mehr als 100 beteiligten Institutionen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Praxis sowie ein wissenschaftliches Begleitvorhaben gefördert. Die Forschenden arbeiten interdisziplinär zusammen in fünf Themenbereichen, welche entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Kunststoffe ausgerichtet sind: Green Economy, Konsum und Verbraucherverhalten, Recycling, Limnische Systeme, Meere & Ozeane.

Übergreifende Fragestellungen, die von mehreren Verbundprojekten bearbeitet werden, sind in sieben Querschnittsthemen zusammengefasst: (1) Analytik und Referenzmaterialien, (2) Ökotoxikologie, (3) Begriffe und Definitionen, (4) Soziale und politische Dimensionen, (5) Modellierung und Ökobilanzierung (inkl. Datenmanagement), (6) Recycling und Produktentwicklung, (7) Bioabbaubarkeit. In diesen Querschnittsthemen werden Methoden gemeinsam weiterentwickelt, Forschungsfragen differen-

ziert und Synergien genutzt, um den Wissensaustausch zwischen den Projekten zu stärken und die wissenschaftliche Qualität der Ergebnisse sicherzustellen. In allen Themenbereichen sind wichtige Erkenntnisse gewonnen worden, Grundlagenwissen erweitert und Entwicklungen vorangetrieben. Dies umfasst unter anderem:

## » Erweitertes analytisches Know-how

Es wurde ein sehr gutes analytisches Know-how entwickelt, um Mikroplastik zu erfassen und zu untersuchen. Dabei konnte auf Vorarbeiten der JPI Oceans-Initiative (z. B. BASEMAN [1]) und der BMBF-Projekte MiWa [2] und OEMP [3]) aufgebaut werden. Dieses Know-how bildet eine entscheidende Grundlage für nationale und europäische Normungen der Verfahren sowie um internationale Standards zu erarbeiten. [4]

## » Ökotoxikologische Bewertung von Mikroplastik in der Umwelt

Mikroplastik kann schädlich für Organismen sein, wie die Projektarbeiten zeigen. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern wichtige Beiträge zum Wissen über die ökologischen Auswirkungen von Mikroplastik auf Süßwasser- und marine Systeme. [5]

## » Gut definiert: ein Kompendium für wichtige Begriffe

Das von einem interdisziplinären Team erarbeitete Kompendium zum Thema Kunststoff in der Umwelt erläutert wesentliche Begriffe auf Basis bestehender Definitionen. Es zielt darauf ab, zu einem besseren Verständnis von Kunststoffen in der Umwelt beizutragen und die Kommunikation zum Themenfeld auch außerhalb der Wissenschaft auf ein begrifflich korrektes Fundament zu stellen. [6]

Unter **Kunststoffen** oder **Plastik** werden im Kontext dieser Forschungsarbeiten alle aus (teil-) synthetischen Polymeren aufgebauten festen Materialien verstanden, d.h. thermo- und duroplastische Kunststoffe und Elastomere, aber auch Produkte wie Lacke, textile Fasern oder Reifenabrieb. Partikel und Fasern sowie Fragmente dieser Produkte werden entsprechend ihrer größten Dimension in **Makroplastik** (> 5mm), **Mikroplastik** (5 mm- 1µm) und **Nanoplastik** (< 1µm) eingeteilt.

### » Mikroplastik mithilfe mathematischer Modelle weiter erforschen

Daten zu Mikroplastik in der Fläche lassen sich aktuell nicht befriedigend erheben. Ein Synthesepapier zeigt den möglichen Beitrag von Modellierungen zur weiteren flächenbezogenen Mikroplastikforschung auf: Mathematische Modelle erlauben es, die Sensitivität verschiedener Kenngrößen und Prozesse auf die Mikroplastik-Verteilung in der Umwelt abzuschätzen. Damit lassen sich die Anforderungen an die Zahl, Verteilung und Frequenz zukünftiger Probenahmen spezifizieren. [7]

### » Zusammengefasstes Wissen über Bioabbaubarkeit

Das Sachstandspapier Bioabbaubarkeit liefert eine ausführliche Zusammenfassung des aktuellen Wissens darüber, was unter der biologischen Abbaubarkeit von Kunststoffen zu verstehen ist und wie bzw. unter welchen Einflussfaktoren sie wirksam werden kann. [8]

### » Zentrale Kernbotschaften für eine nachhaltigere Gesellschaft

Kompakt und auf den Punkt: Wie die Gesellschaft Wege zum nachhaltigen Umgang mit Kunststoffen finden und verfolgen kann, zeigen die aus sozialwissenschaftlicher Perspektive formulierten 11 Kernbotschaften. [9]

### » Forschungsergebnisse nutzen, um Verbraucher:innen zu sensibilisieren

Verbraucher:innen sind neben Politik und Unter-

nehmen zentrale Akteure, wenn es um die Vermeidung von Plastikeinträgen in die Umwelt geht. Um zur Sensibilisierung und Bewusstseinsbildung der Verbraucher:innen beizutragen, können die Forschungsergebnisse in Bildungs- und Aufklärungskonzepte einfließen. In einigen Projekten wurde der Transfer in die Öffentlichkeit bereits in die Tat umgesetzt, etwa bei der Citizen Science-Aktion Plastikpiraten (plasticpirates.eu/de) oder bei der Erstellung von Bildungsmaterialien für verschiedene Altersgruppen. [10]

In den folgenden Kapiteln sind die wesentlichen Kernbotschaften aus allen 20 Verbundprojekten zusammengefasst. Gegliedert nach Schwerpunktthemen werden die zentralen Ergebnisse vorgestellt, um daraus Empfehlungen für verschiedene Adressaten abzuleiten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die einzelnen Verbundprojekte unterschiedliche Laufzeiten haben; einige bereits abgeschlossen sind während andere noch laufen. Zudem besteht zum Thema Kunststoffe in der Umwelt trotz der großen Fortschritte, die erzielt werden konnten, weiterer Forschungsbedarf. Viele der dargestellten Resultate sind somit als erste und nicht als abschließende Ergebnisse zu betrachten. Dies betrifft auch die Belastbarkeit bestimmter gemessener Werte und erhobener Daten. Genauere Informationen zur Erhebungsmethode, Belastbarkeit und zum Kontext der Daten bieten die Veröffentlichungen der wissenschaftlichen Ergebnisse aus den einzelnen Projekten.



# 01 Quellen und Eintragspfade von Plastik in die Umwelt



Kunststoffe gelangen über verschiedene Wege in die Umwelt – man spricht dabei von Eintragspfaden. Es wurden unterschiedliche Quellen für Kunststoffeinträge und wie sich diese ausbreiten untersucht.

## Ergebnisse:

» **Industrie und Gewerbe:** Gewerbliche und industrielle Abwässer, die in kommunale Kläranlagen eingeleitet werden (**Indirekteinleitung**), weisen zum Teil erhöhte Mikroplastik-Konzentrationen auf. In den untersuchten **industriellen** und kommunalen Kläranlagen werden Mikroplastik-Partikel aus dem Abwasser weitgehend entfernt (s. u.).

Bei Herstellung und Transport von Kunststoffprodukten (z. B. Granulate) kann (Mikro-) Plastik **unbeabsichtigt freigesetzt** werden, etwa durch unsachgemäße Lagerung und Handhabung, ungeeignete Transportmittel oder Betriebsstörungen. **Niederschlagswasser** von Verkehrs- und Produktionsflächen wird zum Teil unbehandelt in Gewässer eingeleitet. Verwehungen und Erosion von Industrie- und Gewerbeflächen führen zu **diffusen Emissionen** [1] (vgl. Kapitel 5).

» **Haushalte und urbaner Raum (Konsum):** Bei der Nutzung von kunststoffhaltigen Produkten entstehen (Mikro-) Plastikemissionen, unter anderem durch **Textilwäsche** [2], Wasch- und Reinigungsmittel sowie durch den Abrieb von Produkten im Gebrauch. Besonders beim ersten Waschen von Kleidung wird viel faserförmiges Mikroplastik emittiert. In kommunalen Kläranlagen wird der Großteil an (Mikro-) Plastik aus dem Abwasser (u. a. **häusliche Abwässer** und **Niederschlagswasser**) entfernt (vgl. Kapitel 3). Geringe Restgehalte im **Ablauf von Kläranlagen** können Oberflächengewässer erreichen. [3, 4] Aus dem Abwasser entferntes (Mikro-) Plastik findet sich vor allem im **Klärschlamm** wieder [4-6]. Dieser wird überwiegend thermisch verwertet (die bodenbezogene Klärschlammverwertung nimmt zunehmend ab, s. u. und Kapitel 3).



Erste orientierende Untersuchungen lassen hohe Emissionen über unbehandeltes Niederschlagswasser und **Mischwasserentlastungen** vermuten.

Eine bedeutende Quelle für Kunststoffteile in der Umwelt ist **Littering**, also achtloses Wegwerfen und Liegenlassen von Plastikmüll [3], beispielsweise bei kulturellen Großveranstaltungen [7, 8]. Gelitterte Kunststoffe können bei Extremwetterereignissen zu punktuell hohen Einträgen von (Mikro-)Plastik in die Umwelt führen. Zudem spielt der urbane Raum als Quelle für atmosphärische Einträge von Mikroplastik eine wichtige Rolle. Daneben gibt es weitere diffuse Quellen, beispielsweise Sportplätze mit Kunstrasen, Baustellen etc. [9] *[vgl. Kapitel 7 und Kapitel 8].*

» **Verkehr: Reifenabrieb** stellt nach jetzigem Kenntnisstand eine der größten Quellen für Mikroplastik in der Umwelt dar. Hotspots der Entstehung sind Kurven, Ampeln und Kreuzungen. [10] Durch Verwehungen, Erosion und Niederschlagswasserableitung kann Reifenabrieb in Gewässer gelangen und reichert sich vor allem außerorts in Böden in der Nähe von Straßen an. [11] Zudem erfolgen Einträge als Feinstaub in die Luft *[vgl. Kapitel 7].*

» **Abfall:** Bei der Sammlung und Behandlung von **(Kunststoff-) Abfällen** entstehen **diffuse Emissionen** etwa durch unbeabsichtigte Freisetzung oder Verwehungen. Fehlwürfe führen zu hohen Konzentrationen an (Mikro-)Plastik in **Komposten und Gärresten** *[vgl. Kapitel 4].* Unbehandelte Deponiesickerwässer [3] stellen eine Quelle für Mikroplastik dar, die durch eine Behandlung bereits vor der Einleitung in kommunale Kläranlagen reduziert werden kann.

» **Landwirtschaft: Düngemittel und Saatgut** werden häufig mit Kunststoffumhüllung in Böden eingebracht. Durch Einsatz von **Mulch- und Abdeckfolien, Vliesen und Netzen** gelangt ebenfalls (Mikro-)Plastik in die Umwelt, insbesondere wenn diese fragmentieren, verwehen oder unsachgemäß entsorgt werden. Klärschlamm wurde über Jahrzehnte als organischer Dünger in der Landwirtschaft genutzt, was zur relevanten Mikroplastik-Anreicherung

im Boden beitrug. Modellrechnungen ermöglichen eine Abschätzung des Mikroplastikeintrags durch **Kompost**, Klärschlamm, Gärreste und Folien seit den 1960er Jahren in einzelnen Untersuchungsgebieten: Rund die Hälfte des Eintrags stammt dabei aus Kompost und ein Drittel aus **Klärschlamm**. Während Kompost und Gärreste sowie Folien weiterhin relevante Eintragspfade sind, wird die bodenbezogene Klärschlammverwertung (2020: 16 %) zukünftig durch die in Deutschland überwiegende thermische Klärschlammverwertung weiter zurückgehen *[vgl. Kapitel 4].*

» **Transport:** (Mikro-)Plastik unterliegt in der Umwelt komplexen **Transport**prozessen. So können **Verwehungen** zum Transfer von Böden in die Luft und zu atmosphärischem Transport an entlegene Stellen führen. Durch **Niederschläge** (Auswaschen) [3] und **trockene Deposition** (Ablagerung) gelangt luftgetragenes Mikroplastik wieder in Böden und Gewässer. Die Luft im urbanen Raum ist stärker mit Mikroplastik belastet als auf dem Land. [12]

Niederschläge können zur **Bodenerosion** vor allem landwirtschaftlicher Flächen führen und damit zum Transfer von Mikroplastik in Gewässer beitragen. Nach ersten modellbasierten Abschätzungen ist die jährliche Eintragsmenge in Fließgewässer durch Erosion in landwirtschaftlich geprägten Gebieten vergleichbar mit jener aus kommunalen Kläranlagen. Innerhalb von Ackerflächen erfolgt eine Verlagerung in tiefere Bodenschichten durch Bearbeitung, Niederschläge, Durchmischung durch Bodenlebewesen und zu einem geringeren Teil auch durch Transport in Makroporen (Hohlräume im Boden). [3]

Innerhalb von Gewässern **sedimentiert** (Mikro-)Plastik vor allem in Zonen mit niedriger Fließgeschwindigkeit, etwa an Talsperren oder Flussauen. Biofilmbildung auf (Mikro-)Plastik und darauffolgende Mineral- und Aggregatbildung lässt auch Plastikpartikel mit geringer Dichte absinken. Es kann bei Extremwetterereignissen, etwa bei Starkregen oder Hochwasser, wieder remobilisiert werden. Makroplastik sammelt sich vor allem in Uferzonen. In **Stautufen** kann Makroplastik durch Rechenanlagen

von Wasserkraftanlagen aus den Gewässern entfernt werden. [13] Nicht sedimentiertes (Mikro-)Plastik gelangt über Fließgewässer ins Meer.

Im Verlauf von Fließgewässern konnte vom Oberlauf bis zur Mündung bislang kein kontinuierlicher Anstieg von Mikroplastik festgestellt werden. Dies ist u. a. auf die Momentaufnahmen der Untersuchungen in Verbindung mit der inhomogenen Verteilung von Mikroplastik im Wasserkörper zurückzuführen.

Neben dem Transport spielt die fortschreitende **Fragmentierung** von Kunststoffen (Makroplastik > Mikroplastik > Nanoplastik) durch Einflüsse wie UV-Strahlung oder Reibung eine wichtige Rolle für deren Vorkommen und Verhalten in der Umwelt. [3] Wie sie sich in der Umwelt verhalten, hängt unter anderem mit Partikelgrößen und deren Dichte zusammen. [14]

Anhand der durchgeführten Untersuchungen kann die Relevanz einzelner Quellen, Pfade und Prozesse für den **Eintrag** von Kunststoffen in die Umwelt abgeschätzt werden (s. *Abbildung S. 11*).

## Empfehlungen:

Raum- und zeitbezogene Modellrechnungen müssen weiter optimiert werden, um sie zur Abschätzung und Bewertung von Maßnahmen (bspw. weiterer Verfahrenstechniken – vgl. *Kapitel 3*) nutzen zu können. Um (Mikro-)Plastik in der Umwelt effektiv zu reduzieren, sind auch Ansätze zur Verminderung von Makroplastikemissionen (z. B. durch Littering) notwendig.

» **Industrie und Gewerbe:** Industrielle Emissionen können vor allem durch organisatorische und betriebliche Maßnahmen (bspw. Reinigen von Betriebsflächen), bauliche Veränderungen und Behandlung von Niederschlagswasser reduziert werden. [7]

» **Haushalte und urbaner Raum (Konsum):** (Mikro-)Plastikemissionen während und nach der Nutzungsphase von Produkten lassen sich vor allem durch längere Lebenszyklen von Kunst-

stoffprodukten verringern (z. B. weniger Einweg oder Fast Fashion). Dies kann durch regulatorische Maßnahmen forciert werden, etwa indem stärkere Anreize zur Vermeidung geschaffen werden. Hier spielt auch das Nutzungsverhalten der Konsument:innen eine entscheidende Rolle (vgl. *Kapitel 8*).

(Mikro-)Plastikemissionen durch unbehandeltes Abwasser, das über Mischwasserentlastungen und Niederschlagswasserkanäle in die Gewässer gelangt, müssen mittels Maßnahmen in der Betriebsführung und technologischer Entwicklung von Rückhalteeinrichtungen reduziert werden.

» **Abfall:** Da die technischen Möglichkeiten zur nachträglichen Abtrennung von (Mikro-)Plastik aus Bioabfällen begrenzt bzw. sehr aufwändig sind, kann hier der größte Erfolg zur Vermeidung und Verminderung der Emissionen erreicht werden, indem das Abfall-Trennverhalten (bspw. Fehlwürfe) verbessert wird. Die Sammlung von Kunststoffabfällen sollte konsequent von einer Sack- auf eine Tonnen-sammlung umgestellt werden. Eine bedarfsgerechte Optimierung der Straßenreinigung und der Abfallsammlung im öffentlichen Raum kann den Eintrag in die Umwelt reduzieren (vgl. *Kapitel 6*).

» **Landwirtschaft:** Plastikmaterialien, die in der Landwirtschaft eingesetzt werden, müssen möglichst vollständig eingesammelt und recycelt werden. Der Einsatz bioabbaubarer Kunststoffe (Folien, Vliese etc.) hilft dabei, die (Mikro-)Plastikakkumulation im Boden zu vermindern. Um Mikroplastik-Einträge zu vermeiden, sollte Klärschlamm nicht bodenbezogen verwertet werden. Alternative, forschungsgestützt entwickelte Produktionsmethoden mit geringerem Kunststoffverbrauch sollten zum Einsatz kommen, auch indem Landwirt:innen verstärkt beraten werden.

» **Verkehr:** Die Nutzung abriebarmer Reifen und eine defensive Fahrweise sind neben der Verringerung des Individualverkehrs Ansätze, um die Entstehung von Reifenabrieb zu reduzieren. Bisher unbehandeltes Niederschlagswasser von Straßen ist an städtischen Hotspots einer entsprechenden Behandlung zu

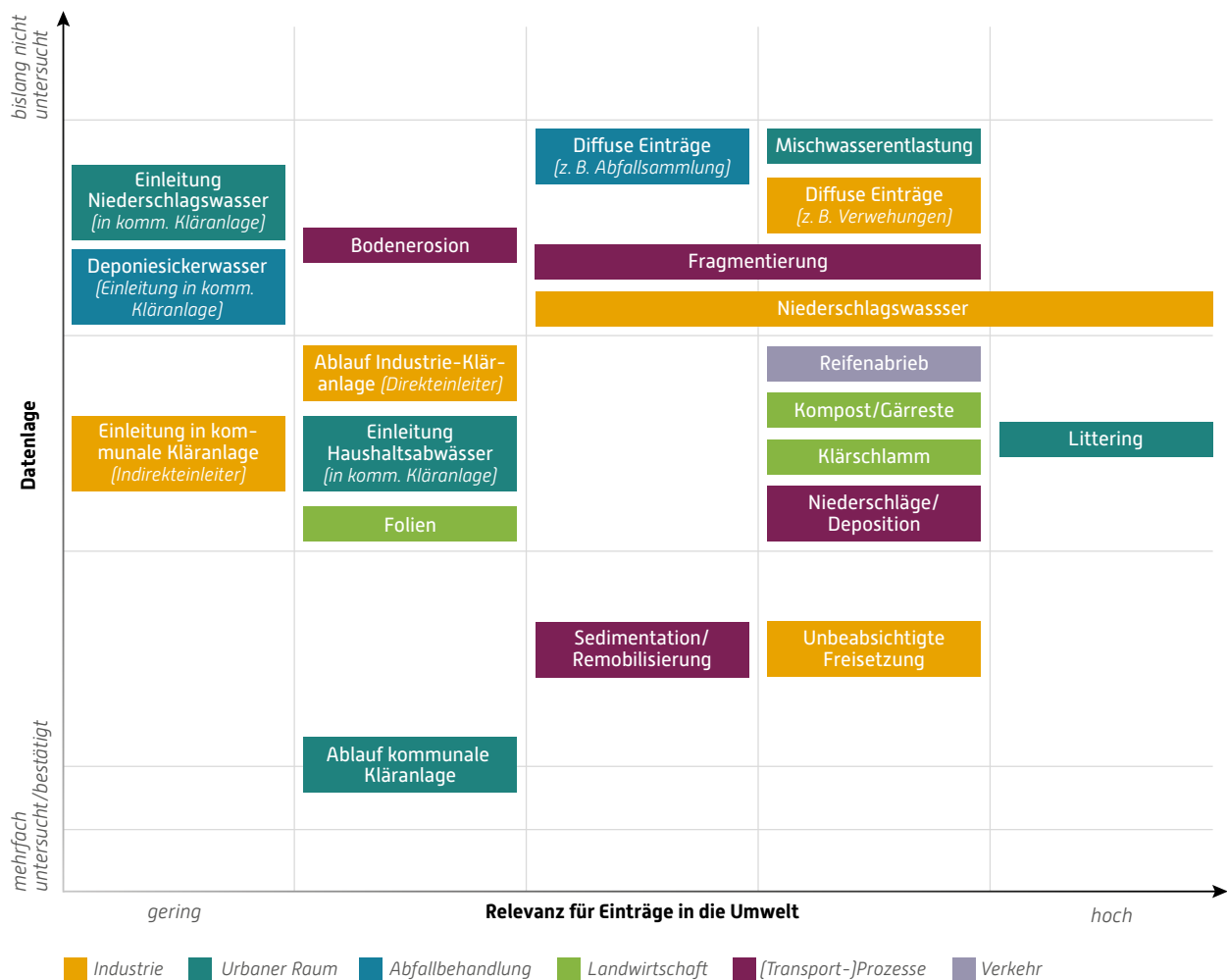


Abb.: Relevanz von Eintragungspfaden und Prozessen für Kunststoffe in der Umwelt

Die Grafik stellt die Relevanz einzelner Eintragungspfaden und Prozesse für Kunststoffe in der Umwelt dar (von links nach rechts aufsteigende Relevanz). Zusätzlich ist die Belastbarkeit der Datengrundlage angegeben. Von unten nach oben nimmt die Anzahl der Studien/Projekte, die dies im Forschungsschwerpunkt untersucht haben und somit die Belastbarkeit der Daten ab. Eine Bewertung der Datenlage als „mehrfach untersucht/bestätigt“ schließt nicht aus, dass weiterhin noch offene Forschungsfragen vorhanden sind.

unterziehen. Reifenabrieb-Einträge lassen sich außerdem durch eine optimierte Straßenreinigung reduzieren, etwa indem nach Möglichkeit vor Regenereignissen gekehrt wird.

### Forschungsbedarf:

» **Wie können Daten zu den Quellen und Eintragungspfaden von Kunststoffemissionen in die Umwelt erhoben werden, die bisher nicht ausreichend untersucht sind?**

» **Welche Relevanz haben diese und was könnten wirksame Lösungsansätze zur Reduzierung sein?**

### Autor:innen

» **Redaktion:** Katharina Wörle, Felix Weber, Luisa Barkmann

» **Beiträge:** Claus Gerhard Bannick, Marco Breitbarth, Peter Fiener, Tim Fuhrmann, Jörg Klasmeier, Steffen Krause, Gholamreza Shiravani, Daniel Venghaus, Frank Wendland, Katrin Wendt-Potthoff, Andreas Wurpts, Marco Kunaschk, Martin Löder, Katrin Wendt-Potthoff

# 02 Ökotoxikologische Bewertung von Mikroplastik als komplexe Aufgabe



Die Auswirkungen von Mikroplastik auf Pflanzen und Tiere sind bisher nicht vollständig beschrieben. Mikroplastik hat unterschiedliche Eigenschaften, die bestimmen, ob und wie es von Lebewesen aufgenommen wird und inwiefern es für diese schädlich ist. Im Vergleich zu anderen Schadstoffen in der Umwelt kann Mikroplastik daher eine komplexere Wirkung auf verschiedene Lebewesen haben.

## **Ergebnisse:**

### **Zusammensetzung, Form und Eigenschaften von Mikroplastik-Partikeln sind vielfältig**

» Mikroplastik-Partikel liegen in der Umwelt als heterogenes Stoffgemisch (Plastiktyp, Größe, Form, Zusatzstoffe etc.) vor, das vielfältige Kombinationen und Eigenschaften aufweisen kann. Dies bedingt eine unterschiedliche Bioverfügbarkeit und Aufnahme in Organismen.

» Formen und Eigenschaften von Mikroplastik-Partikeln verändern sich in der Umwelt, etwa durch Verwitterung und Biofilmbewuchs. So kann selbst Mikroplastik mit geringen Dichten

auf den Gewässergrund absinken und Mikroplastik mit höheren Dichten kann an die Wasseroberfläche steigen. Mikroplastik bietet außerdem, wie natürliche Partikel auch, vielfältige Oberflächen, an denen sich Schadstoffe und Krankheitserreger anlagern können.

### **Mikroplastik kann sehr unterschiedlich wirken**

» Die Ergebnisse ökotoxikologischer Untersuchungen und die in der Umwelt festgestellten Konzentrationen von Mikroplastik > 10 Mikrometer weisen darauf hin, dass vom aktuellen Vorkommen von Mikroplastik keine unmittel-

bar todbringenden Wirkungen in der aquatischen Umwelt zu erwarten sind. Für kleinere Plastikpartikel (< 10 µm) gibt es bisher keine ausreichenden Daten. Weiterhin kann dauerhafter Kontakt mit Mikroplastik bei verschiedenen Lebewesen zu schädlichen Effekten führen.

» Mikroplastik-Partikel können im Darm von Lebewesen physikalische Verletzungen hervorrufen, die sekundär zu Entzündungen führen oder die Darmflora verändern.

» Mikroplastik kann toxische Additive freisetzen, die in unterschiedlichen Umwelten (Wasser, Boden, Luft) nachgewiesen wurden. Wenn Mikroplastik über Nahrung, Atmung oder Hautkontakt aufgenommen wird, könnten Additive wie etwa Weichmacher oder Flammschutzmittel aus dem Kunststoff im Körper der Organismen gelöst werden.

» Experimentelle Untersuchungen zu den Auswirkungen von Mikroplastik auf unterschiedliche aquatische Organismen zeigen, dass die Effekte stark von der untersuchten Spezies abhängen, aber auch die Alterung der Partikel beeinflusst die Wirkungen auf die Lebewesen. Zudem zeigen sich bei einigen Tieren negative Reaktionen für bestimmte Parameter, während bei anderen Arten keine Auffälligkeiten gegenüber einer Mikroplastik-Exposition erkennbar sind.

» Auf Mikroplastik wachsende Biofilme können abhängig vom Material unterschiedliche Nahrungsqualität haben. Solche bewachsenen Mikroplastik-Partikel können Teil der Nahrungskette werden. Sowohl die Konzentration der natürlichen Nahrungspartikel als auch die des Mikroplastiks sind für mögliche Auswirkungen entscheidend. Wenn Lebewesen Mikroplastik mit ihrer Nahrung verwechseln, kann das zu Unterernährung führen. Darüber hinaus kann Plastik das Wachstum wirbelloser Organismen hemmen, indem der auf ihm wachsende Biofilm eine schlechtere Nahrungsqualität (weniger Algen) aufweist als der auf natürlichen Oberflächen. Die Zusammensetzung bakterieller Gemeinschaften auf Plastikoberflächen wird dabei häufig durch den Standort und nicht durch das Plastikmaterial beeinflusst.

## Risiko für Umwelt und Organismen ist nicht eindeutig zu bewerten

» Eine allgemeingültige Risikobewertung und Vergleichbarkeit von Studien ist dadurch erschwert, dass chemisch-physikalische Eigenschaften der im Labor eingesetzten Partikel häufig nicht hinreichend beschrieben werden, und dass ausreichende bzw. repräsentative Zahlen zu Umweltkonzentrationen vieler Arten von Mikroplastik bisher weitgehend fehlen. Vergleichsversuche mit Kunststoff-Referenzpartikeln können dabei helfen, widersprüchliche Befunde aus ähnlichen Studien besser einzuschätzen und sinnvolle Positivkontrollen für Mikroplastik-Wirkungen zu definieren.

» Die Effekte des Mikroplastiks sind oft nicht eindeutig von den Schadeffekten anderer in der Umwelt befindlicher Partikel und (gelöster) Stoffe abzugrenzen und können zudem durch stärkere Effekte anderer Stressoren oder Umweltgifte überdeckt werden.

» Es ist noch nicht geklärt, ob Mikroplastik negative Wirkungen hat, die auf seine von den zahlreichen natürlichen Partikeln (z. B. Tonpartikel) abweichenden physikalischen und chemischen Eigenschaften zurückzuführen sind.

» Kleine Mikroplastik-Partikel können in der Natur in verschiedenen Zuständen vorliegen, zum Beispiel frei oder in Detritus und Aggregaten eingebaut. In welcher Größe und Form sie wirksam werden, kann deshalb nicht bewertet werden.

## Empfehlungen:

» Im Sinne des Vorsorgeprinzips ist die Politik dafür verantwortlich, eine Minimierung des Eintrags von Kunststoffen in die Umwelt zu erreichen, da Mikroplastik potenziell zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt führen kann.

» Um die Qualität ökotoxikologischer Studien mit Mikroplastik zu sichern, sind Minimalanforderungen für die Berichterstattung einzuhalten. Ein hierfür erstellter Leitfaden [1] soll z. B. auch

den Behörden helfen, die Qualität publizierter Studien besser einschätzen zu können und praktische Empfehlungen zu formulieren.

» Die Charakterisierung und Harmonisierung ökotoxikologischer Studien sollte weiter vorangetrieben werden und Vergleiche mit Auswirkungen anderer Partikel einschließen.

» In Experimenten zu den Effekten von Mikroplastik sind zur Kontrolle zusätzlich die Auswirkungen natürlicher organischer oder mineralischer Partikel zu analysieren.

» Für eine Risikobewertung von Mikroplastik sollte immer die Exposition berücksichtigt werden aufgrund des Zusammenhangs zwischen beobachteten Effekten und vorliegenden Umweltkonzentrationen.

» Als Basis für eine Risikobewertung sind Toxizitätsschwellenwerte für Mikroplastik-Partikel zu identifizieren.

### **Forschungsbedarf:**

» **Weitere Untersuchungen mit möglichst vielen umweltrelevanten Kunststoffen, unterschiedlichen Formen und gealterten Plastikpartikeln (u. a. Partikel aus der Umwelt) sind notwendig, um die natürlichen Bedingungen in der aquatischen und terrestrischen Umwelt in den Versuchen noch besser abzubilden.**

» **Für die Risikoabschätzung ist eine Weiterentwicklung der wirkungsbezogenen Analytik notwendig, welche sich daran orientieren sollte, ob für Mikroplastik-Partikel bei bestimmten Umweltkonzentrationen Schadwirkungen nachweisbar sind.**

» **Mikroplastik in den Größenklassen <10 Mikrometer bzw. <1 Mikrometer (Nanoplastik) weist eine erhöhte Membrangängigkeit, Oberflächenaktivität und somit eine potenziell erhöhte Toxizität auf und sollte stärker in den Fokus der Untersuchungen rücken.**



### **Autor:innen**

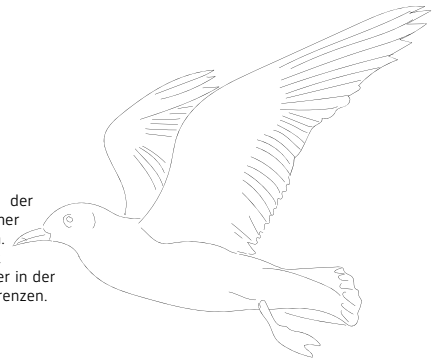
Katrin Wendt-Potthoff, Friederike Gabel, Sebastian Höss, Jürgen Geist, Ulrike Schulte-Oehlmann, Christian Laforsch, Sebastian Beggel

# Ist Mikroplastik schädlich?

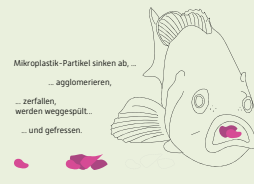
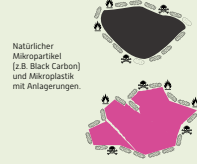
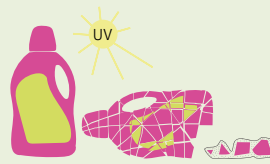
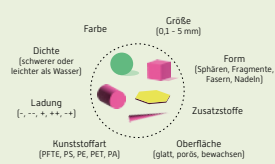
## Ökotoxikologische Bewertung von Mikroplastik in der Umwelt ist eine komplexe Aufgabe.

Ob Mikroplastik schädliche Auswirkungen auf Pflanzen und Tiere hat, lässt sich bisher nicht eindeutig nachweisen. Die unterschiedlichen Eigenschaften von Mikroplastik bestimmen, ob und wie das Mikroplastik von Lebewesen aufgenommen wird und ob es für diese schädlich ist.

Im Vergleich zu anderen Schadstoffen in der Umwelt (z. B. Pestizide) hat Mikroplastik daher keine einheitliche Wirkung auf die Lebewesen. Zudem sind die Effekte des Mikroplastiks oft nicht eindeutig von den Schadeffekten anderer in der Umwelt befindlicher Partikel und Stoffe abzugrenzen.



### Mikroplastik tritt in vielen Formen auf



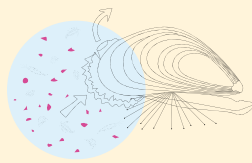
Mikroplastik-Partikel sind eine sehr heterogene Substanzklasse (Plastiktyp, Größe, Form, Zusatzstoffe etc.), die in vielfältigen Kombinationen von Merkmalen auftritt.

Formen und Eigenschaften von Mikroplastik-Partikeln verändern und erweitern sich in der Umwelt, z. B. durch Verwitterung und Biofilmbewuchs.

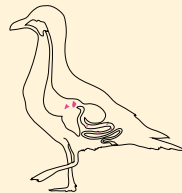
Mikroplastik bietet, wie natürliche Partikel auch, vielfältige Oberflächen für die Anlagerung von Schadstoffen und Krankheitserregern.

Die vielfältigen Mikroplastik-Partikel können sich in der Umwelt sehr unterschiedlich verhalten und von Organismen aufgenommen werden.

### Mikroplastik kann sehr unterschiedlich wirken



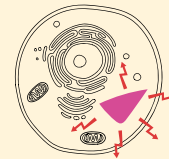
Wenn Lebewesen Mikroplastik mit ihrer Nahrung verwechseln, kann das zu Unterernährung führen. Mikroplastik kann auch im Nahrungsnetz weitergegeben werden.



Mikroplastikpartikel können im Darm von Lebewesen physikalische Verletzungen hervorrufen oder die Darmflora verändern.

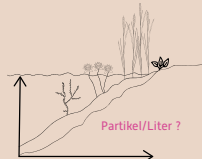


Nach Aufnahme des Mikroplastiks könnten sich im Körper giftige Additive wie z. B. Weichmacher oder Flammschutzmittel aus dem Kunststoff lösen.

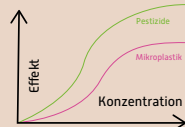


Kleinste Plastikpartikel können bis in die Gewebezellen eines Lebewesens vordringen, und dort beispielsweise entzündliche Reaktionen verursachen.

### Risiko für Umweltorganismen ist nicht eindeutig zu bewerten



Genaue Zahlen zu Umweltkonzentrationen von Mikroplastik gibt es kaum, was eine Risikobewertung auf Basis von Laborergebnissen erschwert.



In der Natur werden schwache Effekte des Mikroplastiks oft durch stärkere Effekte anderer Umweltgifte überdeckt.



Es ist noch nicht bekannt, ob die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Mikroplastik eine zusätzliche Belastung zum Effekt der zahlreichen natürlichen Partikel darstellen.



Bislang ist noch nicht geklärt, ob sich Mikroplastik im Nahrungsnetz anreichern kann und ob das langfristige Auswirkungen auf Organismen hat.

## Allgemeingültige Aussagen zur Schädlichkeit von Mikroplastik sind deshalb derzeit kaum möglich.



Diese Infografik entstand im BMBF-Forschungsschwerpunkt Plastik in der Umwelt: [www.bmbf-plastik.de](http://www.bmbf-plastik.de) | CC-BY 4.0 Ecologic Institut 2022

Inhaltliche Ausgestaltung: Katrin Wendt-Potthoff, Christian Laforst, Sebastian Höss, Hannes Schmitt, Sebastian Beggel

Konzept: Melanie Kemper, Design: Lena Aebli

# 03 Plastik im Abwasser: erfassen, untersuchen, entfernen



Kunststoffe gelangen häufig ins Abwasser – bestehend aus Schmutz-, Niederschlags- und Mischwasser, das insbesondere von Haushalten, Gewerbe und Industrie sowie von Verkehrsflächen abfließt – und können darüber in Gewässer eingetragen werden.

*[vgl. Kapitel 1].*

## Ergebnisse:

**Probennahme, Probenaufbereitung und Detektion von Kunststoffen** im Abwasser sind deutlich aufwändiger hinsichtlich Analysedauer als auch gerätetechnischer Ausstattung im Vergleich zu gebräuchlichen Untersuchungsparametern wie z. B. der Anzahl der Keime im Trinkwasser. Daher lagen zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch keine harmonisierten oder standardisierten Verfahren vor *[vgl. Kapitel 9]*. Aktuell lassen sich **Korrelationen** zwischen Kunststoffpartikelzahlen, -massengehalten und gebräuchlichen Abwasserparametern bisher nur in Einzelfällen darstellen.

» Da Kunststoffgehalte im **Abwasser** mit unterschiedlichen Verfahren ermittelt wurden, ist es notwendig, immer auch die Metadaten (Abwassercharakteristik, untersuchte Kunststoffe, Partikelgrößen sowie Verfahren der Probenahme, Probenaufbereitung und Detektion) heranzuziehen, um solche Messergebnisse zu vergleichen und zu bewerten. Die Erkenntnisse zu Kunststoffgehalten beruhen auf wenigen Studien mit einer begrenzten Anzahl von Messwerten, erlauben jedoch erste Trendaussagen.

» **In unbehandeltem Abwasser** konnten Fragmente von rund 150 verschiedenen Kunststoffprodukten und kunststoffhaltigen Verbundstoffen identifiziert werden, die sich dem Bereich **Makroplastik** (> 5 mm) und großes **Mikroplastik** (1–5 mm) zuordnen lassen. Insgesamt werden rund 500 bis 1.000 Partikel (> 1 mm) pro Einwohner:in und Jahr in das Abwasser eingetragen. [1]

» **Für kleines Mikroplastik** (< 1 mm) in unbehandeltem Abwasser liegen keine Angaben vor, da dieses nur mit sehr großem Aufwand zu bestimmen wäre. Ebenso können zur Menge der durch Kläranlagen ausgetragenen oder dort verbleibenden **Mikroplastik-Partikel** **< 10 Mikrometer** noch keine konkreten Aussagen getroffen werden. Untersuchungen in Laborkläranlagen zeigen jedoch, dass sich solche winzigen Kunststoffteile ebenfalls im Klärschlamm anreichern. [6]

» **In Kläranlagen (mechanisch-biologisch)** lassen sich Kunststoffpartikel und -teile größen-, form- und polymerabhängig aus dem Abwasser entfernen. Kunststoffpartikel werden dabei



zum größten Teil in der mechanischen Stufe (Rechen + Sandfang + Vorklärung) zurückgehalten. Die Partikel sammeln sich schließlich im Rechen- und Sandfanggut (vor allem Makroplastik) und im Klärschlamm (Mikroplastik). Aktuell werden über 95 % des Mikro- und Makroplastiks > 10 Mikrometer aus dem Abwasser entfernt. Allerdings werden nicht alle Niederschlags- und Mischwasserabflüsse durch Kläranlagen erfasst. Im Klarwasser verbleiben Mikroplastik-Konzentrationen von 0,00001 bis 0,1 Milligramm je Liter [2], [3] bzw. 10 bis 10.000 Mikroplastik-Partikeln je Kubikmeter (> 10 µm). [4–6] Mit Hilfe weiterer Verfahrenstechniken (z. B. nachgeschaltete Filteranlagen wie Sandfilter, Tuchfilter, Mikrosiebe oder Membranverfahren) kann der Mikroplastik-Rückhalt auf nahezu 100 % erhöht werden. Das entspricht einer Mikroplastik-Konzentration im Kläranlagenablauf in der Größenordnung von 0,0001 Milligramm je Liter bzw. 10 bis 100 Mikroplastik-Partikeln je Kubikmeter (> 10 µm). [2], [4–6]

» **Faserförmige Partikel** werden schlechter zurückgehalten als sphärische (kugelförmige).

» In Pilotversuchen mit **industriellem Abwasser** wurde eine Mikroplastik-Entfernung von ca. 60 % in Sedimentations- und 70 % in Flotationsstufen erzielt. Werden diese Fällungsverfahren mit der Zugabe spezieller Flockungsmittel kombiniert, können bis zu rund 99 % der Partikel entfernt werden. Ultrafiltrationsmembranen halten Mikroplastik > 1 Mikrometer sicher zurück (99,9 % Abscheideleistung). Auch großtechnische Vorbehandlungsstufen (Sandfiltrationen und Kammerfilterpressen) vor der Indirekteinleitung kunststoffbelasteten industriellen Abwassers zeigten bei Untersuchungen eine Entfernung von mehr als 99 %. [7]

» **Klärschlamm** ist die Senke für das in Kläranlagen entfernte Mikroplastik. In Primär-, Überschuss- und Faulschlämmen wurden Konzentrationen im Bereich von 1 bis 10 Gramm Mikroplastik je Kilogramm Trockenmasse [2], [5] bzw. Partikelanzahlen von 100 bis zu einer Million Mikroplastik-Partikeln je Kilogramm Trockenmasse [4] ermittelt. Bei der Klärschlammfaulung (anaerobe Stabilisierung) lassen sich

keine statistisch eindeutigen (negativen) Effekte auf den Abbauprozess und die Faulgasproduktion ermitteln. Bei der nachgängigen Faulschlammwässerung mit Zentrifugen und Kammerfilterpressen hängt die Verfrachtung von Mikroplastik-Partikeln maßgeblich von der Behandlung ab. Bis zu 30 % der Mikroplastik-Masse im Schlamm wird in das Schlammwasser verfrachtet. [2]

» **Bei bodenbezogener Klärschlammverwertung** (Verwendung als Dünger in der Landwirtschaft) werden Kunststoffpartikel in die Umwelt eingetragen *[vgl. Kapitel 1 und Kapitel 4]*. Aufgrund der Novellierung des Dünge- und Abfallrechts (insbesondere der Abfall- und Klärschlammverordnung von 2017) wird Klärschlamm künftig verstärkt **thermisch verwertet** (Verbrennung), sodass die mit bodenbezogener Klärschlammverwertung verbundenen Mikroplastik-Einträge abnehmen.

» **Abläufe aus kommunalen und industriellen Kläranlagen** spielen als Punktquelle für Mikroplastik-Emissionen > 10 Mikrometer in Gewässern eine untergeordnete Rolle. Man nimmt an, dass **Mischwasserabschläge** (aus der Mischkanalisation) und **Niederschlagswassereinleitungen** (aus der Trennkanalisation) sowie direkte Niederschlagswasserabflüsse von Verkehrsflächen wesentliche Eintragsquellen in die aquatische Umwelt darstellen *[vgl. Kapitel 1]*.

» **Maßnahmen zur Reduktion von Kunststoffemissionen in der Siedlungswasserwirtschaft** sind mit hohem technischen und wirtschaftlichen Aufwand verbunden. Als End-of-Pipe-Lösung können sie Maßnahmen, die an der Produktion und Nutzung der Kunststoffprodukte ansetzen, deshalb nur flankieren.

### Empfehlungen:

» Für die bessere Vergleichbarkeit der Messergebnisse müssen **Methoden für die Probenahme und die Detektion** von Wasser-, Abwasser- und Feststoffproben (Klärschlämme) insbesondere mit komplexer Matrix weiter harmonisiert werden.

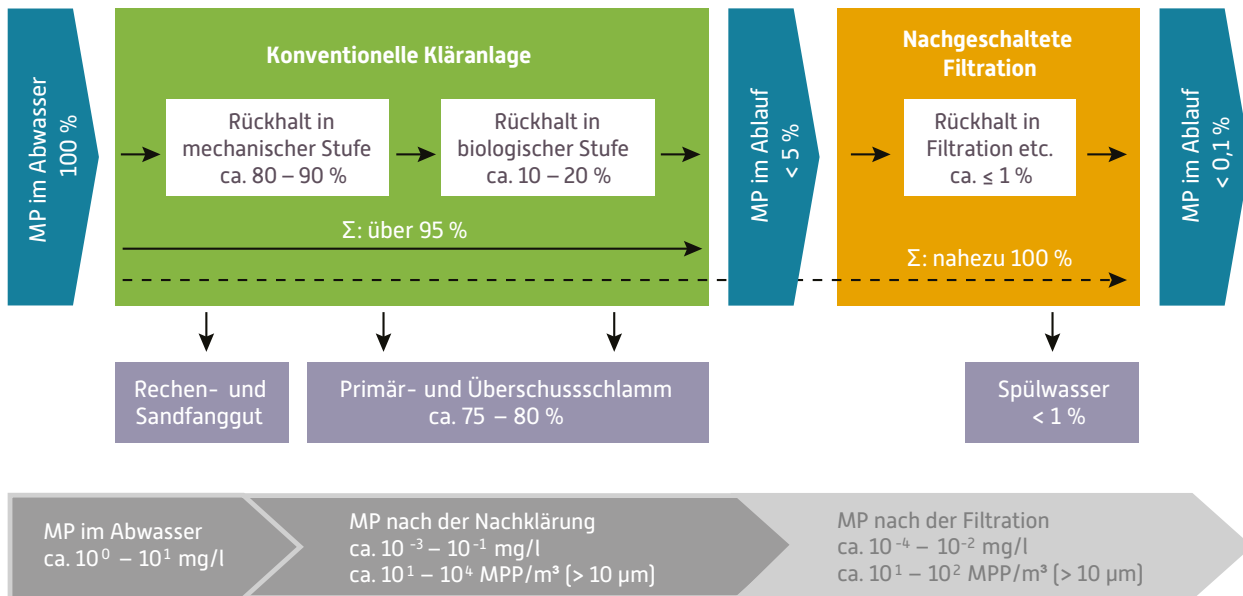


Abb.: Überschlägige Bilanzierung der Mikroplastik-Frachten (> 10 µm) in Kläranlagen

» **Industrielle Mikroplastik-Emissionen** über den Wasserpfad sollten zusätzlich durch innerbetriebliche Vermeidungsmaßnahmen reduziert werden.

» **Die bodenbezogene Verwertung** des Klärschlammes ist weiter zu minimieren.

» Eine Reduzierung der **Kunststoffemissionen bei Niederschlagswassereinleitungen und Mischwasserabschlägen** ist anzustreben, um unkontrollierte Emissionen in Gewässer zu verringern.

» **Für eine übergeordnete Modellierung und Bilanzierung** der Einträge von Kunststoffpartikeln über die Siedlungswasserwirtschaft sowie

der Effektivität einzelner Maßnahmen müssen weitere belastbare Daten erhoben werden. Insbesondere für die Bewertung der Kunststoffemissionen aus Kläranlagen sowie durch Niederschlagswassereinleitungen und Mischwasserabschläge sind **weitergehende Messungen** erforderlich. Gleiches gilt für Eliminationsraten einzelner Maßnahmen. Hierbei wären sowohl Massenkonzentrationen, Partikelanzahlen als auch die Verteilung der Kunststoffe für verschiedene Größenklassen zu berücksichtigen.

### Forschungsbedarf:

» **Welche Kunststoffmengen werden über Niederschlagswassereinleitungen und Mischwasserabschläge in die Gewässer eingetragen? Welche Maßnahmen sind geeignet, um sie möglichst effizient zu verringern?**

» **In welchem Umfang werden Kunststoffpartikel <10 Mikrometer einschließlich Nanoplastik-Partikeln in Kläranlagen durch die existierenden Behandlungsverfahren zurückgehalten oder müssten diese bestehenden Verfahren optimiert werden?**

» **Wie sieht die Gesamtbilanz der Kunstoffeinträge über die verschiedenen Eintragspfade im Abwasser aus und welche Daten werden dafür benötigt?**

### Autor:innen

» **Redaktion:** Katrin Bauerfeld, Tim Fuhrmann

» **Beiträge:** Claus Gerhard Bannick, Matthias Barjenbruch, Luisa Barkmann, Steffen Krause, Marco Kunaschk, Marco Breitbarth, Christian Schaum, Christian Scheid, Felix Weber, Katharina Wörle, Jutta Kerpen, Natalie Wick, Attallah Abusafia

# 04 Plastik in Böden: Einträge, Verhalten und Verbleib

Neben den Meeren sind auch Böden bedeutende Senken von Kunststoffen<sup>1</sup>, die über verschiedene Pfade in Böden eingetragen werden, beispielsweise über landwirtschaftliche Praktiken. Einträge, die für Böden relevant sind:

- » Verwendung von Sekundärdünger (z. B. Komposte, Gärückstände, Klärschlämme),
- » Alterung bewusst eingebrachter Kunststoffe (z. B. Pflanzhilfen, Folien, Dränagen),
- » Einsatz polymerer Hilfsstoffe (z. B. Verkapselung von Düngemitteln, Saatgut oder Bodenverbesserer),
- » Einträge über Littering/Vermüllungsschwerpunkte,
- » Einträge entlang von Straßen (v. a. Reifenabrieb),
- » Atmosphärische Einträge aus unterschiedlichsten Quellen.

Die Kunststoffe werden dabei entweder direkt als Mikroplastik eingetragen oder Plastikteile zerfallen mit der Zeit durch Verwitterung, Abrasion und Fragmentierung.

## Analytik

### Ergebnisse:

» Bei der Analytik müssen die Probennahme und -aufbereitung an die zu untersuchenden Feststoffe angepasst werden. Im Bereich der Probenaufbereitung konnte ein enzymatisch-oxidatives Verfahren für die Anwendung auf Bodenproben zur spektroskopischen Analyse erfolgreich weiterentwickelt werden. [1]

» Eine repräsentative Probenmenge ist durch die Größe des zu untersuchenden Kunststoffs in Verbindung mit dessen Häufigkeit bestimmt. Da kleine Partikel sehr viel häufiger in der Umwelt vorkommen, gilt generell: Je größer der Partikel, desto mehr Probe wird benötigt. [1] Die möglichen, verwendbaren Detektionsverfahren unterscheiden sich grundsätzlich nicht von denen für Gewässerproben *[vgl. Kapitel 9]*.

» Im Bereich der Sekundärdünger wie Kompost, Gärreste und Klärschlämme sind die bisher vorgeschriebenen Probennahmen zu

selten (1 Probe/1.000 Tonnen). Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass die Absenkung der Trenngrenze von 2 Millimeter auf 1 Millimeter in der Düngemittelverordnung (DüMV, 2019) nicht ausreichend validiert ist. Bei Wiederholungsuntersuchungen mit einem Liter Untersuchungsvolumen zeigten sich bei der 1 Millimeter-Trenngrenze deutlich größere Varianzen bei den Kunststoffunden. Die visuelle Bestimmung von Partikeln größer 1 Millimeter ist nach bisherigen Erkenntnissen nicht repräsentativ für die Bestimmung von Kunststoffen in Komposten, und eine Berücksichtigung der Feinfraktion dringend erforderlich.

### Empfehlungen:

» Die EU-Düngemittelverordnung umfasst Anforderungen zur Bestimmung der Kunststoffgesamtgehalte in Komposten, welche auf die

<sup>1</sup> Wenn von Kunststoff oder Plastik die Rede ist, ist i. d. R. Makro- und Mikroplastik gemeint. Es sei denn, es ist explizit anders benannt.

Fraktion kleiner 2 Millimeter ausgeweitet werden sollte. Komplementär sind für die nationale Bioabfallverordnung auch Kunststoffgesamtgehalte der Fraktion kleiner 1 Millimeter zu bestimmen.

» Die Mikroplastik-Analyse sollte neben der Massenkonzentration stets auch die Partikelgrößenverteilung einschließen. Bei diesen Untersuchungen sind zeit- und kosteneffiziente Extraktions- und Analysemethoden einzusetzen.

### **Forschungsbedarf:**

» **Inwiefern müssen die Probennahme, Aufbereitungs- und Detektionsverfahren für Böden zur Einordnung der Mikroplastik-Belastung weiterentwickelt werden, um zu einer Harmonisierung und Standardisierung zu gelangen?**



## **Bilanzierung**

### **Ergebnisse:**

» Die Schätzung der räumlichen Verteilung von Mikroplastik-Einträgen aus den potenziell wichtigsten Quellen in der Landwirtschaft bundesweit und für zwei Flusseinzugsgebiete ergab eine deutliche räumliche Variabilität. Dies lässt darauf schließen, dass regionale Agrarstrukturen einen erheblichen Einfluss auf die Verteilung der Belastungsschwerpunkte haben.

» In allen Proben, auf allen Flächen – mit oder ohne Klärschlammausbringung – wurde Mikroplastik nachgewiesen. Das weist auf eine ubiquitäre Kontamination hin, die Quellen bleiben jedoch teilweise unklar. Wird **Klärschlamm** als Sekundärrohstoffdünger genutzt, kann bei der Abwasserbehandlung entferntes Mikroplastik auf landwirtschaftlich genutzte Flächen gelangen *[vgl. Kapitel 1 und Kapitel 3]*.

» Bei Starkregenereignissen kann es zur Erosion von mit Klärschlamm gedüngten Feldern kommen, wodurch Mikroplastik in angrenzende Gewässer transportiert wird *[vgl. Kapitel 1]*. Modellierungen solcher Ereignisse haben jährliche Einträge in derselben Größenordnung wie die ebenfalls simulierten Einträge aus gereinigtem Abwasser von Kläranlagen gezeigt *[vgl. Kapitel 3]*. Zudem wurde in wiederholten Freiland-Beregnungsversuchen nachgewiesen, dass Mikroplastik vor allem durch den Oberflächenabfluss ausgetragen wird.

» Trotz dieser ersten Daten ist die Datengrundlage zur Bewertung von Mikroplastik in Böden und deren Emissionen in Gewässer insgesamt immer noch unzureichend.

### **Empfehlungen:**

» Bei der Entwicklung von Monitoring-Vorhaben und daraus resultierenden Modellrechnungen müssen insbesondere regionale und kulturbedingte Mikroplastik-Belastungsschwerpunkte Berücksichtigung finden: landwirtschaftliche Praktiken (Mulchfolien etc.)



und damit verbundene Einträge, Düngung mit Klärschlamm oder Komposten, Vermüllungsschwerpunkte, Einträge über die Atmosphäre oder Abschwemmung von versiegelten Flächen, etwa Straßenabflüsse.

### **Forschungsbedarf:**

» **Wie und in welchen Mengen akkumuliert Plastik in Böden und wird in Gewässer ausgebracht? Welches Alterungs- und Abbauverhalten weisen Kunststoffe in Böden auf?**

## **Wirkungen auf Boden und Organismen**

### **Ergebnisse:**

» Kunststoffe werden durch biologische und physikochemische Prozesse in die Bodenstruktur eingeschlossen und reichern sich an. Durch Erosion kann Mikroplastik abhängig von der Bodenstruktur in Gewässer transportiert werden.

» Die Aufnahme von Mikroplastik durch die Bodenfauna ist weitestgehend belegt. Bei einigen wichtigen Organismengruppen führen Konzentrationen, wie sie in stark kontaminierten Böden vorkommen, zu gesundheitlichen Schäden, was eine Einschränkung ihrer Funktion im Bodenökosystem nach sich ziehen kann. Diese Wirkung scheint bei kleinen Partikeln (<100 µm) deutlich stärker zu sein als bei größerem Mikroplastik.

### **Empfehlungen:**

» Da bei sinkender Partikelgröße die Schadwirkung von Mikroplastik steigt und somit insbesondere die Feinfraktion das Potenzial hat, Bodenleben zu stören und Bodenfunktionen zu beeinträchtigen, sollten solche Entwicklungen mittels Monitoring überwacht werden. Dabei sind neben der Menge an Mikroplastik auch der Zustand des Bodenlebens inklusive des Bodenmikrobioms zu berücksichtigen.

### **Forschungsbedarf:**

**Welche langfristigen Einflüsse hat Mikroplastik in geringen Konzentrationen (wie sie z. B. in Ackerböden vorkommen) auf Bodenorganismen, Bodenleben und Bodenfunktionen?**



## Verbleib / Bioabbaubarkeit

### Ergebnisse:

» Konventionelle Kunststoffe wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyethylenterephthalat (PET) und Polystyrol (PS) gelten prinzipiell als nicht abbaubar. [2] Die bisher bekannten Abbauprozesse durch Mikroorganismen sind zu ineffizient, um von einem tatsächlichen biologischen Abbau sprechen zu können.

» Die potenzielle Abbaubarkeit sogenannter biologisch abbaubarer Kunststoffe in industriellen Behandlungs-Anlagen oder Umweltmedien (z. B. Böden) wird in Normen beschrieben, die eine biologische Abbaubarkeit auf Basis von Laborversuchen einordnen. Diese Normen beziehen sich stets auf sehr definierte Bedingungen (u. a. Temperatur, Dimension des Materials, mit dem geprüft wird [„Prüfkörper“]), die für die Umwelt oder in technischen Vergärungs- oder Kompostierungsanlagen häufig nicht realistisch sind. Der Abbau in Böden verläuft je nach Standortbedingungen deutlich langsamer als in standardisierten Laborversuchen.

Die Polymere Polybutylensuccinat (PBS), Polylactide (PLA), Polybutylenadipat-tereph-

thalat (PBAT), Polyhydroxyalkanoate (PHA), Polybutylensuccinat-co-adipat (PBSA) sowie Lignin, Cellulose (Acetate) und Stärke sind auf Basis von Laborversuchen als biologisch abbaubar für industrielle Anlagen zertifiziert. In der Umwelt, das heißt im Boden und im Wasser (Meer oder Süßwasser), bauen aber vorwiegend Cellulose, PHA und Stärke in kurzen Zeiträumen vollständig ab.

### Forschungsbedarf:

» **Wie können Versuchsansätze zum biologischen Abbau unter Realbedingungen (auch für die Normung) aussehen?**

### **Autor:innen**

Claus Gerhard Bannick, Katrin Bauerfeld, Marius Bednarz, Jürgen Bertling, Ulrike Braun, Frederick Büks, Georg Dierkes, Peter Fiener, Natalia Ivleva, Jörg Klasmeier, Marc Kreuzbruck, Matthias Labrenz, Christian Laforsch, Martin Löder, Bodo Philipp, Julia Resch, Peter Schweyen

# 05 Unternehmen müssen mehr Verantwortung übernehmen



Unternehmen kommt in Bezug auf die Nutzung von Kunststoffen und deren Eintrag in die Umwelt eine zentrale Bedeutung zu, denn die Unternehmen

- » erzeugen/verarbeiten Kunststoff-Pellets weiter (einschließlich Recycling),
- » transportieren und handeln mit diesen,
- » stellen kunststoffhaltige Produkte und Verpackungen her,
- » transportieren und verkaufen diese,
- » betreiben Handel und Zwischenhandel mit kunststoffhaltigen Produkten und Verpackungen,
- » verarbeiten kunststoffhaltige Produkte und Verpackungen oder
- » entsorgen diese.

## Ergebnisse:

» Kunststoffe gelangen bei Herstellung, Transport und Verarbeitung von Kunststoff-Pellets trotz Maßnahmen der Branchenverbände in einem erheblichen Umfang in die Umwelt; auch wenn die Pellets als Endprodukte genutzt werden. [1] Dementsprechend tragen Unternehmen ebenso wie private Verbraucher:innen dazu bei, dass Kunststoffprodukte [vermeidbar oder unvermeidbar] in die Umwelt gelangen [vgl. Kapitel 8]. Zudem wird Mikroplastik über

industrielle Abwässer und Regenwasser der Kunststoff produzierenden und verarbeitenden Industrie und bei Logistikprozessen in die Umwelt eingetragen [vgl. auch Kapitel 1].

» Verarbeiter von Kunststoff-Pellets (Compounder) bestimmen u. a. über die zugesetzten Additive und damit indirekt auch darüber, wie schädlich die Kunststoffe für die Umwelt sein können.

- » Unternehmen treffen Entscheidungen, wie und aus welchen Materialien sie ihre Produkte herstellen und prägen durch Produktdesign und -gestaltung entscheidend, inwieweit Kunststoffe bei der Nutzung und Verwendung ganz oder in Teilen in die Umwelt gelangen können.
- » Der Handel als „Gatekeeper“ kann durch seine Sortimentspolitik Einfluss auf das Angebot nehmen wie unter anderem den Anteil von kunststoffhaltigen Produkten und deren Verpackungen.
- » Textilien aus rein synthetischen oder bio-basierten, synthetischen Fasern werden durch Verarbeitung, Transport, Gebrauch und Pflege zu einer Quelle von sekundärem, faserförmigem Mikroplastik.
- » Der neu entwickelte Plastik-Index (PLIX) ermöglicht eine vergleichende ökobilanzielle Bewertung von Produkten und Technologien. Dadurch können kunststoffhaltige Produkte und Verpackungen hinsichtlich der besonders relevanten ökologischen Kriterien CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, Plastik-Masse und Rezyklierbarkeit bewertet werden.
- » Die derzeit bestehenden Maßnahmen, um Kunststoffeinträge der Industrie zu verringern, sind nicht ausreichend *[vgl. Kapitel 10]*:



- Die bisherigen rechtlichen Regelungen (u. a. EU-Einwegkunststoffrichtlinie) erfassen nicht alle relevanten kunststoffhaltigen Produkt- und Verpackungsarten, die ganz oder in Teilen in die Umwelt eingetragen werden *[vgl. Kapitel 10]*.
- Die Herstellerverantwortung wie sie in der EU-Einwegkunststoffrichtlinie geregelt ist, bezieht sich auf nur wenige Produkte und geht fälschlicherweise davon aus, dass die Einträge aus der Umwelt zurückgeholt werden können.
- Die sehr niedrigen Preise für Einweglösungen und Primärkunststoff sowie der erhöhte Kostenaufwand für Mehrweglösungen erschweren eine Substitution dieser Materialien.
- Eine Fokussierung auf technologische Lösungen zu einzelnen Eintragspfaden (z. B. Kläranlagen, Waschmaschinen) ist angesichts der Vielzahl von Einträgen und der globalen Verbreitung nicht ausreichend.
- Selbstverpflichtungen der Kunststoffverbände sind nicht genügend wirksam (siehe das Beispiel Kunststoff-Pellets).

### Empfehlungen:

- » Es sind umfassende Ansätze notwendig, deren zentrale Akteure die Unternehmen sind. Im Sinne der Abfallhierarchie ist dabei auch bei der Vermeidung kunststoffhaltiger Produkte anzusetzen.
- » Insbesondere Produkte, deren sachgemäße Nutzung zu ihrem Kontakt mit oder Verbleib in der Umwelt führt, sollten unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten durch Produkte ohne Kunststoff ersetzt werden. Für die Einmalprodukte, für die es schon einen kunststofffreien Ersatz gibt, sollte die Nutzung dieser Alternative gestärkt werden.
- » Bei Produkten/Verpackungen, in denen Kunststoffe für die Funktion unabdingbar (etwa bei bestimmten Medizinprodukten) oder ökologisch sinnvoll sind (etwa bei bestimmten Ge-



brauchsgütern und/oder einigen [wiederverwendbaren] Verpackungen), sind folgende Aspekte zu beachten:

- Kunststoffhaltige Produkte und Verpackungen sollten verpflichtend so gestaltet werden, dass sich keine Teile bzw. Bestandteile ablösen können. Sie sollten außerdem Hinweise zur ordnungsgemäßen Entsorgung der Materialien enthalten.
  - Produkte und Verpackungen sind recycelbar zu gestalten, damit sie dem inländischen Recycling zugeführt werden und sich der Materialverbrauch verringert.
  - Bei Verpackungen sind regulatorische Maßnahmen zur stärkeren Standardisierung von Einheitsformen für unterschiedliche Mehrweg-Gebindegrößen und Einsatzbereiche erforderlich *[vgl. Kapitel 10]*.
  - Hersteller sollten zu einer transparenten Deklaration von Additiven, Hilfsstoffen und sonstiger Substanzen ihrer Produkte verpflichtet werden und ausschließlich unbedenkliche Zusatzstoffe (gem. REACH-Verordnung) verwenden.
  - Kunststoffhaltige Produkte und Verpackungen sollten Hinweise zur ordnungsgemäßen Entsorgung der Materialien enthalten.
- » Emissionen über industrielle Abwässer können durch eine Kombination aus innerbetrieblichen Vermeidungsmaßnahmen (keine direkte Einleitung) und angepassten Reinigungstechnologien effektiv reduziert werden.
- » Bei Textilien aus synthetischen Fasern müssen alle Stufen der Verarbeitung einer Optimierung unterzogen werden. Faserabrieb, Faserbruch und Faserflug durch offene Schnittstellen sind durch Auswahl hochwertiger Faserstoffe und Fertigungsverfahren zu minimieren.
- » Die Vorreinigung von Textilien vor dem Inverkehrbringen ist zu empfehlen, um überschüssige Fasern zu entfernen. Sie darf jedoch nur dort stattfinden, wo eine ausreichende Abwasserreinigung entsprechend westeuropäi-

scher Standards vorliegt, damit die Fasern dann auch zurückgehalten werden.

- » Bei der Gestaltung und Umsetzung von Innovationen ist stets die gesamte Wertschöpfungskette zu berücksichtigen, um zu gewährleisten, dass (ökobilanzielle) Vorteile an der einen Stelle (z. B. Produktverpackung) nicht zu Nachteilen anderswo (z. B. Transportverpackung) führen. [2]
- » Ein Plastikemissionsbudget – ähnlich dem 1,5° Grad-Ziel im Klimabereich – könnte auf nationaler oder EU-Ebene eingeführt werden. Es ergibt sich aus dem Gehalt in der Umwelt und der natürlichen Abbauleistung. Da die Mengen in der Umwelt bislang nur vage bekannt sind, ist auch das Plastikemissionsbudget noch nicht sicher zu bestimmen. Es muss zwar noch weiter entwickelt werden, könnte aber bei offizieller Einführung zukünftig als Referenzmaßstab dienen.

### **Forschungsbedarf:**

- » **In welchem Umfang kann die Produktverantwortung der Produzenten und des Handels zur Reduzierung des Litterings beitragen?**
- » **Wie könnten vereinfachte Modelle aussehen, um schädliche Kunststoffemissionen in der Umwelt sowie Abbaugeschwindigkeiten in Ökobilanzen zu berücksichtigen?**
- » **Wie können Produkte mit einem reduzierten Mikroplastikgehalt bzw. -ausstoß entwickelt und designt werden?**

### **Autor:innen**

Jürgen Bertling, Carola Bick, Marco Breitbarth, Maria Daskalakis, Thomas Decker, Andreas Detzel, Julia Koch, Manuel Lorenz, Maike Rabe, Frieder Rubik, Gerhard Schewe, Stefan Schweiger

# 06 Noch nicht ausreichend effizient: Abfallwirtschaft und Recycling



Eine echte Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe ist entscheidend, um nicht nur die Belastung der Umwelt durch Kunststoffe zu reduzieren, sondern auch fossile Rohstoffe einzusparen. Damit dies gelingt, kommt dem Zusammenwirken von Kunststoffabfallsammlung, -sortierung und -recycling eine große Bedeutung zu.

## **Ergebnisse:**

» Einträge von Kunststoffen in die Umwelt bei der Abfallsammlung entstehen einerseits bei der haushaltsnahen Leichtverpackungs-Sammlung über „gelbe Säcke“ und andererseits beim Bereitstellen und Leeren von Restmülltonnen. Weitere Emissionsquellen sind Depotsammelstellen und öffentliche Abfallsammelbehälter.

» Werden Kunststoffprodukte entsorgt oder dem Wirtschaftskreislauf wieder zugeführt, kann es durch fehlerhafte Handhabungen ebenfalls zu Einträgen in die Umwelt oder zu schlechter Rezyklierfähigkeit kommen.

» Der derzeitige Stand der Sortiertechnik weist noch erhebliche Defizite bei der Unterscheidung von Lebensmittel- und Nicht-Lebensmittelverpackungen, von Ein- und Mehrschichtfolien sowie bei der Abtrennung von Stoff-Unterklassen wie z. B. PET-Schalen und PET-Flaschen auf. Für eine effizientere Auf-

bereitung und hochwertige Wiederverwertung sind jedoch sortenreine und sinnvoll spezifizierte Fraktionen nötig. Dies gilt für Kunststoffverpackungen, aber auch für andere Gegenstände aus Kunststoff (z. B. Automobile, Textilien und weiße Ware, wie z. B. Kühlschränke).

» Vor allem die Sortier- und Recyclingfähigkeit haben eine große Bedeutung bei der ökologischen Bewertung verschiedener Verpackungsalternativen. Schwer trennbare Materialgemische sind prinzipiell technisch recycelbar, aber der Aufwand dafür ist aktuell noch zu hoch.

» Durch Tracer-Based-Sorting können Etiketten, Bedruckungen und Materialien wie Kunststoffe direkt mit einem werkstoffunabhängigen Erkennungsmerkmal (z. B. Fluoreszenz-Tracer) ausgestattet werden, um die Sortierung von Abfall zu verbessern. Die Detektion der Tracer funktioniert unabhängig von Form, Gestaltung, Deformation und Bewegung der markierten Objekte. Somit könn-

ten zum Beispiel auch kleine, nicht bedruckte, schwarze, flexible und Mehrschicht-Verpackungen mit hoher Verlässlichkeit detektiert und einem Recycling zugeführt werden. Der Tracer-Einsatz erweist sich bei ökobilanzieller Bewertung im Vergleich zum derzeitigen Verpackungsrecycling als vorteilhaft für die Umwelt. [1]

» Moderne chemische Recyclingverfahren können als Ergänzung bereits etablierter Recyclingverfahren zu höheren Recyclingquoten beitragen. Insbesondere die Nutzung komplexer Abfallströme, die bislang nur thermisch verwertet wurden, hilft bei der Erschließung wertvoller Ressourcen.

» Die revolPET®-Technologie ermöglicht die Verwertung PET-haltiger Abfallströme, die derzeit nicht werkstofflich aufbereitet werden können (komplexe Verbünde und Gemische). PET wird selektiv depolymerisiert und die so gewonnenen Monomere besitzen die gleiche Qualität wie Neuware aus fossilen Quellen und lassen sich erneut zu PET polymerisieren. Andere Werkstoffe wie z. B. PE, PP oder PA passieren den Prozess unverändert und können weiteren Recyclingverfahren zugeführt werden.

» Polystyrol (PS) kann mittels eines Depolymerisations-Verfahrens aus PS-Abfallströmen sinnvoll recycelt werden. Dieser Prozess zur Erzeugung von Styrol für die anschließende, erneute Polymerisation zu Polystyrol bietet ökologische und ökonomische Vorteile.

» Erste Ökobilanzen der entwickelten Recyclingprozesse haben gezeigt, dass gegenüber den konventionellen Produktionsrouten von Monomeren aus fossilen Rohstoffen die innovativen Recyclingtechnologien einen verringerten Energiebedarf aufweisen und aus ihnen weniger CO<sub>2</sub>-Emissionsäquivalente resultieren; auch der Verbrauch an Wasser und fossilen Rohstoffen ist geringer. [2]

» Ein neues Konzept einer schiffsgestützten Recyclinganlage von z. B. 64.000 Tonnen pro Jahr gemischten Kunststoffabfällen wurde entwickelt. Dieses Konzept trüge sich finanziell aus den Erlösen der erzeugten Rezyklate.

Durch den Ankauf von Kunststoffabfällen, die hafennahe Vorsortierung und die maritime Recyclinganlage würden ca. 1.500 Arbeitsplätze und zusätzliche Wertschöpfung z. B. im westlichen Afrika entstehen. [3]

## Empfehlungen:

» Die Abfallsammlung in Deutschland bedarf einer innovativen konzeptionellen und technologischen Weiterentwicklung, um die Sammelqualitäten zu optimieren und Verluste in die Umwelt zu reduzieren. Beispiele hierfür sind eine Ausweitung von Getrenntsammlensystemen für besonders hochwertige Kunststoffe, gegebenenfalls unter Anwendung von Pfandsystemen, die Umstellung von einer Sack- auf eine Tonnensammlung bei der haushaltsnahen Leichtverpackungs-Sammlung und sensorgestützte Kontrollmechanismen im Sammelprozess zur Reduzierung von Fehlwürfen beispielsweise in der Biomüllsammlung.

» Da rein organisatorische Maßnahmen (z. B. Tonne statt Sack) und eine marginale Weiterentwicklung bestehender Technologien (z. B. Nahinfrarot-Sortiertechnik) nicht ausreichen, um beim Verpackungsrecycling die tatsächliche Recyclingquote substanziell zu erhöhen, müssen alle Stakeholder in der Wertschöpfungskette echte Innovationen umsetzen und aufeinander abstimmen: Design-for-Recycling, konsequente Sammlung, präzise Sortierung in alle zu unterscheidenden Fraktionen sowie innovative, CO<sub>2</sub>-effiziente Aufbereitungstechnologien.

» Tracer-Based-Sorting bietet eine komplette technische Lösung für eine wesentlich bessere Sortierung aller Kunststoffe und sollte daher breiter eingesetzt werden.

» Die technischen und ökologischen Vorteile sowohl des revolPET®- als auch des ResolVe-Verfahrens sprechen für eine gesetzliche Anerkennung des chemischen Recyclings zur Erfüllung der Recyclingquoten des Verpackungsgesetzes. [4, 5, 6]

» Die Umsetzung neuer Recycling-Technologien muss die gesamte Wertschöpfungskette



von der Materialentwicklung über die Inverkehrbringer bis hin zur Entsorgungswirtschaft einbeziehen. Flankierende technische und rechtliche Regelungen sollten den Markteintritt innovativer Verfahren unterstützen.

» Der gesellschaftliche und rechtliche Druck, weniger Abfallexporte zuzulassen, macht es erforderlich, eine werthaltige Kreislaufwirtschaft zu schaffen und entsprechende Technologien zu nutzen. Kunststoffabfallexporte müssen weitestgehend unterbunden werden, indem man Recyclingkapazitäten für ein technisch hochwertiges und effizientes Recycling in den europäischen Erzeugerländern aufbaut. So lassen sich Einträge in die Umwelt über Sekundärländer mit schlechten Abfallwirtschaftssystemen und Recyclingstrukturen verringern.

» Auch wenn Recycling nicht direkt Kunstoffeinträge in die Umwelt reduziert, verknüpfen Verbraucher:innen mit dem Recycling von Kunststoffen eine höhere Wertigkeit dieses Werkstoffs. Diese veränderte Wahrnehmung kann dazu beitragen, das achtlose Wegwerfen und Liegenlassen von Plastikmüll zu reduzieren. Gleichzeitig kann hochwertiges Recycling dazu beitragen, dass weniger Primärrohstoffe für die Kunststoffproduktion verbraucht werden.

### **Forschungsbedarf:**

» **Verbesserung der Datenlage für die Lebenszyklusanalyse zur Abbildung der Wertschöpfungsketten in der Kreislaufwirtschaft und bestehender Recyclingverfahren.**

» **Schließen von Datenlücken wie v. a. Berücksichtigung des Technologiereifegrads, Integration in eine bestehende Standortinfrastruktur und Optimierungsgrad im Vergleich zu etablierten Produktionstechnologien.**

» **Förderung von Pilot-Anlagen im Industriemaßstab, um Innovationen, technische Performance und Wirtschaftlichkeit zu demonstrieren und die Datenlage zu erweitern sowie die Durchsetzungsfähigkeit am Markt zu steigern.**

### **Autor:innen**

Marco Breitbarth, Carsten Eichert, Jochen Moesslein, Fridtjof Rohde, Bianca Wilhelmus

# 07 Wie Kommunen zu weniger Kunststoffemissionen beitragen können



Kommunen sind die den Bürger:innen nahestehendste staatliche Ebene. Sie können damit am besten staatliches Handeln vermitteln sowie Impulse aufgreifen, setzen und weitergeben. Eine Reihe von Kommunen in Deutschland hat bereits eigene Strategien zur Vermeidung von Kunststoffabfällen erarbeitet und greift darin Impulse der Zero-Waste- oder Circular-Cities-Initiativen auf. Einige Kommunen deklarieren sich auch offiziell als Zero-Waste-Kommune.

Kommunen sind folglich sowohl Handelnde, die Vorgaben weitergeben und auf ihre Umsetzung achten, als auch Betroffene, die als Entsorgungsträger, Nachfrager und Verbraucher von Kunststoffen, als Betreiber öffentlicher Einrichtungen wie auch als Veranstalter verschiedenster Events, Märkte etc. im Stadtraum selbst gefragt sind, ihr Handeln anzupassen und noch nachhaltiger zu gestalten.

## **Ergebnisse:**

» In Kommunen gibt es zahlreiche Quellen von Kunststoffemissionen. Wesentliche Faktoren, die einen Einfluss auf die Intensität des (Kunststoff-) Abfallaufkommens im öffentlichen Raum haben, sind dabei (i) die Ausprägungen der Bebauungsstrukturen samt Nutzungsarten und -intensitäten, (ii) wirtschaftliche Strukturen von Industrie, Gewerbe und Gastronomie sowie (iii) kommunale Strukturen beispielsweise im Hinblick auf das Stadtmobilien (Haltestellen, etc.), die Art der Abfall-

sammlung und die Straßenreinigung. Hinzu kommen temporäre Quellen wie kommunal-spezifische Veranstaltungen (Weihnachtsmärkte, Karnevalsumzüge, Volksfeste, etc.), Silvesterfeuerwerk und Baustellen.

» Kommunen sind von Kunststoffemissionen im öffentlichen Raum vor allem durch Littering betroffen. Die relevantesten Kunststoffe sind dabei Verpackungen und Zigarettenkippen, die jeweils ein Drittel der Makrokunststoffe aus-

machen, sowie Baustoffe – insbesondere Polystyrol-Schaumstoff – welche für durchschnittlich 50 % des großen Mikroplastiks (1-5 mm) verantwortlich sind. Allein die Reinigungskosten für die Sammlung und Entsorgung gelitterter Einwegkunststoffe, die von der EU-Einwegkunststoffrichtlinie erfasst sind, betragen in Deutschland jährlich fast 760 Millionen Euro. [1]

» Kommunen können unmittelbar Maßnahmen ergreifen, bevor überhaupt Kunststoffabfall oder Littering entsteht und Probleme verursacht. Damit lassen sich Kosten für Entsorgung und Reinigung einsparen und Einträge in das Abwasser und die Umwelt vermeiden.

» Reifenabrieb ist eine der größten Quellen von kleinem Mikroplastik (< 1 mm) [vgl. Kapitel 1]. Auf innerstädtischen Straßen sammeln sich Feststoffe und Reifenabrieb vor allem im Bereich von 1,6 Meter vom Bordstein an. Hotspots für den Reifenabrieb sind Kurven, Ampeln und andere Lichtsignalanlagen. Um passgenaue Maßnahmen zur Reduktion des Eintrags von Reifenabrieb in die Umwelt einzusetzen, wurde der Prototyp eines digitalen GIS-basierten Planungs- und Entscheidungsinstrumentes entwickelt. Es ermöglicht die Erstellung von Potenzial-/Hotspotkarten und unterbreitet entsprechende Maßnahmenvorschläge. Es kann auch als Grundlage für die Generalentwässerungsplanung dienen. [2]

» Kunststoffe werden sowohl über Niederschläge (Gullys) als auch über Schmutzwässer in Gebäuden an unterschiedlichsten Orten in das Abwasser eingetragen [vgl. Kapitel 3].

## **Empfehlungen:**

» Unterschiedliche wissenschaftliche Zugänge sollten genutzt werden, um individuelle Quellen in einer Kommune zu identifizieren und Lösungsstrategien zu erarbeiten, die von den jeweils betroffenen Stakeholdern akzeptiert werden.

» Obwohl die kommunalen Handlungsoptionen und deren Reichweite im deutschen föderalen Mehrebenensystem begrenzt sind,

verfügen Kommunen über eine Reihe von Möglichkeiten, auf Handel und Gewerbe, Unternehmen sowie Bürger:innen in Richtung einer Reduktion des Kunststoffeinsatzes und der Kunststoffnutzung einzuwirken.

» Kommunen müssen ihre Handlungsspielräume nutzen, indem sie verschiedene Maßnahmen (Downstream und Upstream) kombinieren und alle Akteure einbeziehen. Aufklärung und Information bilden hierfür die Basis. Auch finanzielle Anreize, zum Beispiel in Form von Verpackungssteuern oder Subventionen, sind denkbar. Schließlich können auch Auflagen wie Verbote von Einwegplastik(-verpackungen) in Satzungen festgeschrieben werden, wie etwa bei Wochenmärkten oder Volksfesten auf kommunalem Gelände.

» Forderungen der Kommunen an die anderen Politikebenen sollten stärker berücksichtigt werden.

## **Empfehlungen zur Reduzierung von Kunststoffeinträgen in die Umwelt:**

» Ethnographische Feldarbeit fördern, um Litteringquellen auf kommunaler Ebene zu identifizieren und Lösungsstrategien partizipativ zu erarbeiten. Lösungen müssen unter Einbeziehung aller relevanten Stakeholder und mit Berücksichtigung aller Interessenlagen umgesetzt werden.

» Technische und organisatorische Lösungen (z. B. Abfallsammlung, Säuberung von Straßenabläufen) systematisch umsetzen, insbesondere an lokal als besonders relevant identifizierten Eintragsorten (u. a. im Umfeld von Stadtmobiliar, Kunststoffindustriebetrieben oder Baustellen).

» Messstellen an Reifenabrieb-Hotspots einrichten, um Eintragsmengen und Beschaffenheit des Straßenkehrrechts zu überwachen und auf dieser Grundlage geeignete Maßnahmen (z. B. Filtereinbau, Optimierung der Straßereinigung) zu identifizieren. Maßnahmen bestimmen, um den Eintrag von Straßenkehrrecht in die Kanalisation mit flächigen GIS-basierten Planungsinstrumenten zu reduzieren, insbe-



sondere in den Einzugsgebieten mit Trennsystemen und direktem Eintrag in ein Gewässer.

» Prüfen, ob jeweils (temporär) während der Straßenreinigung eine 1,60 Meter-Grenze zum Bordstein geschaffen werden kann, um die entsprechenden Flächen für die Reinigung zugänglich zu machen.

» Nutzungsmöglichkeiten für Smart-City-Ansätze bei der Digitalisierung der Abfallsammlung im privaten und öffentlichen Raum erfassen, beispielsweise durch Füllstandssensoren an Abfallbehältern für eine bedarfsgerechte Leerung.

#### **Empfehlungen zur Vermeidung von Kunststoff(-abfällen) auf kommunaler Ebene:**

» Handreichungen erstellen und Dienstsanweisungen erlassen mit dem Ziel einer abfall- und verpackungsarmen öffentlichen Beschaffung (Green Public Procurement) in kommunalen Dienststellen und Einrichtungen (wie z. B. Kantinen, Kindergärten und Schulen) sowie kommunalen Eigenbetrieben und einen deutlichen Schwerpunkt auf Abfallvermeidung bei kom-

munalen Fachämtern setzen, etwa durch Aufklärung; entsprechende Gebührenstrukturen und Verankerung in kommunalen Satzungen.

» Öffentlichkeitsarbeit zur Vermeidung von Kunststoffabfällen stärken, etwa mit Infoveranstaltungen, Nachhaltigkeitskolumnen in städtischen Amtsblättern oder Zero-Waste-Guides.

» Auf das entsprechende Sammelsystem abgestimmtes, gegebenenfalls mehrsprachiges und adressatenorientiertes Informationsmaterial zur richtigen Entsorgung von Abfällen entwickeln und bereitstellen.

» Fortbildungsveranstaltungen sowie Beteiligungsformate wie z. B. runde Tische und dergleichen zwischen Kommune, Handel, Gewerbe und NGOs etablieren mit dem Ziel, ein abfallarmes Sortiment zu entwickeln.

» Regionale Betriebe beraten, wie sie stoffliche Industriesymbiosen erschließen können, (stoffliche Abfälle oder Reststoffe eines Unternehmens werden von einem anderen als Rohstoff genutzt) und gemeinsame Ansätze zur Vermeidung von Abfallströmen entwickeln.

- » Ökologisch-innovative Rahmenbedingungen schaffen, die die Handlungsmöglichkeiten von Kommunen erweitern (z. B. für eine stärkere Regionalisierung von Wirtschaftskreisläufen) sowie regionale und lokale Logistikketten stärken, um die Anlieferwege der Waren zum Handel zu verkürzen.
- » Unternehmen mit verpackungsarmen Sortimenten, z. B. Unverpacktläden, bei der Ansiedlung unterstützen; dies umfasst entsprechende Vorgaben und Anreize in Pacht-, Miet- und Erbpachtverträgen sowie zukünftig gegebenenfalls Steuerermäßigungen.
- » Regionale Mehrwegsysteme (branchenspezifisch oder branchenübergreifend) auf- und ausbauen, vor allem im Bereich der Verpackungen (Verkaufs- und Transportverpackungen); zudem eine Infrastruktur einrichten, um Einweg-Kunststoffbehälter zu vermeiden, etwa öffentliche Trinkbrunnen und Refill-Stationen.
- » Ökologisch vorteilhafte Verkehrsträger (etwa Lastenfahrräder) im Quartier fördern, um verkehrlich-energetische Rebound-Effekte eines Einkaufsverhaltens zu vermeiden, bei dem längere Wege zurückgelegt werden müssen, um weniger Kunststoffprodukte zu verbrauchen.
- » Gute Praxisbeispiele auszeichnen, ein gemeinsames (ggf. regionales) Vermarktungszeichen aufbauen und sachgerechte Orientierungshinweise für Verbraucher:innen zur Produkt- und Verpackungswahl im Handel entwickeln und verbreiten.

### **Forschungsbedarf:**

- » **Welche Potenziale zur Optimierung und Reduktion kunststoffhaltiger Abfallströme bestehen auf kommunaler oder regionaler Ebene und wie können diese erschlossen werden?**
- » **Wie lassen sich auf kommunaler Ebene Synergiepotenziale mobilisieren, etwa Kunststoffvermeidung in Verbindung mit Klimaschutzaktivitäten?**



### **Autor:innen**

Marco Breitbarth, Thomas Decker, Anja Hentschel, Frieder Rubik, Stefan Schweiger, Daniel Venghaus



# 08 Begrenzte Möglichkeiten: Welchen Einfluss haben Verbraucher:innen?



Häufig wird in der medialen Kommunikation und bei politischen Maßnahmen zur Minderung des Kunststoffeintrags in die Umwelt auf private Verbraucher:innen fokussiert. Dies reicht nicht aus, denn ihre Handlungsmöglichkeiten, d.h. auch die faktische Wirkungsmacht, sind stark begrenzt. Hinzu kommt, dass noch weitere Akteursgruppen (u. a. gewerbliche und öffentliche Akteure sowie andere Organisationen) kunststoffhaltige Produkte und Verpackungen nutzen und damit ebenfalls als Verbraucher:innen zu charakterisieren sind.

## Ergebnisse:

» **Kunststoffeinträge in die Umwelt** sind zum Teil auf einen fehlerhaften Umgang mit Produkten zurückzuführen, der sich aus Unwissenheit oder auch Bequemlichkeit ergibt. Manche Einträge sind jedoch unvermeidbar, beispielsweise wenn kunststoffhaltige Produkte so gestaltet sind, dass sich bei Gebrauch unbemerkt Partikel ablösen und in die Umwelt gelangen. [1]

» Generell zeigen Verbraucher:innen ein hohes Problembewusstsein hinsichtlich der Umweltwirkungen von Mikroplastik. Allerdings ist der eigene Beitrag zum Eintrag von Mikroplastik nur bezogen auf bestimmte Produktgruppen bekannt und die eigenen Handlungsmöglichkeiten werden je nach Produktgruppe sehr unterschiedlich eingeschätzt.

» Grundsätzlich können alle Verbraucher:innen einen Beitrag zur Kunststoffvermeidung leisten, indem sie (i) alternative Einkaufspraktiken nutzen (z. B. Nutzung von Unverpackt-Lösungen), (ii) optimierte Produkte (z. B. hinsichtlich Verpackung) kaufen, (iii) Mehrwegsysteme nutzen, (iv) regionale sozialökologische Versorgungssysteme und Wirtschaftskreisläufe beachten und (v) Kunststoffe korrekt entsorgen.

» Oftmals fehlen aber das nötige Wissen, das entsprechende Angebot an Waren und Infrastruktur oder auch Entsorgungsmöglichkeiten. [2] Die **Handlungsmöglichkeiten von Verbraucher:innen** sind damit entweder auf den Kauf, die Nutzungsphase und die Entsorgung von Kunststoffen beschränkt, oder aber auf Proteste.



- » Eine veränderte Produktnachfrage durch Verbraucher:innen allein reicht nicht aus, um Unternehmen dazu anzuregen, die Vermeidung von Kunststoffen zur Kernaufgabe der Produktgestaltung zu machen [vgl. Kapitel 5].
- » Zusätzliche Informationen auf Produkten (z. B. zur richtigen Entsorgung) führen nicht automatisch zu „richtigem“, umweltbewussten Handeln von Verbraucher:innen. Schon heute sind viele Produkte und Verpackungen mit Informationen so überladen, dass Verbraucher:innen nicht alles beachten können. Das zeigte sich auch bei Studien mit mehr als 1.000 Teilnehmer:innen zur Wirksamkeit von Labeln. [3]
- » Bestehende (nationale und internationale) **Regulierungsansätze** (wie z. B. die EU-Einwegkunststoffrichtlinie) zielen stark auf private Verbraucher:innen ab und sind angesichts deren begrenzter Einflussmöglichkeiten nicht ausreichend. [4]
- » **Innovative Pioniere**, wie etwa Unverpacktläden, sind Vorreiter und geben gesellschaftliche Impulse. Damit sind sie ein Baustein zur Verringerung des Kunststoffkonsums über die gesamte Wertschöpfungskette. [3]
- » Bestehende Widersprüche zwischen einer aus Verbraucher:innensicht „gefühlten“

Nachhaltigkeit und errechneten Ökobilanzen machen deutlich, dass spezifische, leicht verständliche und gut umsetzbare Handlungsempfehlungen fehlen, die auch Nebenfolgen und Nachhaltigkeitsdilemmata thematisieren und einen Zusammenhang zu den gegenwärtigen Wirtschaftsstrukturen herstellen.

» Alltagsvorstellungen von Schulabsolvent:innen zeigen erhebliche **Wissensdefizite** zum Thema Mikroplastik. [5] Zudem ist das Thema in Lehrplänen bisher kaum enthalten und in der Lehrer:innen-Ausbildung bislang nicht präsent. Auch Studierende fühlen sich über das Problemfeld eher nicht gut informiert, sorgen sich aber sehr um die Gefahren für die eigene Gesundheit, die Gesundheit zukünftiger Generationen und die Natur. [3]

» Eine Veränderung von Nutzungs- und Entsorgungspraktiken der Verbraucher:innen ist am ehesten dann realistisch, wenn, wie bei Kosmetikprodukten, ein direkter Beitrag des eigenen Verhaltens erkennbar ist oder vermittelt werden kann und praktikable Alternativen verfügbar sind.

### Empfehlungen:

- » Um eine Reduktion von Kunststoffeinträgen in die Umwelt entlang des Lebenszyklus sicherzustellen, braucht es einen verbindlichen und umfassenden Rechtsrahmen. Hierfür ist ein **Instrumentenmix** erforderlich, der Herstellern und Verbraucher:innen klare Handlungskorridore aufzeigt [vgl. Kapitel 5]. Er besteht aus (i) direkt regulativ verhaltenssteuernden Instrumenten (Verbote und Gebote), (ii) ökonomischen Instrumenten, soweit diese die sozial-ökologischen Folgekosten erfassen, sowie (iii) Maßnahmen, welche die Motivation und Handlungsfähigkeit der Verbraucher:innen stärken. Diese müssen so gestaltet werden, dass sie Erkenntnisse der verhaltenswissenschaftlichen Forschung zu u. a. wichtigen Faktoren für Entscheidungen und Handlungen der unterschiedlichen kunststoffnutzenden Akteursgruppen berücksichtigen. [6]
- » Eine wirksame Regulierung zu umweltfreundlicher Produktgestaltung muss bei den

**Herstellern von (Kunststoff-)Produkten** ansetzen und auf **Vermeidung** zielen [7], da Verbraucher:innen nur aus dem bestehenden und auf dem Markt verfügbaren Warenportfolio wählen können (vgl. *Kapitel 5 und Kapitel 10*). Dies betrifft auch Einträge in die Umwelt, die aufgrund der Produktgestaltung **unvermeidbar** sind.

» Eine substantielle Stärkung umweltfreundlicher Handlungskompetenzen aller Bevölkerungsgruppen sollte im Sinne eines **lebenslangen Lernens** gefördert werden. Während der gesamten Schulzeit sollte dazu fächerübergreifend ein solider Grundstock gelegt werden, der im Rahmen der Ausbildung und der beruflichen Bildung weitergeführt wird und sich auch in der betrieblichen Organisation niederschlägt.

» Vorhandene Bildungsmaterialien zum Thema (Mikro-)Plastik sollten systematisch genutzt werden, z. B. auch in Bildungseinrichtungen.

### **Forschungsbedarf:**

» **Wie sollten Mehrweglösungen, -verpackungen und -infrastrukturen für verschiedene Warenbereiche (Produkte und Verpackungen) ausgestaltet sein, damit Verbraucher:innen Entscheidungen im Sinne der Nachhaltigkeit treffen können?**

» **Welche Rahmenbedingungen sind nötig, um eine sachgemäße, korrekte Entsorgung durch Verbraucher:innen in jedem Fall zu ermöglichen?**

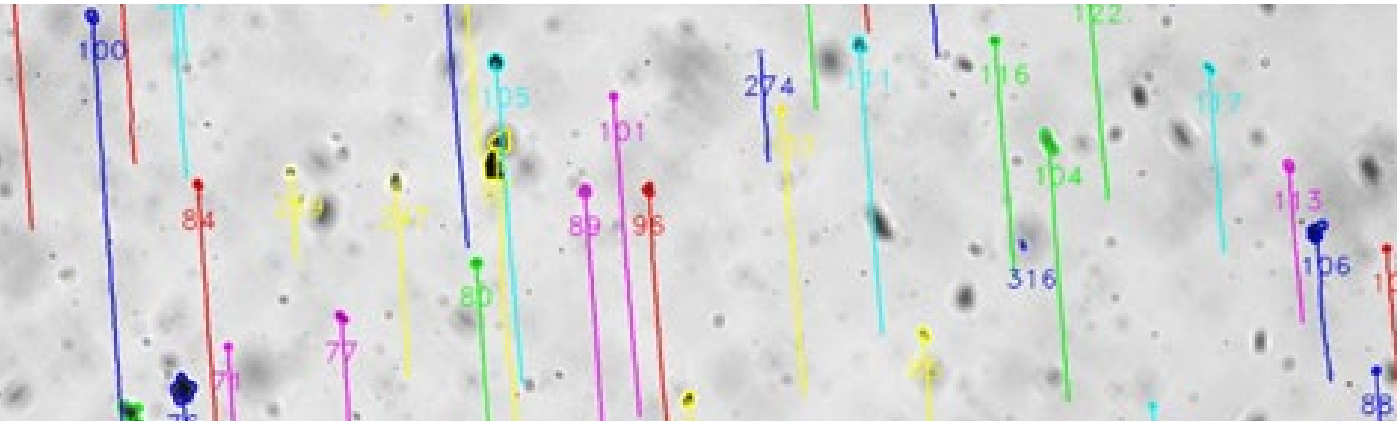
» **Welche direkten und indirekten Anreize (z. B. Informationen, ökonomische oder motivierende Instrumente) sind wirksam, damit Verbraucher:innen Plastikeinträge in die Umwelt reduzieren?**



### **Autor:innen**

Katharina Beyerl, Franz X. Bogner, Maria Daskalakis, Thomas Decker, Frieder Rubik, Stefan Schweiger, Immanuel Stieß, Katrin Wendt-Potthoff

# 09 Wesentliche Fortschritte in der Mikroplastik-Analytik



Die meisten Arbeiten zur Untersuchung von Mikroplastik konzentrierten sich auf dessen Vorkommen in wässrigen Medien. Andere Medien wurden auch betrachtet, diese standen aber nicht im Fokus [vgl. Kapitel 4]. Eine Vielzahl der gewonnenen Ergebnisse fand oder findet aktuell Eingang in die internationale und europäische Normung [vgl. Kapitel 10].

Die Analytik von Mikroplastik setzt sich aus den Schritten Probennahme, Probenaufbereitung und Detektion zusammen. Alle Verfahrensschritte sind miteinander verbunden, haben Einfluss auf das Analyseergebnis und können nicht isoliert betrachtet werden. Die gewählten Probennahmeverfahren variieren je nach Untersuchungsziel, Umweltmedium oder Material und müssen repräsentativ sein. Die Probenaufbereitung überführt die gewonnene Feld- in eine Analysenprobe. Die Detektionsverfahren unterscheiden sich nach den Parametern, die untersucht werden sollen.

## **Analytik:**

### » Detektion

Zum einen gibt es Detektionsverfahren, die die Polymersorte, Partikelanzahl, Partikelform und -größe/Größenverteilung oder die spezifische Oberflächenstruktur der Partikel bei Umweltuntersuchungen erfassen. Hier haben sich die spektroskopischen/bildgebenden Verfahren wie die Mikro-[Fourier Transformations] Infrarot Spektroskopie ( $\mu$ -FTIR), die Mikro-Raman Spektroskopie ( $\mu$ -Raman) oder die Mikro-Nahinfrarot Spektroskopie ( $\mu$ -NIR) bewährt. Zum anderen existieren Detektionsverfahren, mit denen die Polymer- und Massengehalte in Umweltmatrizes bestimmt werden können.

Hierzu gehören u. a. die thermoanalytischen/integralen Verfahren wie Pyrolyse- oder Thermo-Extraktion-Desorption-Gaschromatographie/Massenspektrometrie [Py-GC/MS, TED-GC/MS].

Spektroskopische Verfahren detektieren unterschiedliche Kunststoffe anhand von Schwingungsspektren, die je nach Polymer verschieden sind. Thermoanalytische Verfahren detektieren den Massengehalt unterschiedlicher Polymere anhand spezifischer Bruchstücke der thermischen Zersetzung. Neben diesen Detektionsverfahren können in Einzelfällen auch licht- oder elektronen-mikroskopische Verfah-

ren genutzt werden, um Partikelzahlen/-größen etwa in Proben von Laborexperimenten mit bekannten Polymeren zu bestimmen. Für spezifische Mikroplastiksorten können auch alternative Verfahren angewendet werden, wie etwa Kalorimetrie oder Elementanalytik.

Zur Charakterisierung von Makroplastik eignet sich insbesondere abgeschwächte Totalreflexions-FTIR Spektroskopie (ATR-FTIR) oder Nahinfrarotspektroskopie (NIR).

### » Probennahme

Probennahmen sind üblicherweise standardisiert, das heißt man nutzt festgelegte Verfahren für die einzelnen Umweltkompartimente (Boden, Luft und Wasser). Für Mikroplastik fehlen allerdings bislang Validierungen, dagegen existieren für Makroplastik noch nicht einmal Empfehlungen.

Plastikpartikel sind in der Umwelt in vielfältiger Dichte, Größe und Form zu finden. Dabei liegen sie teilweise auch in Agglomeraten vor, etwa als Teile von Schwimm-, Schweb- bzw. sedimentierbaren Stoffen. In Abhängigkeit davon, wie viele unterschiedliche, Mikroplastik-Partikel enthaltende Stoffe im untersuchten wässrigen Stoffsystem zu finden sind, und um genügend davon einzusammeln (Repräsentativität), müssen bei Stichproben teilweise sehr große Probenvolumina entnommen werden. Daraus gewinnt man die Feststoffe mittels fraktionierter (Druck-) Filtration oder Zentrifugation. Eine Alternative sind kontinuierliche Probennahmen mittels Passivsammlern.

### » Aufbereitung

Ziel einer Probenaufbereitung ist es, optimale Voraussetzungen zu schaffen, um eine Probe zu messen und anschließend auszuwerten. Die in einer Probe enthaltenen Plastikpartikel bzw. die Plastikmenge dürfen durch die Aufbereitungsschritte nicht verändert werden. [1] Für spektroskopische Detektionsverfahren werden anorganische Störstoffe meist durch eine Dichtentrennung entfernt, organische Störstoffe dagegen chemisch bzw. enzymatisch. Für thermoanalytische Verfahren ist häufig eine weniger aufwändige bzw. auch keine Probenaufbereitung erforderlich.

### » Kontamination und Blindwerte

Plastik ist ubiquitär vorhanden – auch in Laboren, wo sich etwa in der Luft winzig kleine Kunststoffteilchen befinden. Deswegen ist es wichtig, identisch prozessierte Blindwerte zu bestimmen. So können die Analyseergebnisse um mögliche Fremdkontaminationen korrigiert werden. Insbesondere im Fall sehr geringer Plastikpartikelgehalte in der Probe entscheidet der Blindwert maßgeblich über die Qualität und Aussagekraft der Analyse.

Eine Reihe von Labormaterial und -chemikalien sind nicht per se für die Analyse von Plastikpartikeln vorgesehen. Vielfach sind sie etwa bei der Herstellung oder Lagerung, direkt oder indirekt, zum Beispiel über die Raumluft in Kontakt mit Kunststoffmaterialien gekommen. Deshalb müssen Chemikalien gereinigt (z. B. filtriert), Geräte oder Filtermaterialien mit filtrierten Lösungen gespült oder ausgeglüht werden. Das Arbeiten im Feld und Labor sollte unter maximaler Reduktion potenzieller Kontaminationsquellen erfolgen, etwa indem Kleidung mit oder aus Kunststoffen vermieden wird, Proben sofort mit Glas oder Aluminiumfolie abgedeckt werden und Arbeiten im Labor unter einer Laminar-Flow-Box stattfinden.

### » Einordnung der analytischen Verfahren

Um den Anforderungen von Überwachungs- und Regulierungsbehörden zu entsprechen, müssen Messungen robust sowie kosten- und zeiteffizient sein und routinemäßig angewandt werden können. Hier sind insbesondere Verfahren geeignet, die kontinuierlich Proben gewinnen, um Gesamtgehalte zu ermitteln. Für andere Zielgruppen bzw. bei der Risikobewertung für die Umwelt und menschliche Gesundheit sind neben der Polymersorte eines Partikels die Partikelzahlen, -größen und -formen relevant. Das betrifft beispielsweise die Forschung, den medizinischen Bereich oder Plastikgehalte in Lebensmitteln. Hier sind Einzelproben in Kombination mit (hochauflösenden) spektroskopischen Detektionsverfahren besonders geeignet. Solche Proben gehen allerdings meist mit einem erhöhten Zeit- und Messaufwand einher. Ergebnisse zu Partikelzahlen sollten nicht in Massegehalte umgerechnet werden oder umgekehrt. Eine große

Fehlerquelle sind hier vereinheitlichende Annahmen über die Partikelvolumina, da die Formenvielfalt der Plastikpartikel in Umweltproben von der Faser bis zum unregelmäßig geformten Partikel reicht.

### **Standardisierung & Referenzmaterial:**

Methoden zur Probennahme, Probenaufbereitung und Detektion zu standardisieren, ist von zentraler Bedeutung für die Analytik von Mikroplastik. Die Standardisierung umfasst dabei auch die Entwicklung und Anwendung von Mikroplastik-Referenzmaterialien. Das Referenzmaterial muss in seiner spezifischen Eigenschaft für jeden der drei Analytikschritte (Probennahme, -aufbereitung, Detektion) und für die jeweilige Fragestellung adaptiert werden. Dabei sind neben der Matrix, in der die Mikroplastik-Partikel eingebettet vorliegen, auch die Polymersorte, die Form, die Größe, der Alterungszustand oder die Masse entsprechend anzupassen.

Erste Mikroplastik-Referenzmaterialien wurden erfolgreich entwickelt. Auf Basis dieser Materialien konnte ein Vergleichsversuch zur Detektion von Mikroplastik zeigen, dass sowohl thermoanalytische als auch spektroskopische Methoden geeignet sind, Mikroplastik zu identifizieren und hinreichend genau zu quantifizieren. [2]

### **Autor:innen**

Korinna Altmann, Claus Gerhard Bannick, Luisa Barkmann, Mathias Bochow, Ulrike Braun, Marco Breitbarth, Georg Dierkes, Dieter Fischer, Franziska Fischer, Natalia Ivleva, Marco Kunaschk, Matthias Labrenz, Christian Laforsch, Philipp Lau, Martin Löder, Luisa Reinhold, Barbara Scholz-Böttcher, Felix Weber, Cordula Witzig, Katharina Wörle, Nicole Zumbülte

### **Forschungsbedarf:**

» Entwicklung praxistauglicher Verfahren für Makro-, Mikro- und Nanoplastik, die einen hohen Probendurchsatz ermöglichen und in verschiedenen Umweltmedien und Ökosystemen (Wasser, Böden, Luft, Biota) Anwendung finden sowie die Basis für Langzeit-Monitoring-Konzepte bilden.

» Validierung der Verfahren mithilfe realitätsnaher Mikroplastik-Referenzmaterialien, um die Harmonisierung bzw. Standardisierung der Verfahren zu unterstützen.

» Einheitliche Empfehlungen für Probenahme von Feststoffen und atmosphärischen Proben sowie Standardisierung von Makroplastikanalysen. [1]

» Detektion im unteren Mikrometer-Bereich sowie im Nanobereich weiterentwickeln, z. B. auf Basis der Kombination von Feld-Fluss-Fraktionierung und  $\mu$ -Raman-Spektroskopie.



# 10 Rechtliche Empfehlungen zur Reduktion von Kunststoffemissionen



Um Einträge von Kunststoffen in die Umwelt wirksam zu vermindern, sind gesetzliche Rahmenbedingungen unverzichtbar. Allerdings ist die Formulierung rechtlicher Maßnahmen aufgrund der Menge relevanter Kunststoffprodukte sowie der Vielzahl möglicher Eintragspfade [vgl. Kapitel 1] und der unterschiedlich betroffenen [Umweltschutz]-Güter komplex. Lösungsvorschläge sollten deshalb nicht nur den unmittelbaren Eintrag einzelner Produkte oder des Materials selbst adressieren [vgl. Kapitel 8], sondern auch Aspekte der Herstellung, der Konfektionierung, des Produktdesigns, der Wiederverwendung sowie des Recyclings umfassen und darüber hinaus die Nutzung und das Verbraucherverhalten berücksichtigen. [1]

Um einen entsprechenden Rechtsrahmen zu schaffen, sind u. a. technisch-konzeptionelle Erkenntnisse notwendig. Dies umfasst insbesondere die Entwicklung von Verfahren der Analytik (Probennahme, Probenaufbereitung, Detektion) [vgl. Kapitel 9], um Mikroplastik im Wasser sicher nachzuweisen. Inzwischen sind sie Grundlage internationaler und europäischer Normungsprojekte. Sobald die technischen Normen zur Analytik von Mikroplastik vorliegen, können sie herangezogen werden, um rechtlich verbindliche Werte festzulegen.

## Erkenntnisse:

» Da inzwischen gut 90 % der deutschen Umweltgesetzgebung auf europäischen Vorgaben beruhen und Kunststoffe zudem eine globale Herausforderung darstellen, rücken insbesondere internationale und europäische Empfehlungen in den Mittelpunkt der Betrachtung. Aber auch nationale oder lokale Lösungen können zu einer Reduktion von Kunststoffemissionen in die Umwelt beitragen. Die hier thematisierten Lösungskonzepte stellen eine Auswahl der gegenwärtig wichtigsten Bestrebungen dar.

## Internationale Ebene

» Die klimavölkerrechtliche Zielbestimmung „null fossile Brennstoffe“ des Paris-Abkommens aus dem Jahr 2015 (Art. 2 Abs. 1) kann auch einen entscheidenden Rahmen und ein wesentliches Ziel für eine Kunststoffregulierung bilden: Mit ihr dürfte nämlich der wesentliche Grundstoff für die Kunststoffproduktion in kurzer Zeit, binnen maximal zwei Dekaden, nicht mehr eingesetzt werden. Diese generelle Zielsetzung gibt vor allen sonstigen Detailbetrachtungen eine ökologische Rahmung vor.

Sie erfasst nicht nur einzelne Kunststoffe, sondern fossil basierte Kunststoffe insgesamt.

» Mit dem Konzept für gesunde Ozeane und Meere sowie widerstandsfähige Küstengemeinschaften des G7-Gipfels von Charlevoix aus dem Jahr 2018 ist Deutschland zusammen mit weiteren Staaten eine erste internationale Verpflichtung eingegangen, den Eintrag von schwer abbaubaren Kunststoffen in Meere zu reduzieren. Die dabei beschlossenen Verpflichtungen sind von der Umweltversammlung der Vereinten Nationen (UNEA) im Grundsatz aufgegriffen worden. Am 2. März 2022 wurde in Nairobi die Resolution zum Abschluss eines multilateralen Abkommens gegen Plastikmüll bis Ende 2024 verabschiedet.

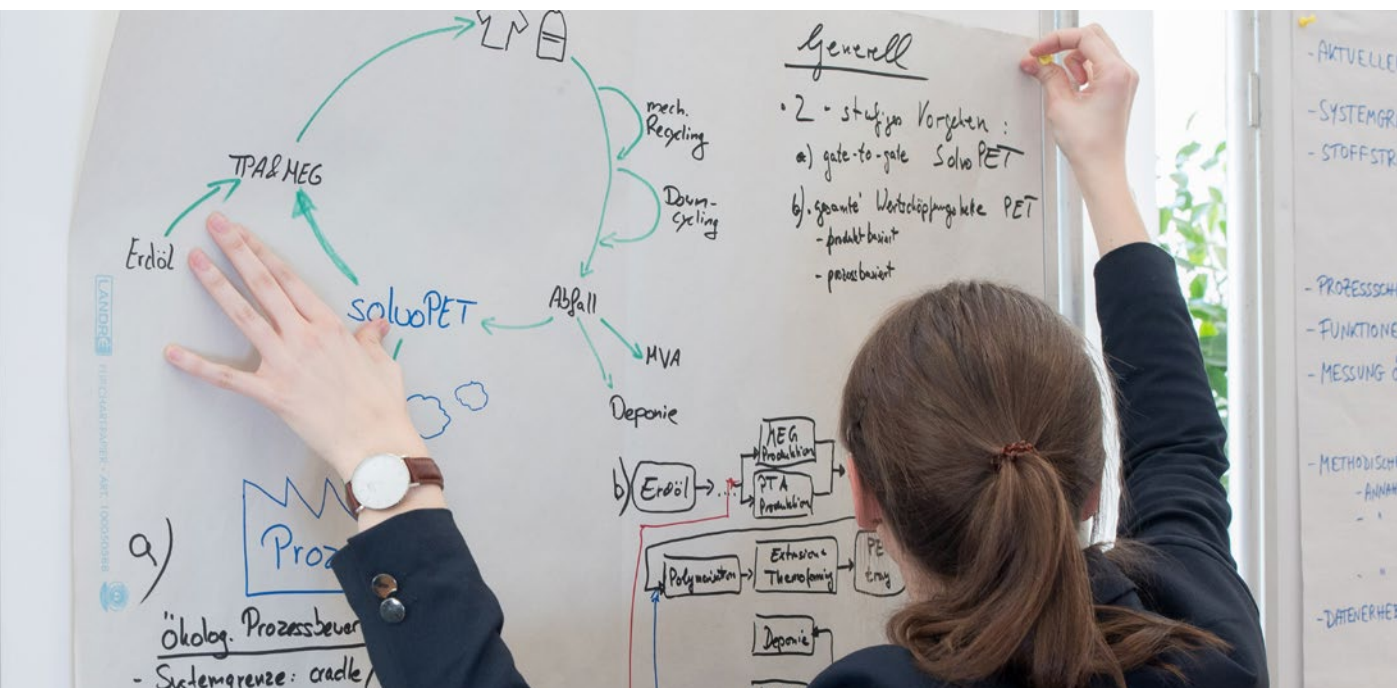
» Bisher existiert auf internationaler Ebene – bis auf die Basler Konvention zur Verbringung von gefährlichen Abfällen und seit 2019 auch gefährlichen (verschmutzten) Kunststoffen – noch kein globales Kunststoffübereinkommen. Allerdings haben von 193 UN-Mitgliedern schon 146 Staaten nationale Regelungen zu Kunststoffprodukten erlassen, die unter anderem Plastiktüten, Einwegkunststoffprodukte, aber auch Microbeads [2] betreffen. Doch lassen sich in diesen unterschiedlichen nati-

onalen Regelungen jenseits eines Vorgehens gegen verschiedenste Kunststoffprodukte kaum gemeinsame Ansatzpunkte finden, weil die Beweggründe für die Rechtsetzung und deren Umsetzung sehr unterschiedlich sind (z. B. die Regulierung von Kunststofftüten [3]).

### Europäische Ebene

» Die europäische Kunststoffstrategie aus dem Jahr 2018 und der Green Deal von 2020 setzen einen ersten europäischen Rahmen für den Umgang mit Kunststoffen. Er wird mithilfe verschiedener Verordnungen und Richtlinien konkretisiert, wobei letztere den Mitgliedstaaten bei der Umsetzung Regelungsspielräume lassen.

» Eine Vielzahl von EU-Regelungen ist geeignet, Anforderungen an die Reduktion von Kunststoffeinträgen in die Umwelt umzusetzen: die EU-Düngemittel-Verordnung, die Einwegkunststoffrichtlinie, die Verordnung über die Verbringung von Abfällen, die delegierten Rechtsakte der Eco-Design-Richtlinie und der Trinkwasserrichtlinie. In den 2022 laufenden Revisionen zur Kommunalabwasserrichtlinie sowie zur Klärschlammrichtlinie ist Kunststoff auch ein Thema.





» Die Europäische Kommission hat zwischen Herbst 2021 und Frühjahr 2022 zwei Öffentlichkeitsbeteiligungsverfahren angestoßen bzw. durchgeführt, die dazu beitragen sollen, Maßnahmen zur Reduzierung unbeabsichtigt freigesetzten Mikroplastiks aus Reifen, Textilien und Kunststoffgranulat in der Umwelt festzulegen sowie den Umgang und Einsatz mit bioabbaubaren Kunststoffen zu regeln. Im 3. Quartal 2022 sollen politische Rahmensetzungen zu biobasierten und biologisch abbaubaren Kunststoffen veröffentlicht werden und die Ergebnisse zur Freisetzung von Mikroplastik sollen in einen Verordnungsvorschlag im 4. Quartal 2022 einfließen. Darüber hinaus liegt der Kommission ein Vorschlag der ECHA vor, bestimmte Kunststoffe unter das europäische Chemikalienrecht REACH zu stellen.

» In der Einwegkunststoffrichtlinie der EU werden ausgewählte Produkte und Verpackungen (einzelne Einwegkunststoffprodukte wie z. B. Kunststoffgeschirr und -besteck, Plastiktüten) reguliert. Sie verpflichtet die Mitgliedstaaten zu vielfältigen Maßnahmen gegenüber diesen Produkten, etwa zu Beschränkungen zum Inverkehrbringen, Verbrauchsminderungen, Produkthanforderungen und -kennzeichnungen, Getrenntsammlung, Verbraucher:inneninformation und -aufklärung sowie zur Einführung einer erweiterten Herstellerverantwortung, die auch die Kosten von Reinigungsaktionen umfasst.

» Untersuchungen haben gezeigt, dass die Regelungen nicht ausreichend sind, weil deutlich mehr und unterschiedliche kunststoffhaltige Produkte und Verpackungen (einschließlich der Kunststoffpellets) durch verschiedene Akteure in die Umwelt eingetragen werden und Maßnahmen zur Information und Aufklärung nur sehr eingeschränkt wirken. [4]

» Auch die erweiterte Herstellerverantwortung kann nur bedingt greifen. Zwar können Reinigungsmaßnahmen den Eintrag von Makrokunststoffen mindern, haben angesichts der Vielfalt und Masse an Einträgen in die Umwelt [vgl. Kapitel 1] aber nur eine punktuelle und geringe Wirkung. Wirksame Ansätze sollten deshalb darauf abzielen, Kunststoffeinträge

in die Umwelt von vorneherein zu verringern oder zu vermeiden. Dafür sollten alle Eintragspfade von Kunststoffen in die Umwelt systematisch analysiert und regulatorisch berücksichtigt werden (ein möglicher Ansatzpunkt sind z. B. strengere Anforderungen an die Produktgestaltung).

### Nationale Ebene

» Der überwiegende Teil der Vorgaben der Einwegkunststoffrichtlinie wurde in Deutschland direkt übernommen, wobei die erweiterte Herstellerverantwortung noch nicht abschließend umgesetzt ist.

» Die Untersuchung von Sekundärrohstoffdüngemitteln, die eine Eintragsquelle für den Boden sind, zeigen, dass die bisherigen Analyseverfahren nach der Bioabfallverordnung zur Qualitätssicherung von Komposten und Gärückständen nicht ausreichen, um die Gesamtfracht an Kunststoffeinträgen zu bestimmen.

### Fazit

» Die vielen Aktivitäten auf den unterschiedlichen Handlungsebenen stellen wichtige Ausgangspunkte dar, aber die bestehenden und initiierten rechtlichen Vorgaben und Regelungen reichen bisher nicht aus. Denn es werden jeweils nur einzelne Aspekte des Kunststoffeintrags adressiert und ein umfassender konzeptioneller Ansatz auf wissenschaftlichen Grundlagen fehlt.

## Empfehlungen:

### Internationale Ebene

» Bei den anstehenden Verhandlungen der UNEA zu einem rechtsverbindlichen Abkommen gegen Plastikverschmutzung sollte sich die Bundesregierung entschieden einbringen. Darüber hinaus sollte die deutsche Beteiligung an internationalen Initiativen bei G7 und G20, der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und OECD intensiviert und übergreifend auf verbindliche sowie umfassende Lösungsansätze hingearbeitet werden.

» Zugleich sollte Deutschland die laufenden Arbeiten der Internationalen und Europäischen Normungsorganisationen (ISO und CEN) zur Methodenentwicklung und zu Recyclingkonzepten berücksichtigen und stärker als bislang unterstützen, um eine Vorlage der notwendigen Normen zu beschleunigen. Des Weiteren sollte über das Deutsche Institut für Normung (DIN) auf die ISO dahingehend eingewirkt werden, dass die derzeit stark sektoral aufgestellten technischen Komitees, die z. B. im Bereich analytische Kunststoffeigenschaften, technischer Kunststoff- und Elastomerprodukte oder bioabbaubare Werkstoffe tätig sind, ihre Arbeiten in einem bereichsübergreifenden technischen Komitee zusammenführen. Nur so ist eine aktuell absehbare unabgestimmte Mischung verschiedener, teilweise ungeeigneter Methoden zu vermeiden.

» Darüber hinaus wäre es wünschenswert, die Arbeit globaler Regionalorganisationen wie der Afrikanischen Union, des Verbands asiatischer Staaten (ASEAN), des Zusammenschlusses der Asian Pazifik Anrainer (APEA) oder der südamerikanischen Bündnisse im Bereich der Kunststoffregulierung zu unterstützen.

## Europäische Ebene

In den anstehenden Revisionen von EU-Richtlinien sollte von deutscher Seite auf hohe Anforderungen bei der Vermeidung von Kunststoffeinträgen geachtet werden. Im Einzelnen wird angeregt:

- EU-Kommunalabwasserrichtlinie: für die Bereiche Mischwasserüberläufe und Niederschlagswasser Anforderungen an die Abwasserqualität bezüglich Kunststofffrachten und Mikroplastik verankern.
- Revision der EU-Klärschlammrichtlinie: Anforderungen an den Gesamtgehalt von Kunststoffen in Analogie zu den Sekundärrohstoffdüngern festlegen *[vgl. Kapitel 4]*.
- Verpackungsrichtlinie: konkrete Vorgaben für die Verminderung und Vermeidung von (Kunststoff)-Verpackungen und Anforderungen an notwendige Kunststoffverpackungen

aufnehmen (z. B. zur Rezyklierfähigkeit), die Nutzung von Mehrwegalternativen weiter stärken und Substitutionsbewegungen beachten, die wieder mit anderen Umweltfolgen verbunden sein können.

- Abfallrahmenrichtlinie: in Bezug auf den Umgang mit Kunststoffen ergänzen und diesbezüglich am Vermeidungsgebot ausrichten.
- Die Meeresstrategierahmenrichtlinie hat den Eintrag von (Kunststoff-) Abfällen in die Meere als Indikator zur Bewertung des „guten Umweltzustandes“ implementiert. Ein äquivalentes Vorgehen bei der Wasserrahmenrichtlinie ist erforderlich und daraus abgeleitet die Entwicklung nationaler Monitoring- und Maßnahmenprogramme.
- EU-Trinkwasserrichtlinie: um ab dem Jahr 2025 Mikroplastik bei der Risikobewertung der Trinkwasserqualität zu beobachten, sollten die daran arbeitenden Normungsgremien bei der Vorlage einer Methodik zur Messung und Überwachung unterstützt werden.
- Deklarationspflicht zur Zusammensetzung von Kunststoffen und zugesetzten Additiven über die gesamte Wertschöpfungskette ist erforderlich, um alle Akteure über Kunststoffinhalte zu informieren und eine Grundlage für hieran anknüpfende rechtliche Regelungen zu erhalten.

## Nationale Ebene

» Es sollte eine nationale Kunststoffstrategie formuliert werden, die die Ansätze der europäischen Kunststoffstrategie und des Green Deals aufgreift, jedoch über diese in Inhalt und Struktur hinausgeht. Damit können Lücken der EU-Gesetzgebung geschlossen werden. Die Kunststoffstrategie sollte den gesamten Lebenszyklus von Kunststoffen sowie die Heterogenität der relevanten Akteure, Prozesse, Produkte und Eintragspfade erfassen.

» Aus der nationalen Kunststoffstrategie wäre ein „Kunststoff-Stammgesetz“ zu formulieren, das rechtlich verbindliche, übergreifende Rah-

menbedingungen und Anforderungen für den Umgang mit Kunststoffen enthält und damit die Grundlagen dafür bildet, bestehende rechtliche Regelungen anzupassen oder neue einzuführen. Dies umfasst auch allgemeine (Reduktions-) Ziele sowie Grundsätze und Pflichten zum (nachhaltigen) Umgang mit Kunststoffen. Zudem sollten eine möglichst vollständige Kreislaufführung von Kunststoffen adressiert werden und darüber hinaus verbindliche Mechanismen und Vorgaben für die Erarbeitung, Umsetzung, Überprüfung, Berichterstattung und Fortschreibung der zum Umgang mit Kunststoffen notwendigen Maßnahmen festgehalten sein. Ausgehend vom „Kunststoff-Stammgesetz“ sind die Regelungen in Fachgesetzen und untergesetzlichen Normen zu Kunststoffen anzupassen, zu ergänzen oder neu zu fassen.

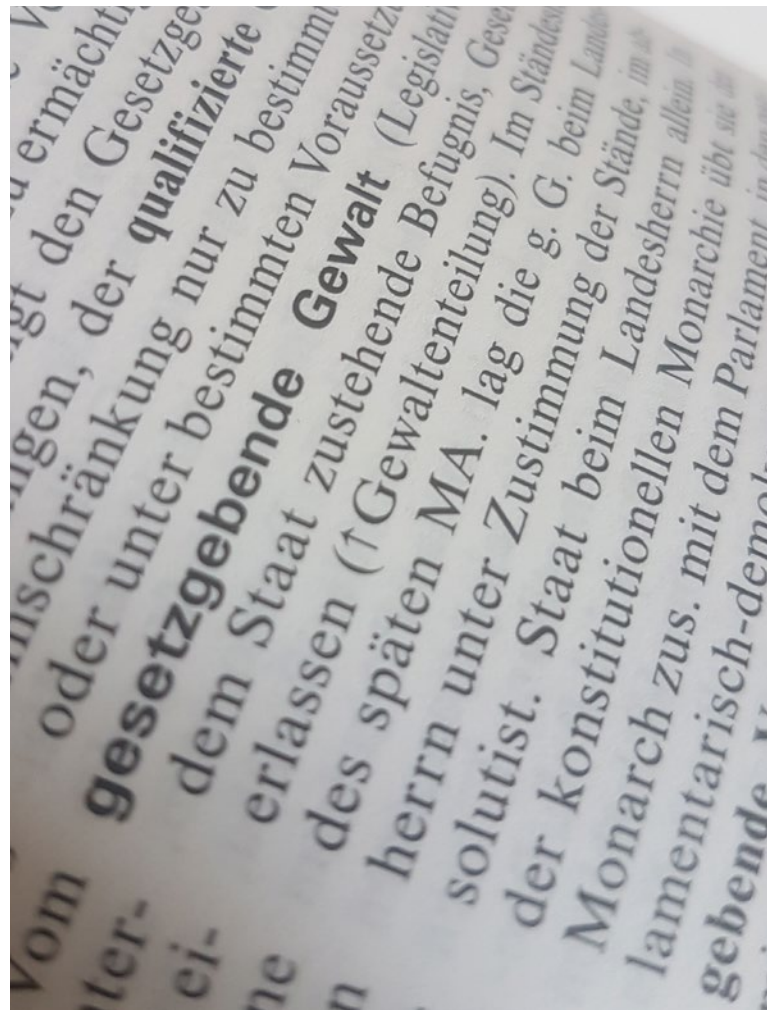
» Ein konkreter Ansatzpunkt dafür ist die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Hier kann direkt mit Arbeiten zur Ableitung von Vorsorgewerten – definiert als Gesamtgehalte – für Kunststoffe in Böden begonnen werden, um damit eine Obergrenze für weitere Einträge zu setzen.

### **Forschungsbedarf:**

» **Die Daten- und Informationsbasis für künftige rechtliche Regulierungen muss erweitert werden. Dies umfasst auch Lösungsansätze, welche Zielkonflikte beim Umgang mit Kunststoffen und dessen Recycling rechtlich adressieren (z. B. Hygieneaspekte im Lebensmittel-sektor durch Recyclinganteile, verbindliche Recyclingquoten mit hochwertiger Qualität).**

» **Welche rechtlichen Regelungen müssen in einem internationalen Abkommen verbindlich verankert werden, um einen Beitrag zur Reduktion des Kunststoffaufkommens und -eintrags zu erreichen?**

» **Welche umweltmedienspezifischen Bewertungskonzepte eignen sich, um Grenzwerte festzulegen und wie können entsprechende Monitoringkonzepte entwickelt werden?**



### **Autor:innen**

Anja Hentschel, Maria Daskalakis, Ulrike Braun, Marco Breitbarth, Bastian Loges, Nathan Obermaier, Claus Gerhard Bannick

# Fazit

## Die Forschung ist einen großen Schritt weiter – aber es bleibt noch viel zu tun

**Mit dem Forschungsschwerpunkt wurde das Ziel verfolgt, den Eintrag, die Verbreitung und die Wirkungen von Plastik in der Umwelt zu untersuchen und so ein Gesamtbild des Vorkommens und Verhaltens von Kunststoffen entlang ihres gesamten Lebenszyklus zu erhalten.**

Die Verbundprojekte haben entscheidend dazu beigetragen, dieses Bild weiter zu vervollständigen, indem zu den Quellen und Senken von (Mikro-)Plastik folgende wichtige Erkenntnisse erzielt wurden *[vgl. Kapitel 1-10]*:

- Kunststoffe gelangen über verschiedene Eintragspfade in die Umwelt. Dort werden sie weiter transportiert oder sammeln sich in Böden oder Gewässern an, auch als kaum sichtbares Mikroplastik. Neben den Meeren sind auch Böden bedeutende Senken.
- Die Analyse von (Mikro-)Plastik brachte neue Herausforderungen für die Forschung mit sich. Zahlreiche Erkenntnisse daraus leisten nun Beiträge zur zukünftigen Standardisierung und für folgende Monitoringkonzepte aber auch zur Ausweitung des Messbereichs auf Nanoplastik.
- In Kläranlagen wird ein Großteil der Kunststoffe aus dem Abwasser entfernt, jedoch werden nicht alle Niederschlags- und Mischwasserabflüsse durch Kläranlagen erfasst. Klärschlamm ist die Senke für das in Kläranlagen entfernte Mikroplastik. Dessen Weiterverwertung, etwa in der Landwirtschaft, führt daher zu Einträgen in die Umwelt.
- Maßnahmen zur Reduktion von Kunststoffemissionen in der Siedlungswasserwirtschaft sind mit hohem technischem und wirtschaftlichem Aufwand verbunden. Als End-of-Pipe-Lösung können solche Ansätze zudem Maßnahmen, die an der Produktion

und Nutzung der Kunststoffprodukte ansetzen, nur flankieren.

- Ob Mikroplastik schädliche Auswirkungen auf Pflanzen und Tiere hat, lässt sich bisher nicht eindeutig nachweisen. Die unterschiedlichen Eigenschaften von Mikroplastik bestimmen, ob und wie das Mikroplastik von Lebewesen aufgenommen wird und ob es für sie schädlich ist. Zudem sind die Effekte des Mikroplastiks oft nicht eindeutig von den Schadeffekten anderer in der Umwelt befindlicher Partikel und Stoffe abzugrenzen.
- Umweltpolitik sollte im Sinne des Vorsorgeprinzips darauf abzielen, den Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt zu minimieren, da Mikroplastik bei entsprechender Exposition potenziell zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt führen kann.

Die Arbeiten im Forschungsschwerpunkt haben das systemische Wissen sowie die Kenntnisse zu komplexen Zusammenhängen und gegenseitigen Abhängigkeiten erweitert. Damit sind die wesentlichen Voraussetzungen geschaffen, um geeignete Lösungsansätze und Maßnahmen zu identifizieren und umzusetzen, mit denen Plastikeinträge in die Umwelt künftig vermindert und vermieden werden können. Gegenwärtig lassen sich die folgenden Hinweise und Empfehlungen geben:

- Es sind umfassende Ansätze erforderlich, wobei die Vermeidung am wichtigsten ist und den Unternehmen eine zentrale Bedeutung zukommt. Diese sollten mithilfe einer nationalen Innovations- und Umstellungsstrategie unterstützt werden, kunststofffreie bzw. kunststoffreduzierte und/oder mehrfach nutzbare, recyclingfähige Produkt- und Verpackungsalternativen zu entwickeln bzw. einzuführen.

- Bei der Gestaltung und Umsetzung notwendiger Innovationen ist die gesamte Wertschöpfungskette zu berücksichtigen und zu gewährleisten, dass Vorteile an einer Stelle nicht zu Nachteilen an anderer Stelle führen.
- Die Handlungsmöglichkeiten und damit auch faktische Einflussnahme privater Verbraucher:innen sind stark begrenzt. Selbst Lösungen, die an Gütesiegeln, Labels etc. ansetzen, wirken durch die Vielfalt von Informationen in Verbrauchszusammenhängen nur eingeschränkt und sind lediglich als ergänzende Maßnahmen sinnvoll.
- Kommunen als den Bürger:innen nahestehendste staatliche Ebene verfügen über eine Reihe von Möglichkeiten, auf Handel und Gewerbe, Unternehmen sowie Verbraucher:innen in Richtung einer Reduktion des Kunststoffeinsatzes und der Kunststoffnutzung hinzuwirken, auch wenn die kommunalen Handlungsoptionen und deren Reichweite im deutschen föderalen Mehrebenenensystem begrenzt sind.
- Die Abfallsammlung in Deutschland muss konzeptionell und technologisch innovativ weiterentwickelt werden, um die Sammelqualitäten zu optimieren und Verluste in die Umwelt zu reduzieren. Dies umfasst auch die Sortierung von (Kunststoff-) Abfall, um eine effizientere Aufbereitung und hochwertiges Recycling zu ermöglichen.
- Moderne chemische Recyclingverfahren können als Ergänzung zu bereits etablierten Verfahren zu höheren Recyclingquoten beitragen. Insbesondere die Nutzung komplexer Abfallströme, die bislang nur thermisch verwertet wurden, hilft bei der Erschließung wertvoller Ressourcen.
- Durch ein funktionierendes Recycling von Kunststoffen kann eine höhere Wertigkeit des Werkstoffs erreicht werden. Auch wenn dies nicht direkt Kunststoffeinträge in die Umwelt reduziert, kann es bewirken, dass weniger Plastikmüll achtlos weggeworfen oder liegengelassen wird. Gleichzeitig

werden durch ein hochwertiges Recycling auch weniger (fossile) Primärrohstoffe für die Kunststoffproduktion verbraucht. Der gesellschaftliche und rechtliche Druck zu weniger Abfallexporten erfordert eine werthaltige Kreislaufwirtschaft und entsprechende Technologien.

Insgesamt machen die in diesem Dokument dargelegten Erkenntnisse und Empfehlungen deutlich, dass der bestehende Rechtsrahmen nicht ausreicht und Lücken aufweist, die auf unterschiedlichen politischen Ebenen zu schließen sind. Kurzfristig muss es darum gehen, geltende Regelungen konsequent umzusetzen. Mittel- bis längerfristig müssen jedoch bestehende Gesetze überarbeitet und angepasst werden. Darüber hinaus ergibt sich aus den Projektergebnissen die Empfehlung, in Deutschland einen abgestimmten, verbindlichen und umfassenden Rechtsrahmen zu schaffen, der auf eine Reduktion von Kunststoffeinträgen in die Umwelt abzielt und über die bisherigen Ansätze der Regulierung einzelner Produkte oder Eintragspfade hinausgeht.

Aufgrund der thematischen Vielfalt der Projekte und der breiten gesellschaftlichen Relevanz des Themas erfolgt die Verbreitung der Ergebnisse über diese Kernbotschaften hinaus in verschiedenen Formaten und Transferaktivitäten wie u. a. Factsheets, thematischen Webinaren, Bildungsmaterialien, Leitfäden, Diskussionspapieren, Sonderheften/Zeitschriftenartikeln, (Wander-) Ausstellungen und Workshops.

Eine Übersicht findet sich unter [www.bmbf-plastik.de/ergebnisse](http://www.bmbf-plastik.de/ergebnisse).

# Literaturverzeichnis

## Einleitung

- [1] Gerdt, Gunnar (Hrsg.) [2019]: Defining the BASElines and standards for Microplastics ANALyses in European waters. Project BASEMAN Final report. JPI-Oceans BASEMAN Project, 25pp. DOI: <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-722>.
- [2] Jekel, Martin; Dittmar, Stefan; Ruhl, Aki Sebastian (Hrsg.) [2020]: Mikroplastik im Wasserkreislauf. Probennahme, Probenaufbereitung, Analytik, Vorkommen und Bewertung. Universitätsverlag der TU Berlin, CC BY 4.0. ISBN 978-3-7983-3163-1.
- [3] Matzinger, Andreas; Jählig, Jeannette; Miehe, Ulf [2019]: Schlussbericht Verbundprojekt OEMP - Optimierte Materialien und Verfahren zur Entfernung von Mikroplastik aus dem Wasserkreislauf. URL: <https://publications.kompetenz-wasser.de/pdf/Matzinger-2019-1108.pdf>.
- [4] Braun, Ulrike; Stein, Ulf; Schritt, Hannes; Altmann, Korinna; Bannick, Claus Gerhard; Becker, Roland; Bitter, Hajo; Bochow, Mathias; Dierkes, Georg; Enders, Kristina; Eslahian, Kyriakos; Fischer, Dieter; Földi, Corinna; Fuchs, Monika; Gerdt, Gunnar; Hagendorf, Christian; Heller, Claudia; Ivleva, Natalia; Jekel, Martin; Kerpen, Jutta; Klaeger, Franziska; Knoop, Oliver; Labrenz, Matthias; Laforsch, Christian; Obermaier, Nathan; Primpke, Sebastian; Reiber, Jens; Richter, Susanne; Ricking, Matthias; Scholz-Böttcher, Barbara; Stock, Friederike; Wagner, Stephan; Wendt-Potthoff, Katrin; Zumbülte, Nicole [2020]: Statuspapier im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Plastik in der Umwelt Mikroplastik-Analytik Probennahme, Probenaufbereitung und Detektionsverfahren. Verfügbar unter: [https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2020-11/Statuspapier\\_Mikroplastik%20Analytik\\_Plastik%20in%20der%20Umwelt\\_2020.pdf](https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2020-11/Statuspapier_Mikroplastik%20Analytik_Plastik%20in%20der%20Umwelt_2020.pdf).
- [5] Vgl. Aebli, Lena; Wendt-Potthoff, Katrin; Laforsch, Christian; Höss, Sebastian; Schritt, Hannes; Beggel, Sebastian; Kemper, Melanie [2022]: Plastik in Umwelt. Ist Mikroplastik schädlich? URL: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/ist-mikroplastik-schaedlich>.
- [6] Vgl. Bertling, Jürgen; Bannick, Claus Gerhard; Barkmann, Luisa; Braun, Ulrike; Knoblauch, Doris; Kraas, Caroline; Mederake, Linda; Nosić, Franziska; Philipp, Bodo; Rabe, Maike; Sartorius, Ingo; Schritt, Hannes; Stein, Ulf; Wencki, ; Wendt-Potthoff, Katrin; Woidasky, Jörg [2022]: Kunststoff in der Umwelt – ein Kompendium, 2. Auflage 2022, <https://doi.org/10.24406/umsicht-n-647638>.
- [7] Vgl. Brandes, Elke; Cieplik, Stephanie; Fiener, Peter; Henseler, Martin; Herrmann, Frank; Klasmeier, Jörg; Kreins, Peter; Piehl, Sarah; Shiravani, Gholamreza; Wendland, Frank; Wurpts, Andreas [2020]: Modellbasierte Forschung zu Mikroplastik in der Umwelt – Synthesepapier. URL: [https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2020-11/Modellbasierte%20Forschung%20zu%20Mikroplastik%20in%20der%20Umwelt\\_Synthesepapier\\_Brandes%20et%20al\\_2020.pdf](https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2020-11/Modellbasierte%20Forschung%20zu%20Mikroplastik%20in%20der%20Umwelt_Synthesepapier_Brandes%20et%20al_2020.pdf).
- [8] Vgl. Kreuzbruck, Marc; Resch, Julia; Kabasci, Stephan; Ivleva, Natalia P.; Philipp, Bodo; Jongmsa, Rense; Maga, Daniel [2021]: Sachstandspapier zur Bioabbaubarkeit von Kunststoffen. URL: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/qst7-sachstandspapier>.
- [9] Vgl. Beyerl, Katharina; Bogner, Franz; Daskalakis, Maria; Decker, Thomas; Hentschel, Anja; Hinzmann, Mandy; Loges, Bastian; Knoblauch, Doris; Mederake, Linda; Müller, Ruth; Rubik, Frieder; Schweiger, Stefan; Stieß, Immanuel [2022]: Wege zum nachhaltigen Umgang mit Kunststoffen. Kernbotschaften sozialwissenschaftlicher Forschung, GAIA 31/1 [2022]: 51 – 53.
- [10] Eine Übersicht über die erstellten Bildungsmaterialien findet sich unter: <https://bmbf-plastik.de/de/ergebnisse/237>.

## Kapitel 01 Quellen und Eintragspfade von Plastik in die Umwelt

- [1] Barkmann, Luisa; Bitter, Eva; Bitter, Hajo; Czapla, Joke; Engelhart, Markus; Hunger, Cornelia; Kerpen, Jutta; Lackner, Susanne; Masch, Mark; Nunez, Tamar; Raber, Wolf; Steglich, Anja; Weber, Felix; Wolff, Sebastian [2021]: EmiStop Schlussbericht. Identifikation von industriellen Plastik-Emissionen mittels innovativer Nachweisverfahren und Technologieentwicklung zur Verhinderung des Umwelteintrags über den Abwasserpfad. Verfügbar unter: [https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2022-01/2021-12-30\\_EmiStop\\_02WP-L1444A\\_Schlussbericht\\_Final\\_komprimiert.pdf](https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2022-01/2021-12-30_EmiStop_02WP-L1444A_Schlussbericht_Final_komprimiert.pdf).

- [2] Bendt, Ellen; Rabe, Maïke; Stolte, Stefan; Zhang, Ya-Qi; Klauer, Robert; Kraas, Caroline; Alrajoula, Taher; Kolberg, Alexander (2021): Textile Mission. Textiles Mikroplastik reduzieren. Erkenntnisse aus einem interdisziplinären Forschungsprojekt. Abschlussdokument. Verfügbar unter: [https://textilemission.bsi-sport.de/fileadmin/assets/Abschlussdokument-2021/TextileMission\\_Abschlussdokument\\_Textiles\\_Mikroplastik\\_reduzieren.pdf](https://textilemission.bsi-sport.de/fileadmin/assets/Abschlussdokument-2021/TextileMission_Abschlussdokument_Textiles_Mikroplastik_reduzieren.pdf).
- [3] Witzig, Cordula; Wörle, Katharina; Földi, Corinna; Rehm, Raphael; Reuwer, Ann-Katrin; Ellerbrake, K.; Cieplik, Stephanie; Rehorek, Astrid; Freier, Korbinian P.; Dierkes, Georg; Wick, Arne; Ternes, Thomas A.; Fiener, Peter; Klasmeier, Jörg; Zumbülte, Nicole (2021): MicBin Schlussbericht. Mikroplastik in Binnengewässern Untersuchung und Modellierung des Eintrags und Verbleibs im Donauegebiet als Grundlage für Maßnahmenplanung. Verfügbar ab Mai 2022 unter [www.micbin.de](http://www.micbin.de).
- [4] Knoop, Oliver; Al-Azzawi, Mohammed; Bannick, Claus-Gerhard; Beggel, Sebastian; Binder, Ronja; Elsner, Martin; Eslahian, Kyriakos; Freier, Korbinian P.; Funck, Martin; Geist, Jürgen; Gierig, Michael; Götz, Astrid; Griebler, Christian; Hunger, Cornelia; Ivleva, Natalia; Kunaschk, Marco; Meier, Florian; Müller, Ruth; Obermaier, Nathan; Pfaffl, Michael W.; Reichel, Julia; Schönbauer, Sarah; Schwaferts, Christian; Türk, Jochen; Wolf, Carmen; Zhou, Yuxiang; Drewes, Jörg E. (2021): Abschlussbericht. Tracking von (Sub)Mikroplastik unterschiedlicher Identität – Innovative Analysetools für die toxikologische und prozesstechnische Bewertung -SubµTrack. In: Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft. Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/submtrack-schlussbericht>.
- [5] Fuhrmann, Tim; Urban, Ingo; Scheer, Holger; Lau, Philipp; Reinhold, Luisa; Barjenbruch, Matthias; Bauerfeld, Katrin; Meyer, Stefanie (2021): Mikroplastik-Emissionen aus Kläranlagen: Welche Rolle spielt die Abwasserbehandlung? In: KA – Korrespondenz Abwasser, Abfall Bd. 69, Nr. 9, S. 730–741. Verfügbar unter: [http://www.replawa.de/wordpress/wp-content/uploads/2021/09/Fuhrmann-et-al\\_Mikroplastik-Emissionen-aus-Klaeranlagen\\_KA-9-2021.pdf](http://www.replawa.de/wordpress/wp-content/uploads/2021/09/Fuhrmann-et-al_Mikroplastik-Emissionen-aus-Klaeranlagen_KA-9-2021.pdf).
- [6] REPLAWA: Mikroplastik-Einträge über das Abwasser in die aquatische Umwelt, Handlungsempfehlungen zur Verringerung von Mikroplastik-Einträgen im Bereich der Abwasserentsorgung, unveröffentlicht. Voraussichtlich verfügbar ab Juni 2022, unter: [www.replawa.de](http://www.replawa.de).
- [7] Barkmann, Luisa; Weber, Felix; Raber, Wolf; Masch, Mark; Wolff, Sebastian; Bitter, Hajo; Bitter, Eva; Kerpen, Jutta; Ackner, Susanne; Engelhart, Markus (2021): Industrielle Mikroplastik-Emissionen - Handlungsempfehlungen. Verfügbar unter: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/20230>.
- [8] MicroCatch\_Balt (2021): Abschlussbericht MicroCatch\_Balt. Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/microcatchbalt-abschlussbericht>.
- [9] InRePlast (2022): Projektergebnisse InRePlast, unveröffentlicht. Voraussichtlich verfügbar ab 2022 unter [www.inreplast.de](http://www.inreplast.de).
- [10] Venghaus, Daniel; Schmerwitz, Frank; Reiber, Jens; Sommer, Harald; Lindow, Franklin; Herper, Dominik; Pohrt, Roman; Barjenbruch, Matthias (2021): Abschlussbericht. Reifenabrieb in der Umwelt - RAU. Verfügbar unter: [https://www.rau.tu-berlin.de/fileadmin/fg118/RAU/20210728\\_Abschlussbericht\\_RAU\\_FINAL\\_Team.pdf](https://www.rau.tu-berlin.de/fileadmin/fg118/RAU/20210728_Abschlussbericht_RAU_FINAL_Team.pdf).
- [11] Müller, Axel; Kocher, Birgit; Altmann, Korinna; Braun, Ulrike (2022): Determination of tire wear markers in soil samples and their distribution in a roadside soil. In: Chemosphere Bd. 294. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.133653.
- [12] Kernchen, Sarmite; Löder, Martin G.J.; Fischer, Franziska; Fischer, Dieter; Moses, Sonya R.; Georgi, Christoph; Nölscher, Anke C.; Held, Andreas; Laforsch, Christian (2021): Airborne microplastic concentrations and deposition across the Weser River catchment. In: The Science of the Total Environment Bd. 818. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151812.
- [13] Conversio Market & Strategie GmbH (2020): Analyse von Wasserkraftwerken. Teilbericht zu MicBin AP 4.1. Verfügbar unter: [https://www.bkv-gmbh.de/files/bkv-neu/studien/MicBin\\_Report\\_BKV\\_Analyse\\_Wasserkraftwerke\\_\\_AP\\_4.1\\_\\_Juni\\_2020.pdf](https://www.bkv-gmbh.de/files/bkv-neu/studien/MicBin_Report_BKV_Analyse_Wasserkraftwerke__AP_4.1__Juni_2020.pdf).
- [14] Bertling, Jürgen; Bannick, Claus Gerhard; Barkmann, Luisa; Braun, Ulrike; Knoblauch, Doris; Kraas, C.; Mederake, Linda; Nusic, Franziska; Bodo, Philipp; Rabe, Maïke; Sartorius, Ingo; Schritt, Hannes; Ulf, Stein; Wencik, Kristina; Wendt-Potthoff, Katrin; Woidasky, Jörg (2022): Kunststoff in der Umwelt – ein Kompendium. Kunststoff in der Umwelt – ein Kompendium, 2. Auflage 2022. <https://doi.org/10.24406/umsicht-n-647638>

## Kapitel 02 Ökotoxikologische Bewertung von Mikroplastik als komplexe Aufgabe

- [1] Beggel, Sebastian; Höss, Sebastian; Geist, Jürgen; Hägerbäumer, Arne; Imhof, Hannes; Laforsch, Christian; Pfaffl, Michael W.; Wendt-Potthoff, Katrin (2020): Minimum reporting criteria for microplastic ecotoxicity testing – do we meet our own prerequisites? Poster auf der 30. Jahrestagung der SETAC Europe (Virtuelle Tagung).

## Kapitel 03 Plastik im Abwasser: erfassen, untersuchen, entfernen

- [1] InRePlast (2022): Projektergebnisse InRePlast, unveröffentlicht. Voraussichtlich verfügbar ab 2022 unter [www.inreplast.de](http://www.inreplast.de).
- [2] REPLAWA (2022): Mikroplastik-Einträge über das Abwasser in die aquatische Umwelt, Handlungsempfehlungen zur Verringerung von Mikroplastik-Einträgen im Bereich der Abwasserentsorgung, unveröffentlicht.
- [3] RUSEKU (2022): Schlussbericht RUSEKU, unveröffentlicht. Voraussichtlich verfügbar 2022.
- [4] Schaum, Christian A.; Krause, Steffen; Wick, Natalie; Oehlmann, Jörg; Schulte-Oehlmann, Ulrike; Klein, Kristina; Stiess, Immanuel; Raschewski, Luca; Sunderer, Georg; Birzle-Harder, Barbara; Wencki, Kristina; Lévai, Peter; Mälzer, Hans-Joachim; Schertzinger, Gerhard; Pannekens, Helena; Dopp, Elke; Ternes, Thomas; Dierkes, Georg; Schweyen, Peter; Lauschke, Tim; Schebek, Liselotte; Sakaguchi-Söder, Kaori; Gotschling, Michael; Staaks, Christian; Fischer, Dieter; Fischer, Franziska; Labrenz, Matthias; Klaeger, Ivar do Sul, Juliana A. (2021): Lösungsstrategien zur Verminderung von Einträgen von urbanem Plastik in limnische Systeme – PLASTRAT: Synthesebericht. Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/synthesebericht-plastrat>.
- [5] Witzig, Cordula; Wörle, Katharina; Földi, Corinna; Rehm, Raphael; Reuwer, Ann-Katrin; Ellerbrake, K.; Cieplik, Stephanie; Rehorek, Astrid; Freier, Korbinian P.; Dierkes, Georg; Wick, Arne; Ternes, Thomas A.; Fiener, Peter; Klasmeier, Jörg; Zumbülte, Nicole (2021): MicBin Schlussbericht. Mikroplastik in Binnengewässern Untersuchung und Modellierung des Eintrags und Verbleibs im Donaugebiet als Grundlage für Maßnahmenplanung. Verfügbar ab Mai 2022 unter [www.micbin.de](http://www.micbin.de)
- [6] Knoop, Oliver; Al-Azzawi, Mohammed; Bannick, Claus-Gerhard; Beggel, Sebastian; Binder, Ronja; Elsner, Martin; Eslahian, Kyriakos; Freier, Korbinian P.; Funck, Martin; Geist, Jürgen; Gierig, Michael; Götz, Astrid; Griebler, Christian; Hunger, Cornelia; Ivleva, Natalia; Kunaschk, Marco; Meier, Florian; Müller, Ruth; Obermaier, Nathan; Pfaffl, Michael W.; Reichel, Julia; Schönbauer, Sarah; Schwaferts, Christian; Türk, Jochen; Wolf, Carmen; Zhou, Yuxiang; Drewes, Jörg E. (2021): Abschlussbericht. Tracking von (Sub)Mikroplastik unterschiedlicher Identität – Innovative Analysetools für die toxikologische und prozesstechnische Bewertung -SubµTrack. In: Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft. Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/submtrack-schlussbericht>.
- [7] Barkmann, Luisa; Bitter, Eva; Bitter, Hajo; Czaplá, Joke; Engelhart, Markus; Hunger, Cornelia; Kerpen, Jutta; Lackner, Susanne; Masch, Mark; Nunez, Tamar; Raber, Wolf; Steglich, Anja; Weber, Felix; Wolff, Sebastian (2021): EmiStop Schlussbericht. Identifikation von industriellen Plastik-Emissionen mittels innovativer Nachweisverfahren und Technologieentwicklung zur Verhinderung des Umwelteintrags über den Abwasserpfad. Verfügbar unter: [https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2022-01/2021-12-30\\_EmiStop\\_02WPL1444A\\_Schlussbericht\\_Final\\_komprimiert.pdf](https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2022-01/2021-12-30_EmiStop_02WPL1444A_Schlussbericht_Final_komprimiert.pdf).

## Kapitel 04 Plastik in Böden: Einträge, Verhalten und Verbleib

- [1] Möller, Julia N.; Heisel, Ingrid; Satzger, Anna; Vizsolyi, Eva C.; Oster, S.D. Jakob; Agarwal, Seema; Laforsch, Christian; Löder, Martin G.J. (2021): Tackling the Challenge of Extracting Microplastics from Soils: A Protocol to Purify Soil Samples for Spectroscopic Analysis. In: Environmental Toxicology and Chemistry. DOI: 10.1002/etc.5024.
- [2] Kreuzbruck, Marc; Resch, Julia; Kabasci, Stephan; Ivleva, Natalia P.; Philipp, Bodo; Jongmsa, Rense; Maga, Daniel (2021): Sachstandspapier zur Bioabbaubarkeit von Kunststoffen. Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/qst7-sachstandspapier>.

## Kapitel 05 Unternehmen müssen mehr Verantwortung übernehmen

- [1] Zum Beispiel bei der kommerziellen Radreinigung in Reifenserviceunternehmen beim Kärschern mit Wasser und Pellets. Vgl. Daskalakis, Maria; Breitbarth, Marco; Hentschel, Anja; Kaser, Simon (2022): Verlust in-



dustrieller Plastikpellets: Maßnahmen gegen den Eintrag in die Umwelt sind notwendig. Factsheet 15 des BMBF-Forschungsschwerpunkts Plastik in der Umwelt. Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/factsheet-15-Verlust-industrieller-Pellets>.

- [2] Decker, Thomas; Lippl, Maria; Albrecht, Stephan; Bauer, Klaus D.; Drechsel, Pia; Frommeyer, Britta; Habermehl, Tabea; Heider, Dominik; Holterbosch, Jochem; Klaene, Klaudia; Koch, Julia; Lorenz, Manuel; Menrad, Klaus; Muth, Lea; Niedermeier, Andreas; Sänglerlaub, Sven; Scagnetti, Carla; Schewe, Gerhard; Tornow, Maren; Van den Adel, Friederike; von Gehlen, Kristina [2021]: Verbraucherreaktionen bei Plastik und dessen Vermeidungsmöglichkeiten am Point of Sale [VerPlaPoS]. Abschlussbericht. Verfügbar unter: [https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-06/Abschlussbericht%20\\_VerPlaPoS\\_2021.pdf](https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-06/Abschlussbericht%20_VerPlaPoS_2021.pdf).

## Kapitel 06 Noch nicht ausreichend effizient: Abfallwirtschaft und Recycling

- [1] Kusch, Anina; Gasde, Johannes; Deregowski, Carolin; Woidasky, Jörg; Lang-Koetz, Claus; Viere, Tobias [2021]: Sorting and Recycling of Lightweight Packaging in Germany — Climate Impacts and Options for Increasing Circularity Using Tracer-Based-Sorting. In: Materials Circular Economy [2021] Bd. 3, Nr. 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42824-021-00022-6>.
- [2] INEOS Styrolution: Styrolution Portal – ResolVe Project. Verfügbar unter: [https://www.ineos-styrolution.com/portal/resolve\\_project](https://www.ineos-styrolution.com/portal/resolve_project).
- [3] Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft [2021]: ALPLA unterstützt schiffsgestützte Recyclinganlage. Verfügbar unter: [http://www.kuwert.hs-bremen.de/downloads/2021-04-23\\_Pressemitteilung\\_Alpla-KuWert.pdf](http://www.kuwert.hs-bremen.de/downloads/2021-04-23_Pressemitteilung_Alpla-KuWert.pdf).
- [4] Eichert, Carsten; Biermann, Lars; Salikov, Vitalij; Brepohl, Esther; Müller, Clemens; Paschetag, Mandy; Scholl, Stephan [2021]: Recycling von PET-Verpackungen: Innovatives PET-Recycling aus Mehrschichtverbunden. Factsheet 6 des BMBF-Forschungsschwerpunkts Plastik in der Umwelt. Verfügbar unter: [https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-05/FactSheet\\_revolvePET\\_06.pdf](https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-05/FactSheet_revolvePET_06.pdf).
- [5] INEOS Styrolution [2019]: Breakthrough in chemical recycling of polystyrene. Verfügbar unter: [https://www.ineos-styrolution.com/INTERSHOP/static/WFS/Styrolution-Portal-Site/-/Styrolution-Portal/en\\_US/News%20and%20media/PR-040919-Chemical-Recycling-PS.pdf](https://www.ineos-styrolution.com/INTERSHOP/static/WFS/Styrolution-Portal-Site/-/Styrolution-Portal/en_US/News%20and%20media/PR-040919-Chemical-Recycling-PS.pdf).
- [6] INEOS Styrolution [2020]: INEOS Styrolution reports final results of research project: post consumer polystyrene waste becomes valuable feedstock. Verfügbar unter: [https://www.ineos-styrolution.com/INTERSHOP/static/WFS/Styrolution-Portal-Site/-/Styrolution-Portal/en\\_US/News%20and%20media/PR-20200622-ResolVe-Wrapup-EN.pdf](https://www.ineos-styrolution.com/INTERSHOP/static/WFS/Styrolution-Portal-Site/-/Styrolution-Portal/en_US/News%20and%20media/PR-20200622-ResolVe-Wrapup-EN.pdf).

## Kapitel 07 Wie Kommunen zu weniger Kunststoffemissionen beitragen können

- [1] INFA [2020]: Ermittlung von Mengenanteilen und Kosten für die Sammlung und Entsorgung von Einwegkunststoffprodukten im öffentlichen Raum. Verfügbar unter: [https://www.vku.de/fileadmin/user\\_upload/Verbandsseite/Presse/Pressemitteilungen/2020/Studie/INFA\\_Studie\\_SUP\\_200818.pdf](https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/Verbandsseite/Presse/Pressemitteilungen/2020/Studie/INFA_Studie_SUP_200818.pdf).
- [2] Venghaus, Daniel; Schmerwitz, Frank; Reiber, Jens; Sommer, Harald; Lindow, Franklin; Herper, Dominik; Pohrt, Roman; Barjenbruch, Matthias [2021]: Abschlussbericht. Reifenabrieb in der Umwelt - RAU. Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/reifenabrieb-der-umwelt-rau-abschlussbericht>.

## Kapitel 08 Begrenzte Möglichkeiten: Welchen Einfluss haben Verbraucher:innen?

- [1] Daskalakis, Maria; Breitbarth, Marco; Hentschel, Anja; Kaser, Simon [2022]: Plastik im Abwasser. Produkte, Eintragswege und Lösungsansätze. Factsheet 18. Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/factsheet-18-plastik-im-abwasser-produkte-eintragswege-und-loesungsansaetze>.
- [2] Wiefek, Jasmin; Steinhorst, Julia; Beyerl, Katharina [2021]: Personal and structural factors that influence individual plastic packaging consumption—Results from focus group discussions with German consumers. In: Cleaner and Responsible Consumption Bd. 3 [2021]. Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/personal-and-structural-factors-influence-individual-plastic-packaging-consumption>.
- [3] Bühren, Christoph, Daskalakis, Maria; Breitbarth, Marco; Hentschel, Anja [2022]: Gegen Plastik in der Umwelt – Wie wirken Aufklärung, Labels und Gebühren? Factsheet 20 des BMBF-Forschungsschwerpunkts Plastik in der Umwelt. Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/factsheet-20-gegen-plastik-in-der-umwelt>.

- [4] Wiefek, Jasmin; Michels-Ehrentraut, Rachel; Stolberg, Andreas; Beyerl, Katharina (2021): Strategien zur Reduktion von Lebensmittelverpackungen. Unverpackt-Konzepte, Mehrweg-Systeme und regionale Versorgungsstrukturen als Ansätze zur reduzierten Nutzung von Einweg-Plastikverpackungen. In: IAAS Policy Brief, Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS) (2021). Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/strategien-zur-reduktion-von-lebensmittelverpackungen-unverpackt-konzepte-mehrweg>.
- [5] Daskalakis, Maria; Kaser, Simon; Breitbarth, Marco; Hentschel, Anja (2022): EU-Einwegkunststoffrichtlinie - Inhalte, Defizite und Anforderungen an ihre Weiterentwicklung. Factsheet 19. Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/factsheet-19-eu-einwegkunststoffrichtlinie-inhalte-defizite-und-anforderungen-an-ihre-weiterentwicklung>.
- [6] Raab, Patricia; Bogner, Franz X. (2021): Knowledge acquisition and environmental values in a microplastic learning module: Does the learning environment matter? In: Studies in Educational Evaluation Bd. 71 (2021). DOI: 10.1016/j.stueduc.2021.101091.
- [7] Steinhorst, Julia; Beyerl, Katharina (2021): First reduce and reuse, then recycle! Enabling consumers to tackle the plastic crisis – Qualitative expert interviews in Germany. In: Journal of Cleaner Production Bd. 313 (2021). Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/first-reduce-and-reuse-then-recycle-enabling-consumers-tackle-plastic-crisis>.
- [8] Beyerl, Katharina; Bogner, Franz X.; Daskalakis, Maria; Decker, Thomas; Hentschel, Anja; Hinzmann, Mandy; Loges, Bastian; Knoblauch, Doris; Mederake, Linda; Müller, Ruth; Rubik, Fieder; Schweiger, Stefan; Stieß, Immanuel (2022): Wege zum nachhaltigen Umgang mit Kunststoffen. Kernbotschaften sozialwissenschaftlicher Forschung. In: GAIA Bd. 31 (2022), Nr. 1.

## Kapitel 09 Wesentliche Fortschritte in der Mikroplastik-Analytik

- [1] Braun, Ulrike; Stein, Ulf; Schritt, Hannes; Altmann, Korinna; Bannick, Claus Gerhard; Becker, Roland; Bitter, Hajo; Bochow, Mathias; Dierkes, Georg; Enders, Kristina; Eslahian, Kyriakos; Fischer, Dieter; Földi, Corinna; Fuchs, Monika; Gerdts, Gunnar; Hagendorf, Christian; Heller, Claudia; Ivleva, Natalia; Jekel, Martin; Kerpen, Jutta; Klaeger, Franziska; Knoop, Oliver; Labrenz, Matthias; Laforsch, Christian; Obermaier, Nathan; Primpke, Sebastian; Reiber, Jens; Richter, Susanne; Ricking, Mathias; Scholz-Böttcher, Barbara; Stock, Friederike; Wagner, Stephan; Wendt-Potthoff, Katrin; Zumbülte, Nicole (2020): Statuspapier im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Plastik in der Umwelt Mikroplastik-Analytik Probennahme, Probenaufbereitung und Detektionsverfahren. Verfügbar unter: [https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2020-11/Statuspapier\\_Mikroplastik%20Analytik\\_Plastik%20in%20der%20Umwelt\\_2020.pdf](https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2020-11/Statuspapier_Mikroplastik%20Analytik_Plastik%20in%20der%20Umwelt_2020.pdf).
- [2] Altmann, Korinna; Braun, Ulrike; Fischer, Dieter; Fischer, Franziska; Ivleva, Natalia; Sturm, Heinz; Witzig, Cordula; Zumbülte, Nicole (2021): QST1: Vergleichsversuch. Ergebnisse. Verfügbar unter: [https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-02/210204\\_PidU\\_Vergleichsversuch\\_Ergebnisse\\_final.pdf](https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-02/210204_PidU_Vergleichsversuch_Ergebnisse_final.pdf).

## Kapitel 10 Rechtliche Empfehlungen zur Reduktion von Kunststoffemissionen

- [1] Beyerl, Katharina; Bogner, Franz X.; Daskalakis, Maria; Decker, Thomas; Hentschel, Anja; Hinzmann, Mandy; Loges, Bastian; Knoblauch, Doris; Mederake, Linda; Müller, Ruth; Rubik, Fieder; Schweiger, Stefan; Stieß, Immanuel (2022): Wege zum nachhaltigen Umgang mit Kunststoffen. Kernbotschaften sozialwissenschaftlicher Forschung. In: GAIA Bd. 31 (2022), Nr. 1.
- [2] Vgl. Bertling, Jürgen; Bannick, Claus Gerhard; Barkmann, Luisa; Braun, Ulrike; Knoblauch, Doris; Kraas, Caroline; Mederake, Linda; Nosić, Franziska; Philipp, Bodo; Rabe, Maike; Sartorius, Ingo; Schritt, Hannes; Stein, Ulf; Wencki, ; Wendt-Potthoff, Katrin; Woidasky, Jörg (2022): Kunststoff in der Umwelt – ein Kompendium, 2. Auflage 2022, <https://doi.org/10.24406/umsicht-n-647638>.
- [3] Jakobi, Anja P.; Loges, Bastian; Hänschen, Ronja (2022): Regulatory Activism against Plastic Pollution. Assessing Anti-Plastics Policies Worldwide. Under Review.
- [4] Daskalakis, Maria; Kaser, Simon; Breitbarth, Marco; Hentschel, Anja (2022): EU-Einwegkunststoffrichtlinie - Inhalte, Defizite und Anforderungen an ihre Weiterentwicklung. Factsheet 19. Verfügbar unter: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/factsheet-19-eu-einwegkunststoffrichtlinie-inhalte-defizite-und-anforderungen-an-ihre-weiterentwicklung>.

# Abbildungsverzeichnis

Titel: Emily Bernal / unsplash.com

S. 8 links: Jaroslav Machacek / fotolia.com

S. 8 rechts: Varun Gaba / unsplash.com

S. 11: Katharina Wörle / Bayerisches Landesamt für Umwelt

S. 12 links: Luisa Barkmann / TU Darmstadt

S. 12 rechts: Cordula Witzig / TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser

S. 14: Julian Brehm / Uni Bayreuth

S. 15: Lena Aebli / Ecologic Institut

S. 16: Ivan Bandura / unsplash.com

S. 18: Tim Fuhrmann / Emscher Wassertechnik GmbH

S. 20: Gabriel Jimenez / unsplash.com

S. 21: Thomas Decker / Hochschule Weihenstephan-Triesdorf

S. 22: iamporpla / iStockPhoto.com

S. 23 links: Anne Rech

S. 23 rechts: Luisa Barkmann / TU Darmstadt

S. 24: Mandy Hinzmann / Ecologic Institut

S. 26 links: RITTEC Umwelttechnik / borowiakziehe, Mathias Mensch

S. 26 rechts: RitaE / pixaby.com

S. 28: Ropable / commons.wikimedia.org

S. 29: G. Wahl / Adobe Stock

S. 30: John Cameron / unsplash.com

S. 32: Brian Yurasits / unsplash.com

S. 33: Jonathan Chng / unsplash.com

S. 34: Jennifer Rahn / Ecologic Institut

S. 35: Lisa Fotios / pexels.com

S. 36: Stefan Dittmar / TU Berlin

S. 38: Cordula Witzing / TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser

S. 39 links: Stephan Röhl

S. 39 rechts: Stephan Röhl

S. 40: Stephan Röhl

S. 43: Doris Knoblauch / Ecologic Institut



<https://bmbf-plastik.de/de/home>

ISBN 978-3-937085-36-4

