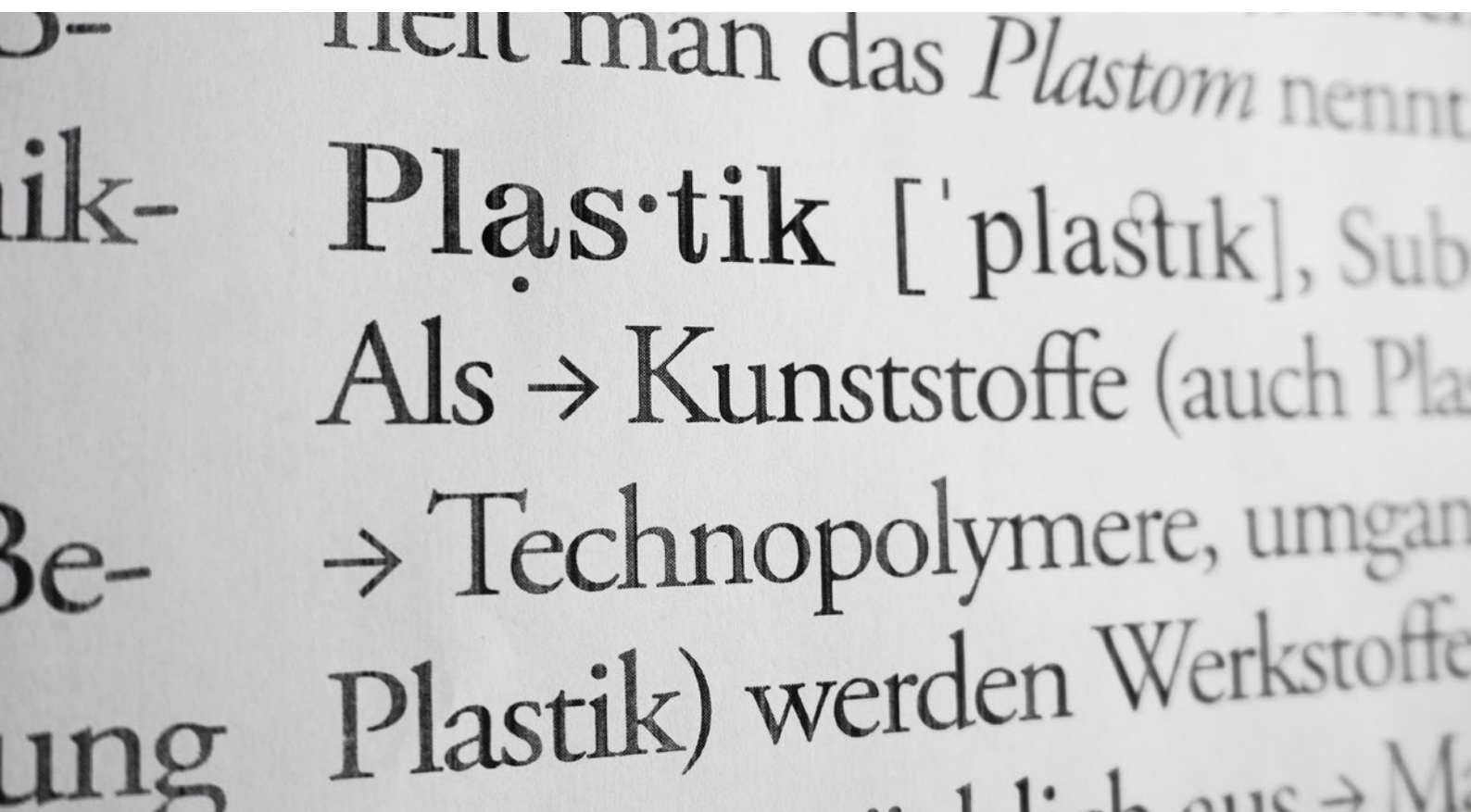


BMBF-Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt –
Quellen • Senken • Lösungsansätze“

Kunststoff in der Umwelt

ein Kompendium



EINE INITIATIVE 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 99 57-3890
Fax: +49 (0)228 99 57-83890
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)721 608-24935
Fax: +49 (0)721 608-923235
E-Mail: saskia.ziemann@kit.edu

Editor

Wissenschaftliches Begleitvorhaben (PlastikNet) des BMBF-Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt – Quellen • Senken • Lösungsansätze“
Doris Knoblauch und Dr. Ulf Stein
Ecologic Institut gemeinnützige GmbH
E-Mail: plastiknet@ecologic.eu
Tel: +49 (30) 86880-0
Fax: +49 (30) 86880-100
Website: <https://bmbf-plastik.de>
Twitter: @plastik_umwelt

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Förderkennzeichen: 02WPL1441.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.
Das Kompendium ist nicht für den gewerblichen Vertrieb bestimmt (© CC BY-NC).

2. überarbeitete Auflage, Februar 2022

Graphisches Konzept und Layout: Lena Aebli

https://bmbf-plastik.de/de/Publikation/Kompendium_Kunststoff-in-der-Umwelt_2022

Doi: <https://doi.org/10.24406/umsicht-n-647638>

ISBN: 978-3-937085-35-7

Zitiervorschlag:

J. Bertling*, C. G. Bannick, L. Barkmann, U. Braun, D. Knoblauch, C. Kraas, L. Mederake, F. Nosić, B. Philipp, M. Rabe, I. Sartorius, H. Schritt, U. Stein, K. Wencki, K. Wendt-Potthoff, J. Woidasky (2022): Kunststoff in der Umwelt – ein Kompendium, 2. Auflage 2022. <https://doi.org/10.24406/umsicht-n-647638>

*Korrespondenzautor

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	04
Einleitung	06
01 Umweltkompartimente	08
02 Biologische Systeme	10
03 Werkstoffe und Polymere	12
04 Entstehung von Kunststoffemissionen	16
05 Mikro- und Makroplastik	20
06 Charakterisierung von Partikeln und Fasern	22
07 Transfer und Rückhaltung von Kunststoffemissionen im Bereich Abwasser	26
08 Verhalten und Verbleib von Kunststoffen in der Umwelt	30
09 Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft	34
10 Umweltanalytik	38
11 Wirkung von Kunststoffen in der Umwelt	42
12 Toxikologische Untersuchungen	44
13 Bewertungsverfahren für Kunststoffeinträge in die Umwelt	46
Autor*innen	48
Stichwortverzeichnis	50
Abbildungsverzeichnis	54

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AbwV	Abwasserverordnung
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
Bio-PE	Biobasiertes PE
Bio-PET	Biobasiertes PET
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BR	Butadien-Kautschuk
CFK	Kohlenstoffaserverstärkter Kunststoff
CR	Chloropren-Kautschuk
DfE	Design-for-Environment
DfR	Design-for-Recycling
DNA	Desoxyribonukleinsäure
ECHA	Europäische Chemikalienagentur
EP	Epoxidharz
EPS	Expandiertes Polystyrol
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
ESSM	Energie- und Stoffstrommanagement
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
IIR	Isobuten-Isopren-Kautschuk
IR	Isopren-Kautschuk
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LCA	Life Cycle Assessment
LD50	Dosis, deren letaler Effekt sich auf 50% der betrachteten Population bezieht

MF	Melamin-Formaldehydharze
NBR	Acrylnitril-Butadien-Kautschuk
NIR	Nahinfrarot
PA	Polyamid
PBAT	Polybutylenadipat-terephthalat
PBS	Polybutylensuccinat
PC	Polycarbonat
PCL	Polycaprolacton
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PHA	Polyhydroxyalkanoat
PLA	Polylactid
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PUR	Polyurethanhartschäume
PVC	Polyvinylchlorid
RAC	Ausschuss für Risikobewertung der ECHA
REACH-VO	REACH-Verordnung
SAN	Styrol-Acrylnitril-Copolymer
SEAC	Ausschuss für sozioökonomische Auswirkungen der ECHA
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk
TBS	Tracer-Based-Sorting
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

Einleitung

Das Themenfeld „Plastik in der Umwelt“ ist vielfältig und umfassend. Wissenschaftliche Arbeiten auf diesem Gebiet sind deshalb hochgradig inter- und transdisziplinär und erfordern die Zusammenarbeit von Fachleuten aus vielen naturwissenschaftlich-technischen und sozioökonomischen Disziplinen.

Wo verschiedene Disziplinen zusammenkommen, herrscht auch eine gewisse Uneinheitlichkeit bei der Bezeichnung von Dingen: Begriffe und Definitionen im technischen und regulatorischen Bereich sind sehr eng mit spezifischen Anwendungsgebieten verbunden. Deshalb existieren für einen Begriff zuweilen unterschiedliche Bedeutungsebenen. Die vorliegende Handreichung soll dazu beitragen, zu einem gemeinsamen Verständnis der zahlreichen relevanten Begriffe zu gelangen. Einen Begriff oder eine Definition für alle Fallgestaltungen wird es dabei nicht immer geben können. Um dieses Problem so weit wie möglich einzugrenzen, identifizieren die Autor*innen jeweils zunächst den Geltungsbereich von Begriffen und Definitionen und legen dies den weiteren Ausführungen zugrunde.

Dieses Kompendium zielt also darauf ab, relevante Begriffe zu schärfen, um zu einem besseren Verständnis innerhalb der heterogenen Community von Plastik in der Umwelt beizutragen. Darüber hinaus soll die Broschüre dazu beitragen, dass die Kommunikation mit und durch außerwissenschaftliche Akteur*innen zum Themenfeld auf ein begrifflich korrektes Fundament gestellt wird, insbesondere in emotional geführten Debatten. Schließlich sind diese Debatten häufig von großer Relevanz für unsere Zukunft, und es erscheint wichtig, dass die notwendigen politischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entscheidungen auf Basis einer wissens- und sachorientierten Faktenlage getroffen werden können.

Der Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt“

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert im Rahmen des Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt – Quellen • Senken • Lösungsansätze“ (www.bmbf-plastik.de) insgesamt 20 Verbundprojekte und ein wissenschaftliches Begleitvorhaben im Zeitraum 2017–2021 mit rund 40 Mio. Euro.

Ziel der Forschungen ist es, erstmals Probleme im Zusammenhang mit Kunststoffabfällen in ihrer Gesamtheit wissenschaftlich zu erfassen und vorhandene Wissenslücken zu schließen. Mehr als 100 Institutionen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Praxis sind an diesem aktuell weltweit größten Forschungsschwerpunkt zur Wirkung von Plastik auf die Umwelt beteiligt. Die Forschungsprojekte lassen sich fünf verschiedenen Themenfeldern zuordnen, welche entlang des gesamten Lebenszyklus der Kunststoffe ausgerichtet sind:

- **Green Economy: Stoffströme, Wertschöpfungsketten, Technologien**
- **Konsum, Verbraucherverhalten, Handel und Produktion, Governance**
- **Recyclingtechnologien**
- **Eintragspfade, Transport, Zersetzung und Verbleib in limnischen Systemen**
- **Meere und Ozeane als Senke und Akkumulationsraum**

Der interdisziplinäre Charakter des Forschungsschwerpunktes soll ein besseres Verständnis der Umweltwirkungen unerwünschter Kunststoffeinträge ermöglichen, angefangen von den Böden über Flusseinzugsgebiete bis in die Meere hinein. Außerdem sollen Lösungsansätze zur Reduktion und Vermeidung des Eintrags identifiziert und umgesetzt werden. Das Themenspektrum reicht von der Verbesserung bestimmter Kunststoffmaterialien im

Hinblick auf ihre umweltverträgliche Abbaubarkeit über die Untersuchung von Eintragungspfaden in Böden und Gewässer sowie die Analyse möglicher toxischer Wirkungen auf aquatische Organismen bis zur Stärkung des Umweltbewusstseins der Konsument*innen. Als zentrale Anwender und Umsetzer von Innovationen sind Unternehmen seit Beginn der Arbeiten in die Entwicklung und Realisierung der Forschungsvorhaben eingebunden.

Zu diesem Kompendium

Das vorliegende Kompendium wurde im Rahmen des Querschnittsthemas 3 „Begriffe und Definitionen“ des BMBF-Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt“ erarbeitet. Es beschränkt sich auf die Erläuterung wesentlicher Begriffe mit Relevanz für den Forschungsschwerpunkt und zielt auf eine einheitliche Sprachregelung innerhalb des Forschungsschwerpunkts sowie in der Kommunikation nach außen ab.

Das Kompendium arbeitet dabei vor allem mit bestehenden Definitionen (u. a. DIN/CEN/ISO-Normen oder rechtliche Definitionen aus der bundesdeutschen Gesetzgebung); eine eigene Definitionsarbeit wird nur sehr begrenzt geleistet. Das Kompendium macht außerdem deutlich, wie Begriffe korrekt verwendet und welche Begriffe nicht gebraucht werden sollten.

Wissenschaftler*innen aus den folgenden Verbundprojekten des Forschungsschwerpunkts haben sich über Workshops und Feedbackschleifen an der Erstellung des Kompendiums beteiligt: ENSURE, EmiStop, Innoredux, InRePlast, MaReK, MicBin, MicroCatch_Balt, MikroPlaTaS, PlastikBudget, PLASTRAT, RAU, ResolVe, RUSEKU, revolPET, SubµTrack, TextileMission.



01 Umweltkompartimente



Luft (Atmosphäre) ...



... und Boden (Pedosphäre) gehören zu den Umweltkompartimenten und werden auch als Umweltmedien bezeichnet.



Stauhaltungen sind häufig ein Ausgangspunkt für Sedimentation.

Um das Vorkommen und die Verteilung von Kunststoffen in der Umwelt zu beschreiben, werden **Umweltkompartimente** als voneinander abgrenzbare Bereiche der Erde herangezogen. Diese Umweltkompartimente – im hier betrachteten Kontext **Wasser (Hydrosphäre)**, **Boden (Pedosphäre)** und **Luft (Atmosphäre)** – werden im Umweltrecht auch als **Umweltmedien** bezeichnet. Umweltmedien können noch differenzierter entsprechend ihrer Teilkompartimente unterschieden werden.

Grundsätzlich unterscheidet das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) **oberirdische Gewässer**, Küstengewässer und Grundwasser. Oberirdische Gewässer sind definiert als „das ständig oder zeitweilig in Betten fließende oder stehende oder aus Quellen wild abfließende Wasser“ (§ 3 Nr. 1 WHG). **Grundwasser** dagegen ist „das unterirdische Wasser in der Sättigungszone, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht“ (§ 3 Nr. 3 WHG).

Um Gewässer nachhaltig bewirtschaften zu können, werden mehr oder weniger homogene Einheiten mit weitgehend ähnlichen Eigenschaften zusammengefasst. Entsprechend werden nach § 3 Nr. 6 WHG einheitliche und bedeutende Abschnitte eines oberirdischen Gewässers oder Küstengewässers als **Oberflächenwasserkörper** angesprochen. Analog dazu werden abgegrenzte Grundwasservolumen innerhalb eines Grundwasserleiters oder mehrerer Grundwasserleiter als **Grundwasserkörper** bezeichnet. Meeressgewässer umfassen laut § 3 Nr. 2a WHG die Küstengewässer sowie die Gewässer im Bereich der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone und des Festlandssockels, jeweils einschließlich des Meeresgrundes und des Meeresuntergrundes. Als Küstengewässer gelten dabei die Meeresbereiche zwischen der Küstenlinie bei mittlerem Hochwasser und der deutschen Hoheitsgrenze (12-Seemeilen-Grenze) (vgl. § 3 Nr. 2 WHG).

Kunststoffe können an unterschiedlichen Stellen in den natürlichen Wasserkreislauf gelangen. Im Verlauf der oberirdischen Gewässer nimmt der Oberflächenabfluss kontinuierlich zu, angefangen an den Quellen über die Bäche, Flüsse, bis hin zu **Übergangsgewässern** wie den Ästuaren. Der Transport der Kunststoffpartikel erfolgt dabei entweder in der Wassersäule schwebend oder an der Oberfläche schwimmend. Dabei kann es zur zwischenzeitlichen oder endgültigen Sedimentation

und Ablagerung im **Sediment** kommen. Daraus folgend kann auch ein Transport mit dem Geschiebe – die von einem Gewässer an seinem Grund transportierten Feststoffe – erfolgen. Sedimente bestehen aus Ansammlungen verschiedener organischer und/oder mineralischer Lockermaterialien, die zumeist am Grund eines Gewässers, aber auch an seinen Ufern akkumuliert wurden. Ausgangspunkt für Sedimentation in Fließgewässern ist häufig eine Verminderung der Fließgeschwindigkeit, wie sie insbesondere vor **Stauhaltungen** zu beobachten ist, beispielsweise bei Wehren oder Talsperren sowie bei Übergangs- oder Küstengewässern.

Kunststoffpartikel treten nicht nur im Abwasser, sondern auch in den Oberflächengewässern auf. Wichtige Begriffe hierzu sind in Kapitel 7 erläutert.

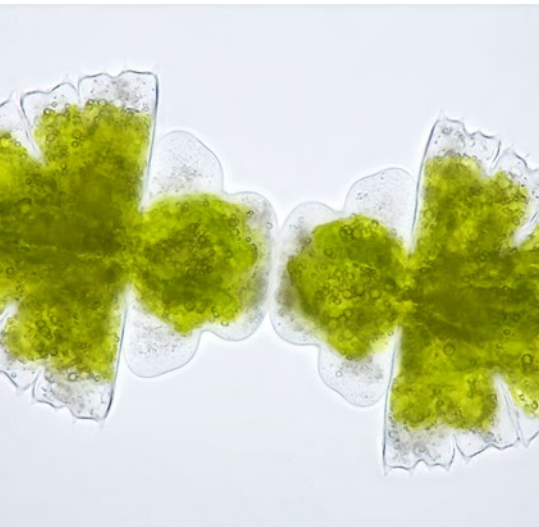
Kunststoffpartikel sind auch im Boden anzutreffen. Das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) definiert Boden als die obere Schicht der Erdkruste, sofern sie Träger bestimmter Bodenfunktionen ist. Das schließt auch die flüssigen (**Bodenlösung**) und gasförmigen Bestandteile (**Bodenluft**) des Bodens, nicht aber Grundwasser und Gewässerbetten mit ein (§ 2 Abs. 1 BBodSchG). Die Bodenfunktionen werden in § 2 Abs. 2 BBodSchG näher beschrieben.

Kunststoffe kommen in der Luft v. a. als Reifenabrieb in für den Umwelt- oder Gesundheitsschutz relevanten Konzentrationen vor. In der 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BlmSchV) ist Luft definiert als die Außenluft in der Troposphäre (ausgenommen sind dabei Arbeitsstätten, zu denen die Öffentlichkeit normalerweise keinen Zugang hat). Die Troposphäre ist dabei die 8 bis 16 km dicke unterste Schicht der Atmosphäre. International wird Atmosphäre definiert als "the envelope of gases surrounding the Earth" (United Nations General Assembly 2015).

Verwendete und weiterführende Literatur:

- Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), zuletzt geändert durch Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465).
- Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetz vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1408).
- Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen - 39. BImSchV) vom 02.08.2010 (BGBl. I S. 1065), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 18. Juli 2018 (BGBl. I S. 1222).
- United Nations General Assembly (2015): Protection of the atmosphere. International Law Commission. Sixty-seventh session. Geneva. A/CN.4/L.851. URL: <https://undocs.org/pdf?symbol=en/A/CN.4/L.851> [zuletzt abgerufen: 28.02.2020].

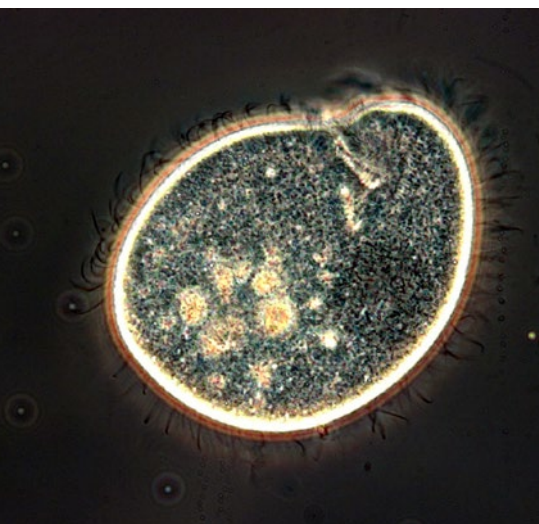
02 Biologische Systeme



Zur Mikroflora gehört auch das Phytoplankton.



Rotalgen sind Teil der Makroflora.



Wimperntierchen (Ciliata) aus einem sauerstoffarmen Tümpel

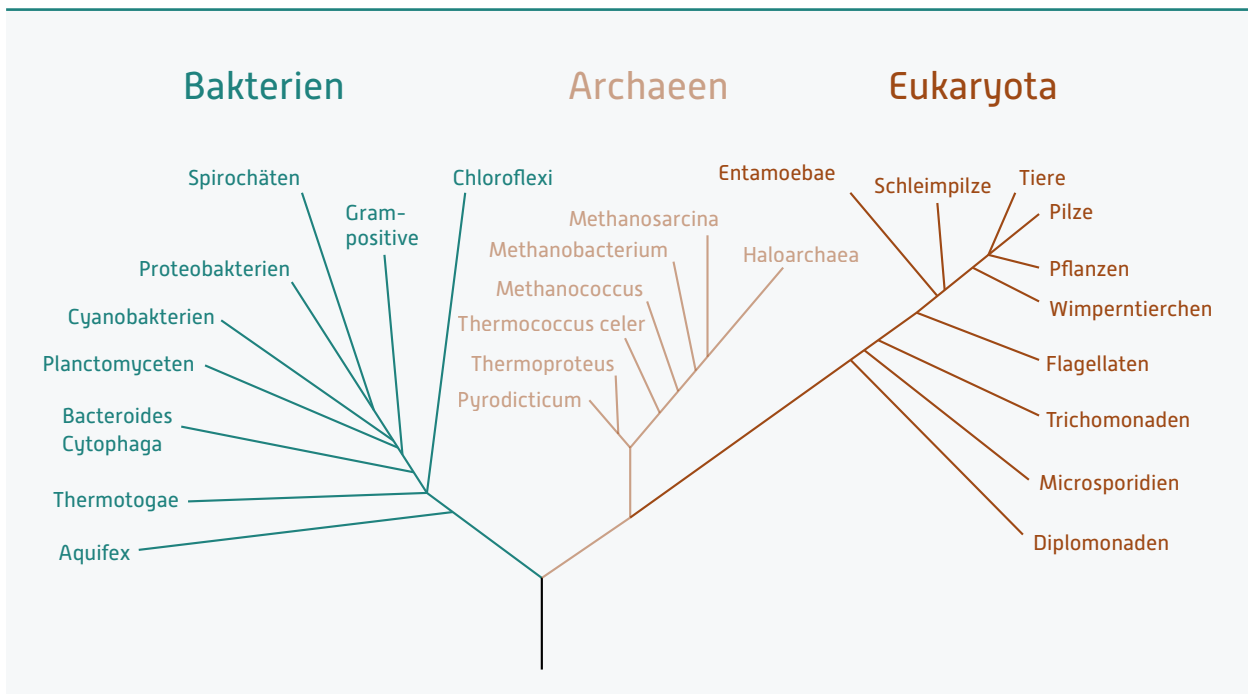
Biologische Systeme sind offene Systeme, die gegenüber ihrer Umgebung durch willkürlich festgelegte Grenzen bestimmt sind und in kontinuierlicher Wechselwirkung mit ihrer Umwelt stehen. Um verschiedene biologische Systeme voneinander abzugrenzen, werden sie entsprechend dem Grad ihrer Verwandtschaftsverhältnisse und Abstammungsgeschichte geordnet und in hierarchisch strukturierte Kategorien klassifiziert. Die Gesamtheit aller Lebewesen in der Umwelt lässt sich in verschiedene **Biota** untergliedern. In erster Linie wird zwischen natürlich vorkommenden Tieren (**Fauna**) und Pflanzen (**Flora**) unterschieden. Innerhalb dieser beiden Kategorien lassen sich größenabhängige Differenzierungen vornehmen. Bodenlebende Tiere zwischen 0,2 mm und 2 mm werden beispielsweise zur **Meiofauna** oder **Mesofauna** gezählt, während größere Tiere der **Makrofauna** (2-20 mm) und kleinere der **Mikrofauna** (< 0,2 mm) zugerechnet werden. Innerhalb der Flora kann zwischen **Mikroflora** (i. d. R. Mikroalgen des Phytoplankton) und **Makroflora** (Makroalgen und Gefäßpflanzen) unterschieden werden.

Der Begriff Mikroflora wird allerdings nicht nur im strengen Sinn – also bezogen auf pflanzliche Mikroorganismen – verwendet, sondern auch allgemein für die einen bestimmten Lebensraum (zum Beispiel Darmtrakt eines Tieres) besiedelnden **Mikroorganismen**. Dazu gehören **Bakterien** und **Archaeen**, die 0,5 µm bis wenige µm groß sind und auch als **Prokaryonten** bezeichnet werden, weil sie keinen definierten Zellkern besitzen. Auch wenn sie mikroskopisch kaum auseinanderzuhalten sind, werden sie aufgrund ihrer biochemischen Unterschiede heute zwei verschiedenen Domänen der Lebensformen zugeordnet (vgl. Abbildung 2; die Länge der Äste zeigt den Grad der Verwandtschaft an; je länger, um so entfernter).

Prokaryonten haben vielfältige Stoffwechselwege, und die Fähigkeit, ohne Sauerstoff (**anaerob**) zu leben und zu wachsen, ist bei ihnen weit verbreitet. Eukaryontische Mikroorganismen, also solche mit echtem Zellkern, umfassen mikroskopisch kleine Pilze und Schleimpilze, Wimperntierchen und Flagellaten (Geißeltierchen) (vgl. Abbildung 2). All diese **Mikroorganismen** können sich durch Zellteilung vermehren. Manche können auch als Krankheitserreger wirken. Wenn die Gemeinschaft dieser Organismen

Abbildung 2.1

Phylogenetischer Baum mit den drei Domänen



Quelle: eigene Darstellung nach Carl Woese, u. a. basierend auf den Sequenzen der rRNA

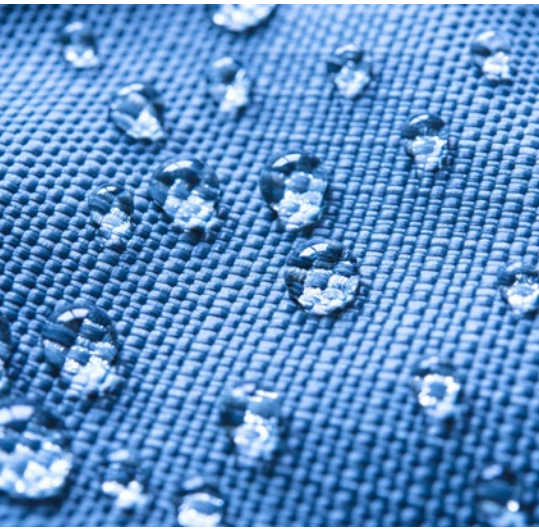
sich aktiv an eine Oberfläche anheftet (zum Beispiel Darmepithel oder natürlichem Wasser ausgesetzte Materialien), spricht man von einem **Biofilm**. Dieser enthält außer den Zellen (meist mehrheitlich Bakterien) sogenannte extrazelluläre polymere Substanzen. Sie halten den Biofilm zusammen, schützen die Zellen und sorgen durch ihre oft schleimige Konsistenz dafür, dass auch externe Stoffe an der Biofilmoberfläche anhaften können.

Die Gesamtheit aller im Boden vorkommenden Lebewesen (inkl. Pflanzen und Pilzen) können als **Edaphon** bezeichnet werden, alle in der Bodenzone eines Gewässers (**Benthal**) als **Benthos**. Dieser Begriff lässt sich ebenfalls mit Größenklassen und Zugehörigkeit zur Bezeichnung der Untergruppen **Makrozoobenthos**, **Makrophytobenthos**, Meiobenthos, Mikrozoobenthos und Mikrophytobenthos kombinieren.

Verwendete und weiterführende Literatur:

- Spektrum Akademischer Verlag [1999]: Lexikon der Biologie. Heidelberg. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/> [zuletzt abgerufen: 16.03.2020].
- Woese, Carl R.; Kandler, Otto; Wheelis, Mark L. (1990): Towards a natural system of organisms: Proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA. Band 87, 1990, S. 4576–4579.

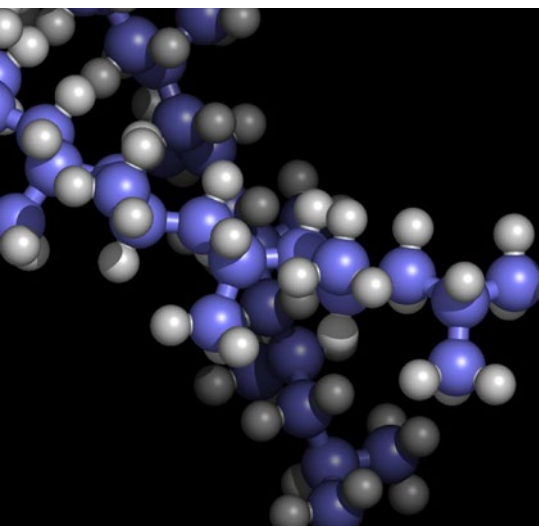
03 Polymerwerkstoffe



Additive können die wasserabweisenden Eigenschaften von Polymerwerkstoffen erhöhen.



Polymerwerkstoffe haben diverse Eigenschaften, wie z. B. die Dehnbarkeit eines Gummibandes.



Kugel-Stab-Model eines Polypropylens

Kunststoffe – im deutschen Sprachgebrauch auch umgangssprachlich „**Plastik**“ oder „**Plaste**“ genannt – sind Werkstoffe oder Materialien, die überwiegend aus **Makromolekülen** bestehen. In der Praxis wird von Makromolekülen gesprochen, wenn eine Molmasse größer 10.000 g/mol vorliegt. Synthetische **Polymere** sind Makromoleküle bestehend aus strukturellen, chemischen Wiederholungseinheiten. Eine solche strukturelle Wiederholungseinheit wird **Monomer** genannt. Eine kleine, unspezifische Anzahl von chemisch verknüpften Monomeren wird als **Oligomer** bezeichnet. Werden zwei verschiedene Monomereinheiten in einem Polymer kombiniert, wird das als Copolymer bezeichnet. Es muss darauf hingewiesen werden, dass diese praxisnahe Begriffsverwendung nicht identisch ist mit der regulatorischen Definition in der REACH-Verordnung (REACH-VO) – hier werden bereits sehr viel kleinere Moleküle den Polymeren zugerechnet und insbesondere auf die Molmassenverteilung als Abgrenzungskriterium für Polymere und Nicht-Polymere Bezug genommen.

Ein Kunststoff besteht neben einem polymeren Grundgerüst auch aus Additiven, Füllstoffen und Verstärkungsmaterialien. **Additive** können die Verarbeitungseigenschaften eines Kunststoffwerkstoffs verbessern, wie z. B. Gleitmittel oder Entformungsmittel. Weitere Additive sind Antioxidantien, welche während der Verarbeitung des Polymers insbesondere vor Oxidation schützen sowie als Stabilisator gegen UV-Degradation und gegen Oxidation in der Anwendung wirksam sind. Additive können auch die Funktion haben, spezifische Eigenschaften eines Polymers zu optimieren oder diese an eine Anwendung anzupassen. Dazu zählen u. a. Farbstoffe, Weichmacher, Flammschutzmittel, Vernetzungsmittel oder Nukleierungsmittel, Antistatika, Anti-Fogging-Mittel oder antimikrobielle Zusatzstoffe. Der Anteil der Additive in Kunststoffen ist in der Regel gering (< 1 Prozent). Ausnahmen bilden z. B. Weichmacher in Polyvinylchlorid oder teilweise halogenfreie Flammschutzmittelformulierungen, in denen Additive durchaus auch im zweistelligen Prozentbereich enthalten sein können.

Füllstoffe liegen in Kunststoffen in der Regel als inerte Bestandteile vor. Sie dienen zur Streckung und Einsparung der polymeren Matrix, können aber auch maßgeblich die Funktionalität des Werkstoffes, insbe-

sondere seine mechanischen und thermischen Eigenschaften, beeinflussen. Füllstoffe, v. a. Kurzglasfasern, werden häufig im zweistelligen Prozentbereich eingesetzt.

Werden synthetische Polymere während der Verarbeitung mit gasfreisetzenden Additiven oder Treibmitteln versetzt, entstehen **Schaumstoffe**, welche sich insbesondere durch eine geringe Dichte, eine geringe Wärmeleitfähigkeit und eine geringe mechanische Stabilität auszeichnen. Je nach verwendetem Polymerausgangsmaterial und Prozessführung können sehr variabel einstellbare Härten erzeugt werden.

Werkstoffe, welche aus zwei oder mehr unterschiedlichen Werkstoffklassen bestehen, werden als **Verbundwerkstoffe** (engl. „composite“) bezeichnet. Sie können durch die Kombination ihrer stofflichen Eigenschaften, ihre geometrische Anordnung und Dimensionierung andere Werkstoffeigenschaften erreichen als die Einzelkomponenten. Typische Anwendungen für Verbundwerkstoffe wie glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) oder kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK, Carbon) sind z. B. die Rotorblätter von Windkraftanlagen oder der Leichtbau im Automobilsektor.

Kunststoffe werden nach Art ihrer Kettenverknüpfung und der daraus resultierenden Verformbarkeit klassifiziert. In **Thermoplasten** liegen isolierte Ketten vor, in **Duroplasten** ein engmaschig verknüpftes Netzwerk aus polymeren Ketten und in **Elastomeren** (umgangssprachlich **Kautschuk**, **Gummi** genannt) ein weitmaschiges Netzwerk. Diese Einteilung klassifiziert auch die jeweiligen Verarbeitungs- und Funktionseigenschaften. Es existieren für die Werkstoffklassen jeweils sehr typische Vertreter, welche im Folgenden differenziert dargestellt werden. Jedoch können durch geeignete Auswahl der polymeren Bausteine und durch die Verarbeitungsbedingungen auch Materialien erzeugt werden, die einen Übergang der Funktionseigenschaften darstellen, z. B. thermoplastische Elastomere oder duromere Weichschäume.

Thermoplaste können wiederholt aufgeschmolzen und sehr variabel geformt werden. Die Molekülketten in Thermoplasten können **amorph** (ungeordnet) oder **teilkristallin** (in teilweise geordneten Strukturen) vorliegen. Amorphe und teilkristalline Werkstoffe weisen ein charakteristisch unterschiedliches mechanisches Eigenschaftsprofil in Abhängigkeit der Temperatur auf. Die Eigenschaft der Teilkristallinität kann durch die Prozessführung und Additive während der Verarbeitung beeinflusst werden. Typische Beispiele für teilkristalline Kunststoffe sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyamid (PA) und Polyethylenterephthalat (PET). Zu den bekannten amorphen Kunststoffen gehören z. B. Polymethylmethacrylat (PMMA), Polycarbonat (PC), Polystyrol (PS) oder Expandiertes Polystyrol (EPS) und Polyvinylchlorid (PVC). Eine Mischung zweier oder mehrerer dieser Polymere wird als **Blend** bezeichnet.

Elastomere und Duroplaste werden während ihrer Verarbeitung durch **Vernetzung** dauerhaft geformt und können nicht erneut aufgeschmolzen werden. Die weitmaschige Vernetzung der Polymerketten in Elastomeren erlaubt eine sehr hohe Flexibilität, welche sich in der Regel auch in den makroskopischen Eigenschaften bei Umgebungstemperatur (hohe Dehnbarkeit bei geringer Verformung) bemerkbar macht. Beispiele zu synthetischen Elastomeren sind Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM), Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) oder Silikonkautschuk. Im Gegensatz dazu ist die Beweglichkeit der Polymerketten in den engmaschig vernetzten Duroplasten sehr stark eingeschränkt, sodass diese sich bei Umgebungstemperatur in der Regel steif und spröde verhalten. Typische Beispiele von Duroplasten sind Epoxidharze (EP), Melamin-Formaldehydharze (MF) oder Polyurethanhartschäume (PUR). Elastomere und duroplastische Polymerketten liegen nicht geordnet vor, sie sind amorph.

Hervorzuheben sind letztlich noch die Begrifflichkeiten **Klebstoffe** und **Beschichtung** (synonym für Farben, Lacke), welche in der Regel auf verschiedensten, hier nicht weiter erläuterten

Tabelle 3.1

Übersicht verwendeter Begrifflichkeiten für synthetische Polymere

Synthetische Polymere	Kunststoffwerkstoffe, Fasern, Elastomere, Sonstige (Duroplaste, Klebstoffe, Beschichtungen)
Kunststoffe	Kunststoffwerkstoffe, Sonstige (Duroplaste, Klebstoffe, Beschichtungen)
Kunststoffwerkstoffe	Standardkunststoffe, Technische Kunststoffe, PUR
Standardkunststoffe	PE, PP, PVC, PS, EPS, PET (Bottle Grade)
Technische Kunststoffe	PA, PC, PMMA, Styrol-Copolymere (ABS, SAN), weitere Hochleistungskunststoffe
Thermoplaste	Standardkunststoffe, Technische Kunststoffe
Duroplaste	EP, MF
Elastomere	SBR, IR, IIR, BR, NBR, CR

Quelle: PlasticsEurope Deutschland

thermoplastischen und duromeren Polymeren basieren.

Die Temperatur, bei der die amorphen Polymerketten von ihrem eingefrorenen, steifen Zustand in den flexiblen, elastischen Zustand übergehen, wird **Glasübergangstemperatur** genannt. Sie stellt eine wichtige physikalische Eigenschaft der jeweiligen Polymere dar. Bei amorphen Thermoplasten beginnt hier der Erweichungsbereich, der allmählich in den Fließbereich übergeht. Bei teilkristallinen Thermoplasten erweichen die amorphen Bereiche, und es setzt ein Übergang vom spröden in den flexiblen Zustand ein. Bei weiterer Temperaturerhöhung bis zur **Schmelztemperatur** gehen die teilkristallinen Werkstoffe in den fließfähigen Zustand über. Werden Polymere weiter erhitzt, zersetzt sich die molekulare Struktur in kleinere, gasförmige Fragmente. Dieser Vorgang beginnt bei der **Zersetzungstemperatur**. Die häufig auch verwendete Formulierung der **Degradationstemperatur** ist unspezifischer und lässt sich z. T. nur unscharf von der maximalen **Gebrauchstemperatur** abgrenzen.

Kunststoffe können darüber hinaus auch noch nach anderen Kriterien klassifiziert werden.

Eine mögliche Klassifizierung ist die Unterscheidung nach der Herkunft ihrer monomeren Bestandteile und nach ihrer Abbaubarkeit (vgl. Abbildung 3.1).

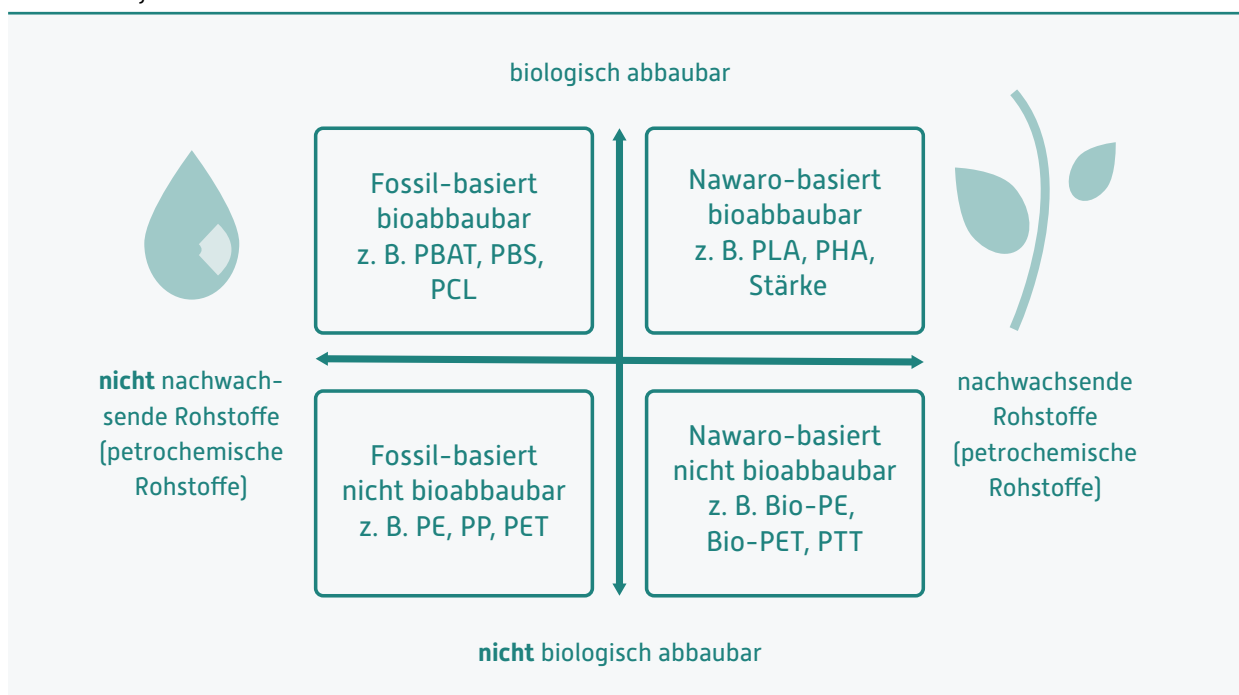
Biobasierte Kunststoffe (auf erneuerbaren Rohstoffen basierende), wie z. B. Polylactid (PLA) und Polyhydroxyalkanoate (PHA), entstammen nachwachsenden Rohstoffquellen (u. a. Cellulose, Stärke aus z. B. Holz, Mais, Zuckerrohr), im Gegensatz zu fossilen (auf nicht-erneuerbaren Rohstoffen basierenden) Kunststoffen wie z. B. PE, PP und PET, welche aus Rohstoffquellen hergestellt werden, die über sehr lange Zeiträume aus Abbauprodukten organischer Materie entstanden sind. **Biologisch abbaubare Kunststoffe** wie z. B. Polybutylenadipaterephthalat (PBAT), Polybutylensuccinat (PBS) oder Polycaprolacton (PCL) können unter bestimmten Bedingungen durch biologische Aktivität enzymatisch umgewandelt werden. Dabei werden anorganische Stoffe (z. B. H₂O, CO₂) freigesetzt. Es besteht kein Zusammenhang zwischen bioabbaubaren und biobasierten Kunststoffen. Fossile und biobasierte Kunststoffe können bioabbaubar sein, gleichzeitig gibt es sowohl biobasierte und fossile Kunststoffe, die nicht bioabbaubar sind. Weiterhin können die Polymere der Kunststoffe unterteilt werden in **natürliche Polymere** oder **synthetische Polymere**. Natürliche Polymere, die chemisch modifiziert werden, sind als **halbsynthetische Polymere** zu bezeichnen (z. B. Naturkautschuk durch Vernetzung mit Schwefel).

Weitere relevante Einteilungen lassen sich anhand der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Kunststoffen vornehmen. Das betrifft z. B. die **Löslichkeit** von Kunststoffen in Wasser oder die Aufnahmefähigkeit von Wasser in Kunststoffen. Kunststoffe, die diese Eigenschaften aufweisen, werden als **wasserlösliche Polymere** (u. a. Polyethylenglycole) oder **gelartige Polymere** (u. a. Polyacrylate) bezeichnet. Als **flüssig** sollten nur Polymere in ihrem fließfähigen Bereich bezeichnet werden, also oberhalb der Schmelztemperatur und ohne zusätzliche Lösungsmittel.

In der Praxis werden unter dem Begriff Kunststoff häufig nur die thermoplastischen und

Abbildung 3.1

Einteilung von Polymeren nach Herkunft ihrer monomeren Bestandteile (fossil oder aus nachwachsenden Rohstoffen) und ihrer Abbaubarkeit



Quelle: eigene Darstellung basierend auf „PlasticsEurope“ sowie Endres/Siebert-Raths 2009

duroplastischen Kunststoffe gefasst. Aus synthetischen Polymeren aufgebaute Elastomere sowie auf überwiegend synthetischen Polymeren basierende technische Produkte (z. B. textile Fasern, Lacke, Reifen) werden häufig separat behandelt. Die Empfehlung für alle Projekte im Rahmen des Forschungsschwerpunktes ist daher immer eine Präzisierung, ob der Begriff „Kunststoff“ oder „Plastik“ im engeren oder im weiteren Sinne verwendet wird. Dies ist insofern sinnvoll, als sich die Untersuchungen und deren Ergebnisse zum einen immer auf den definierten Projektrahmen beziehen, sodass auch nur in diesem Rahmen Aussagen zu treffen sind. Zum anderen erfordert das Thema „Plastik in der Umwelt“ verschiedene Ansätze, um zu Lösungsvorschlägen zu gelangen, daher können diese immer nur bezogen auf das jeweils spezifizierte Problem erarbeitet werden. Dies verlangt auch eine Präzisierung für die Verwendung der Terminologie rund um Polymere bzw. Kunststoffe entweder im weiteren oder im spezifischen, engeren Sinne.

In Bezug auf die werkstoffliche Begrenzung werden der Wortbestandteil „-plastik“ und

der Begriff „Kunststoffe“ in diesem Glossar synonym für einen weiten Kunststoffbegriff verwendet. Dies schließt vor dem Hintergrund, dass der Fokus der gesamten Debatte vor allem auf Umweltaspekte abzielt, wie oben beschrieben sämtliche Polymerwerkstoffe mit ein. Soweit der Begriff „Plastic Litter“ oder auch „Marine Plastic Litter“ im Allgemeinen verwendet wird, ist „Plastik“ in der Regel breit zu verstehen, d. h. stellvertretend für alle möglichen Polymere wie etwa Fasern, Farben, Elastomere u. v. m., und nicht im engeren Sinne als Kunststoffwerkstoffe.

Verwendete und weiterführende Literatur:

- Baur, Erwin; Osswald, Tim A.; Rudolph, Natalie (2013): Saechtling Kunststoff Taschenbuch, 31. Auflage. Carl Hanser Verlag: München.
- Cowie, John M.G. (1997): Chemie und Physik der synthetischen Polymeren: Ein Lehrbuch. Vieweg+Teubner Verlag: Wiesbaden.
- Endres, Hans-Josef; Siebert-Raths, Andrea (2009): Technische Biopolymere, Carl Hanser Verlag.
- ISO (2019): Kunststoffe - Fachwörterverzeichnis - Änderung 1: Weitere Einträge (ISO 472:2013/Amd.1:2018); Dreisprachige Fassung EN ISO 472:2013/A1:2018.
- ISO (2016): Kunststoffe - Kennbuchstaben und Kurzzeichen - Teil 1: Basis-Polymere und ihre besonderen Eigenschaften (ISO 1043-1:2011 + Amd.1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 1043-1:2011 + A1:2016.

04 Entstehung von Kunststoffemissionen



Saatgut oder Dünger wird teilweise mit Kunststoff verkapselt (Beispielbild).



Zu den Kunststoffemissionen zählt u. a. der Reifenabrieb.



Für Plastikmüll am Strand hat sich der Begriff Beach Litter etabliert.

Kunststoffe können während ihres Lebensweges gewollt oder ungewollt in die Umwelt gelangen. Wenn Kunststoffe in Ökosystemen, Organismen oder an Sachgütern kurz- oder langfristig zu nachteiligen Veränderungen führen oder solche nachteiligen Veränderungen erwartet werden, stellen sie für die Umwelt **Schadstoffe** dar, d. h. sie können **schädliche Auswirkungen** auf die Umwelt haben. Zum Nachweis dieser Schädigung durch den Kunststoff müssen allerdings aufwändige Bewertungskonzepte (inkl. Dosis-Wirkungsbeziehungen und darauf aufbauende Kausalketten sowie Risikobewertungen) erarbeitet werden. Diese werden auch im regulatorischen Bereich benötigt.¹

Der Eintrag von Stoffen in die Umwelt durch menschliche Tätigkeit², die dort schädlich wirken oder von denen schädliche Wirkungen erwartet werden, wird als **Emission** (Synonym: **Freisetzung** bzw. **Umwelteintrag**) bezeichnet, ihre Verteilung in der Umwelt als **Transmission** und die Einwirkung an einem bestimmten Ort oder in einem Umweltkompartiment als **Immission**. Die Belastung einzelner Organismen oder Ökosysteme wird **Exposition** genannt.

Als Oberbegriff für alle Einträge von Kunststoffen in die Umwelt durch menschliche Tätigkeit wird der Begriff „**Kunststoffemission**“ im Sinne von Umwelteinträgen empfohlen. Dabei handelt es sich um Emissionen bzw. Einträge von Kunststoffen (analog zu Feinstaubemissionen oder Abgasemissionen) und nicht um Emissionen aus Kunststoffen (beispielsweise flüchtige organische Verbindungen - VOC). Bei Kunststoffemissionen bzw. Kunststoffeinträgen kann zwischen folgenden Pfaden unterschieden werden:

a. einem Produkt bewusst (intendiert) zugesetztes Mikroplastik (s. Kapitel 5) sowie lösliche Polymere in umweltoffenen Anwendungen oder dessen Freisetzung durch Unfälle oder Leckagen,

- 1 Beispielsweise im Rahmen eines Beschränkungsverfahrens der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) in den Ausschüssen für Risikobeurteilungen (RAC) und sozioökonomische Auswirkungen (SEAC). Dies schließt auch die Beachtung von Grenzwerten ein.
- 2 Unter „menschlicher Tätigkeit“ wird jedwede direkte oder indirekte Aktivität des Menschen verstanden, die Emissionen bzw. Umwelteinträge bewirkt. Dazu gehören das Littering, die Freisetzung von Stoffen aus Alltagspraktiken, handwerklichen Tätigkeiten, Maschinen und großtechnischen Anlagen, Landwirtschaft etc.

b. Fragmentierung von Kunststoffobjekten durch mechanische Beanspruchung oder Umwelteinflüsse während der Nutzung,
c. nicht ordnungsgemäße/illegale Entsorgung von Kunststoffobjekten sowie legaler Verbleib in der Umwelt inkl. einer nachgelagerten Fragmentierung zu Mikroplastik.

Der **bewusste (intendierte) Einsatz** von Kunststoffen in bestimmten Produkten in Form von Mikroplastik erfolgt vor allem, weil sich durch die Zugabe bestimmte Funktionalitäten darstellen lassen. Dies können u. a. Reibeffekte (z. B. Microbeads in Kosmetik), Trübungseffekte (z. B. Lichtstreuung an Partikeln in flüssigen Kosmetika, Wasch-, Putz- und Reinigungsmitteln), Viskositätsveränderungen (z. B. in Farben), der Schutz oder die gezielte Freisetzung von Stoffen (z. B. Verkapselung von Saatgut oder Dünger mit Polymeren) oder auch ein verbesserter Kraftabbau auf Kunstrasensportplätzen (z. B. durch ein Infill aus elastomerbasierten Granulaten) sein. Ökologisch relevant ist die Zugabe dann, wenn die Anwendung **umweltoffen** ist, also ein Übergang von einer räumlich begrenzten technischen Anwendung in ein Umweltkompartiment durch vorhersehbare Einwirkungen sehr wahrscheinlich ist oder in Kauf genommen wird. Ein Beispiel ist etwa ein polymerbeschichteter Langzeitdünger für Landwirtschaft und Gartenbau. Gleichwohl ist die Entscheidung, ob eine Anwendung umweltoffen ist oder nicht, häufig nicht trivial (vgl. Kunstrasenplätze und Kosmetik-Microbeads). Die typische Lieferform von Kunststoffwerkstoffen für die kunststoffverarbeitende Industrie sind wenige Millimeter große Kunststoffpellets oder Kunststoffgranulate (s. Kapitel 6). Auch wenn diese in der Regel nicht direkt in Endanwendungen eingesetzt werden (wie etwa Sonderverpackungslösungen beispielsweise für Pflastersteine), können sie durch Unfälle, Havarien oder Leckagen in die Umwelt gelangen.

Unter **Fragmentierung** wird der Zerfall größerer in kleinere Objekte infolge mechanischer, physikalischer, chemischer oder biologischer Rissbildung verstanden. Die Fragmentierung als Folge natürlicher Prozesse wird **Verwitterung**

genannt. Fragmentierung kann an der Oberfläche oder im Volumen stattfinden. Die mechanisch induzierte Fragmentierung der Oberfläche wird auch **Verschleiß** genannt. Verschleißene Objekte als Folge des Kontakts mit anderen Körpern, so spricht man von **Abrasion** oder **Abrieb**. Geschieht der Verschleiß aufgrund mechanischer Belastungen, liegt **Oberflächen-zerrüttung** vor.

Das achtlose Liegenlassen oder Wegwerfen einzelner Objekte (wie Verpackungen oder Zigarettenkippen) unterwegs wird häufig als **Littering** bezeichnet und von vielen Kommunen mit Bußgeldverfahren verfolgt. Auch die Entsorgung über das häusliche Abwasser (z. B. Tamponfolien, Reste von Obstnetzen) gehört zum Littering. Außerdem umfasst Littering auch das Vergessen oder Verlieren von Abfällen und beispielsweise die Verwehungen nicht ausreichend gesicherter Objekte (indirektes Littering). Handelt es sich um Kunststoffobjekte, ist der Begriff **Plastic Litter** etabliert; findet man die Objekte im Meer, werden sie **Marine Plastic Litter** genannt bzw. am Strand **Beach Litter**. Deutsche Entsprechungen für diese Begriffe fehlen. Die häufig gebrauchten Begriffe „Meeresmüll“ und „Vermüllung der Meere“ sind deutlich unschärfer und allein auf Meere bezogen, andere Umweltkompartimente werden vernachlässigt. Illegal entsorgte Kunststoffabfälle, aber auch Kunststoffprodukte, die nach dem Nutzungsende als Makroplastik legal in der Umwelt verbleiben (Rohre, Geogitter und -textilien aus Kunststoff), können durch Umwelteinwirkungen weiter fragmentieren und stellen damit selbst eine Quelle für Mikroplastik dar.

Sekundärrohstoffe wie **Komposte, Gärrückstände** und – zumindest teilweise auch – **Klärschlämme** (vgl. auch Kapitel 7) werden in Deutschland als Düngemittel eingesetzt. Sie stellen häufig **Sekundärquellen** von Kunststoffemissionen dar. Die Anforderungen an Sekundärrohstoffe sind in der Düngemittelverordnung geregelt. Mit dem Einsatz dieser Sekundärrohstoffdüngemittel bei der landwirtschaftlichen oder landschaftsgestaltenden

Verwertung können auch Kunststoffe in die Umwelt gelangen, insbesondere in den Boden, da es bei Komposten und Gärresten (aus getrennt gesammelten Bioabfällen) teilweise starke Verunreinigungen mit Plastikpartikeln gibt. Dies liegt zum Beispiel an der Verwendung nicht ausreichend schnell abbaubarer (Bio-)Plastiktüten als Bioabfallsammelbeutel, an Fehlwürfen, an der Vergärung von Lebensmittelabfällen mit Verpackungsresten sowie an einer ungenügenden Behandlung bzw. Anlagentechnik, um Kunststoffreste aus der Abfall-Biomasse zu entfernen.

Verwendete und weiterführende Literatur:

- Amt für Umwelt und Energie. Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kantons Basel-Stadt (o.D.): Littering. URL: <https://www.aue.bs.ch/abfaelle/littering.html> [zuletzt abgerufen: 28.02.2020].
- Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) vom 17. Mai 2013 [BGBl. I S. 1274], zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 8. April 2019 [BGBl. I S. 432].
- Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG) vom 24.02.2012 [BGBl. I S. 212], zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 23. Oktober 2020 [BGBl. I S. 2232].
- ISO (2020): Plastics — Environmental aspects — State of knowledge and methodologies. ISO/TR 21960:2020.
- ISO (2019): Kunststoffe – Fachwörterverzeichnis. DIN EN ISO 472/A1:2019-03.
- Römpf (2020): Schadstoff. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, März 2020. URL: <https://roempf.thieme.de/lexicon/RD-19-00642> [zuletzt abgerufen: 27.03.2020].
- Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen – 39. BImSchV) vom 02.08.2010 [BGBl. I S. 1065], zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 18. Juli 2018 [BGBl. I S. 1222].





05 Mikro- und Makroplastik



Reibkörper in Kosmetikartikeln werden Microbeads genannt.



Bei diesen Plastikpartikeln am Strand handelt es sich um großes Mikroplastik.



Faserförmiges Mikroplastik (Länge < 5 mm) gelangt z. B. bei der Produktion, Pflege und Nutzung eines Stoffes/Textils unbeabsichtigt in die Umwelt.

Je nach Größe der freigesetzten Objekte handelt es sich bei Kunststoffemissionen um lösliche Polymere, **Partikel**, **Fasern**, Folien oder **Stückgut**. Für feste Kunststoffemissionen haben sich die Begriffe **Mikro-** und **Makroplastik** etabliert. Mit den Begriffen sollen verschiedene Größen ebenso wie unterschiedliche werkstoffliche Eigenschaften erfasst werden. Bis heute gibt es keine einheitliche Definition.

Bereits früh wurde die Grenze zwischen Mikro- und Makroplastik bei 5 mm gezogen, da zunächst viele Kunststoffpellets und -fragmente an Stränden gefunden wurden, die eher im Millimeterbereich als im Mikrometerbereich zu verorten waren. In Bezug auf die Größeneinteilung empfehlen wir die Klassifizierung, die im Querschnittsthema 1 (Analytik und Referenzmaterialien) des Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt“ erarbeitet wurde [Braun et al. 2018]. Dabei werden die Kunststoffemissionen in die vier Größenklassen **Nanoplastik**, **Mikroplastik**, **großes Mikroplastik** und **Makroplastik** untergliedert (siehe Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1

Größenklassen für Kunststoffemissionen (gemäß ISO/TR 21960)

	Nano- plastik	Mikro- plastik	großes Mikroplastik	Makroplastik
Größen- bereich	< 1µm	1-1.000 µm	1-5 mm	> 5 mm

Bei der Nutzung dieser Größenklassen sind folgende Punkte besonders relevant:

- » Die Größenbereiche der Klassen sind weitgehend willkürlich gewählt, teilweise orientieren sie sich an der analytischen Nachweisbarkeit. Aus ihnen lässt sich weder ein Umweltverhalten noch ein Risiko ableiten.
- » Partikelkollektive [siehe Kapitel 6] weisen in der Regel eine Streuung über verschiedene Größenklassen hinweg auf. Damit ist es wahrscheinlich, dass aus einer speziellen Anwendung Kunststoffemissionen entstehen, deren einzelne Partikel den verschiedenen Größenklassen zugeordnet werden müssen.
- » Einzelne Partikel können in den drei Raumdimensionen unterschiedliche Längen aufweisen.³

³ Üblicherweise würde man die Zuordnung nach der größten Länge vornehmen. Gleichzeitig werden aber Fasern und Folien üblicherweise nach Durchmesser oder Dicke charakterisiert. Gelegentlich werden auch die Klassen für Fasern anders definiert.

Gemäß Kapitel 4 wird empfohlen, grundsätzlich den Oberbegriff Kunststoffemissionen zu verwenden und die Begriffe Nano-, Mikro-, großes Mikro- und Makroplastik vor allem für die Detaildiskussion zu nutzen. Insbesondere Formulierungen wie „Vermeidung/Verbot/Minderung von Mikroplastik“ suggerieren, dass es sich um eine aus Umweltsicht sinnvoll abgegrenzte Werkstoffgruppe handelt. Dies ist jedoch nicht der Fall. Deshalb sollte grundsätzlich beschrieben werden, um welche Partikelgrößen und -formen, welche Werkstoffart es sich handelt und wie der Anwendungskontext aussieht (z. B. als industrielles Zwischenprodukt oder in Anwendungen für Endverbraucher*innen) usw.

Mikroplastik wird in **primäres Mikroplastik** und **sekundäres Mikroplastik** unterschieden. Diese Typisierung erklärt den Ursprung des Mikroplastiks. Unter primärem Mikroplastik wird solches verstanden, das absichtlich (intendiert) in Partikelform in Produkten eingesetzt ist oder durch Fracht- oder Betriebsunfälle freigesetzt wird. Sekundäres Mikroplastik ist solches, das aus zerfallendem Makroplastik entsteht. Dies können etwa gelitterte Artikel oder nach Ende der Nutzungsphase in der Umwelt verbleibende Produkte sein. Problematisch ist bei dieser Einteilung, dass sich bis heute Mikroplastik, das in der Nutzungsphase durch Abrieb und Verwitterung freigesetzt wird, nicht eindeutig einer der beiden Typisierungen zuordnen lässt, sondern es einige Autor*innen dem primären und andere dem sekundären Mikroplastik zurechnen. Im Hinblick auf die Klassifizierung von Quellen und die Ableitung geeigneter Handlungsempfehlungen ist dies unbefriedigend und die Einführung einer dritten Gruppe empfehlenswert.⁴ Auch wenn es aufgrund fehlender aufschlussreicher Partikelmerkmale umweltanalytisch kaum möglich ist, identifizierte Mikroplastikpartikel einer bestimmten Typisierung zuzuordnen, wäre eine dritte Kategorie für die Quellenanalyse und die Zuschreibung von Verantwortung hilfreich.

Für Reibkörper in Kosmetikartikeln hat sich der Begriff **Microbeads** etabliert. Dieser sollte ausschließlich begrenzt auf diese Anwendung genutzt werden.

Als **faserförmiges Mikroplastik** (Länge < 5 mm)⁵ werden Objekte bezeichnet, die bei der Produktion, Pflege und Nutzung sowie der Entsorgung eines Stoffes/Textils unbeabsichtigt in die Umwelt gelangen. Die klare Abgrenzung zu Mikroplastik-Partikeln erfolgt über das größere Länge-zu-Querschnitt-Verhältnis (engl. aspect ratio) von mindestens 3:1. Faserförmiges Mikroplastik ist nicht gleich zu setzen mit dem Begriff **Mikro-faser**. Bei Mikrofasern handelt es sich generell um hochfeine Fasern mit einem Querschnitt von ca. 3–10 µm.

Verwendete und weiterführende Literatur:

- Bobeth, Wolfgang (Hrsg.) [1993]: Textile Faserstoffe. Beschaffenheit und Eigenschaften. Springer-Verlag: Berlin / Heidelberg / New York.
- Braun, Ulrike; Jekel, Martin; Gerds, Gunner; Ivleva, Natalia; Reiber, Jens [2018]: Diskussionspapier Mikroplastik-Analytik. URL: <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/diskussionspapier-mikroplastik-analytik> [zuletzt abgerufen: 10.12.2019].
- Denton, Michael James; Daniels, Paul N. (Hrsg.) [2002]: Textile Terms and Definitions. 11. Aufl. The Textile Institute: Manchester.
- Falkai, Béla von [1981]: Synthesefasern. Verlag Chemie: Weinheim.
- Hartmann, Nanna B.; Hüffer, Thorsten; Thompson, Richard C.; Hassellöv, Martin; Verschoor, Anja; Daugaard, Anders E.; Rist, Sinja; Karlsson, Therese; Brennholt, Nicole; Cole, Matthew; Herrling, Maria P.; Hess, Maren C.; Ivleva, Natalia P.; Lusher, Amy L.; Wagner, Martin [2019]: "Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris." *Environmental Science & Technology* 53, no. 3: 1039–47.
- ISO/TR 21960: Plastics in the Environment - Current state of knowledge and methodologies.
- Kolbe, Sabrina [2018]: Microplastic or microfibers? The conceptual confusion. In: *Melliand International* 4/2018: S. 165.
- Koslowski, Hans-J. [2008]: Chemiefaser – Lexikon. 12., erw. Aufl., Deutscher Fachverlag: Frankfurt am Main.
- Mediadidact; TextilWirtschaft; BTE [2020]: Glossar „Textilwissen“, Stichwort Mikrofaser. URL: <https://textilwissen.de/#!/glossar/M/Mikrofaser> [zuletzt abgerufen: 28.02.2020].
- Schnegelsberg, Günter [1999]: Handbuch der Faser. Deutscher Fachverlag: Frankfurt am Main.
- Schnegelsberg, Günter [1971]: Systematik der Textilien. Goldmann Wilhelm GmbH: München.

⁴ Die Autor*innen werden die Entwicklung bei diesen Begriffen beobachten und in einer möglichen Neuauflage diesbezüglich nachschärfen.

⁵ Im Beschränkungsvorschlag der ECHA werden für faserförmiges Mikroplastik eine Länge von 15 mm und zur Trennung von Fasern und Partikeln ein Aspektverhältnis (Verhältnis Länge zu Durchmesser) von mindestens 3 zu 1 vorgeschlagen.

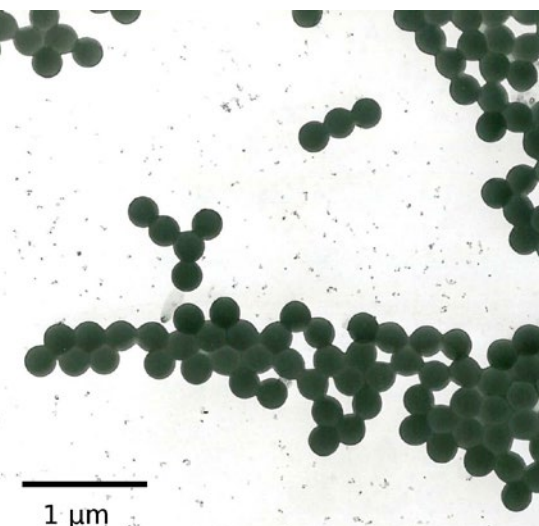
06 Charakterisierung von Partikeln



Granulate oder Pellets sind leicht schüttbare Partikel in der Größe weniger Millimeter.



Textiles Mikroplastik



Zusammenlagerung von Latex-Partikeln zu einem Agglomerat.

Partikel sind Objekte, die klein im Vergleich zum Maßstab des betrachteten Systems sind. Synonym werden die Begriffe **Korn** und **Teilchen** verwendet. Da diese aber auch in anderen Zusammenhängen mit abweichender Bedeutung gebraucht werden, ist eine Nutzung dieser beiden Begriffe nicht zu empfehlen. Die Eigenschaften von Partikeln werden üblicherweise am Kollektiv bestimmt und durch statistische Auswertungen dargestellt. Sie unterscheiden sich dadurch vom **Stückgut** (auch Formkörper), welches als Einzelobjekt beschrieben werden kann.

Bei Partikeln wird unterschieden, ob sie eher eine sphärische (runde), kubische, plättchenförmige, zylindrische oder nadelige **Partikelform** aufweisen. Nur wenige Partikelkollektive weisen Idealformen (Kugeln, Würfel, Tetraeder etc.) auf, zumeist müssen sie daher näherungsweise beschrieben werden. Die Annäherung eines Partikels an die Kugelform wird als Sphärizität bezeichnet.

Bei der Beschreibung von Partikeln ist es häufig sinnvoll, sie als **disperses System** aufzufassen. **Dispersion** bedeutet allgemein eine (feine) Verteilung, Ausbreitung oder Zerstreuung. Ein disperses System besteht aus einer **dispersen Phase** – den Partikeln – sowie einer **kontinuierlichen Phase** – dem Umgebungsmedium. Ist das umgebende Medium flüssig, bezeichnet man die Dispersion als **Suspension**, bei einem gasförmigen Medium als **Aerosol** oder Rauch, bei Flüssig-/Flüssig-Dispersionen spricht man von Emulsionen. Eine lockere Dispersion auf einer Fläche (zumeist mit größeren Partikeln wie z. B. Sand oder Kompost) ist ein **Haufwerk** oder auch **Schüttgut**. Ein **Agglomerat** ist ein großes Partikel, das durch Zusammenlagerung mehrerer kleiner Partikel entstanden ist; besonders lose Agglomerate werden auch **Flocke** genannt. In Abbildung 6.1 sind grobdisperse Systeme nach Partikelgrößen dargestellt.

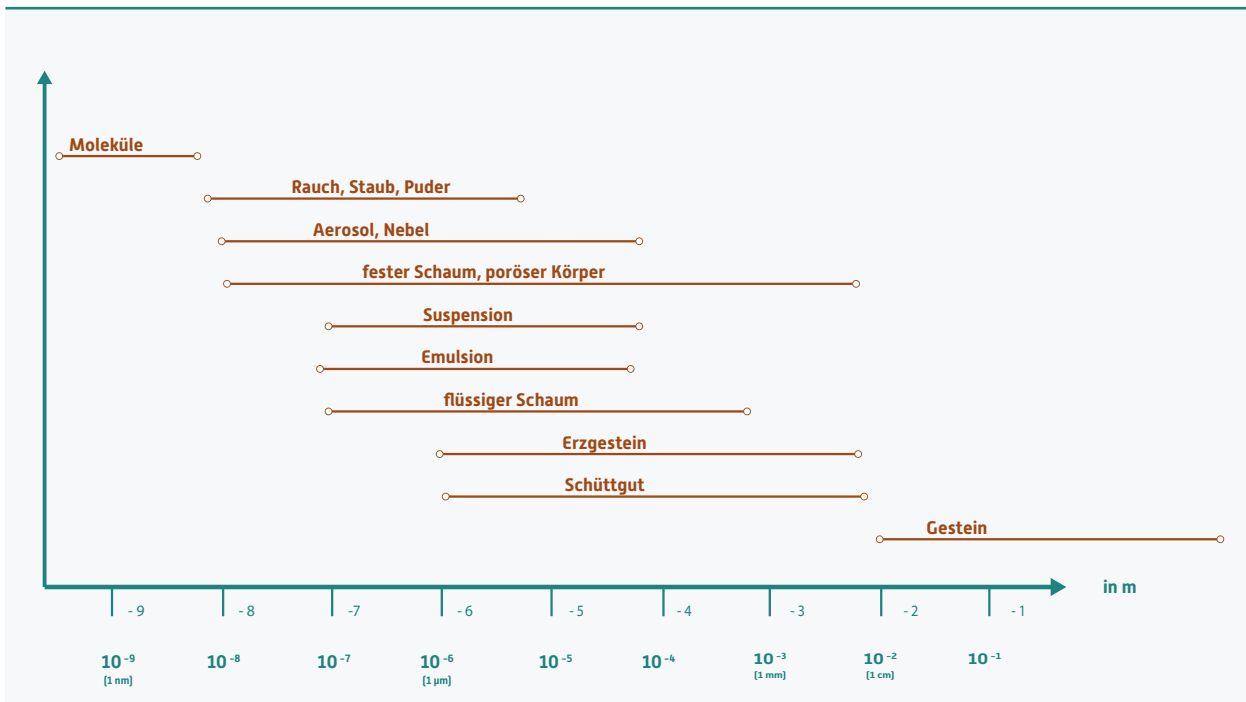
Für Partikel und Partikelkollektive existieren weitere Bezeichnungen, teilweise mit klarem Kunststoffbezug, teilweise ohne:

- » **Granulate** oder **Pellets** sind leicht schüttbare Partikel in der Größe weniger Millimeter. Je nach Herstellungstechnik existieren zylindrische, linsenförmige, aber auch unregelmäßige Formen, die als Ausgangsstoff in der nachfolgenden Kunststoffverarbeitung oder direkt in

... und Fasern

Abbildung 6.1

Grobdisperse Systeme nach Partikelgrößen



Quelle: eigene Darstellung basierend auf Ingenieurkurse.de 2020

- Produkten eingesetzt werden.
- » **Fragmente** sind Partikel, die durch Bruch oder Zerrüttung größerer Objekte entstehen.
- » **Pulver** oder **Puder** sind trockene, sehr feine Partikelkollektive. Die Begriffe werden vornehmlich für kosmetische oder pharmazeutische Präparate verwendet und sollten in Bezug auf Umweltaspekte sowie außerhalb der genannten Branchen nicht gebraucht werden.

Das wichtigste Merkmal eines Partikels ist seine **Partikelgröße**. Ist die Partikelgröße aller Partikel identisch, bezeichnet man das Kollektiv als **monodispers**. Dies ist in der Praxis selten der Fall. In der Regel weisen die Partikelgrößen eine Verteilung auf, d. h. sie sind unterschiedlich groß – das Kollektiv ist **polydispers**.

Weitere Partikelmerkmale sind Dichte und Form. Die **Dichte** ist der Quotient aus Masse und Volumen eines Feststoffs. Je nachdem, welches Bezugsvolumen für die Partikelmasse verwendet wird, unterscheidet man:

- » die **Feststoffdichte** (auch **Reindichte**) = Partikelmasse/Feststoffvolumen,
- » die **Partikeldichte** = Partikelmasse/Partikelvolumen (inkl. Poren im Partikel) und
- » die **Schüttdichte** = Partikelmasse/Haufwerkvolumen (inkl. Hohlräumen).

Für Partikel in Flüssigkeiten (beispielsweise in Meerwasser) unterscheidet man:

- » die **Konzentration** = Partikelmasse (dispergiert oder gelöst)/Flüssigkeitsvolumen
- » die **Partikelkonzentration** = Partikelanzahl/Flüssigkeitsvolumen

Für Partikel in Feststoffmischungen (beispielsweise Böden, Kompost)

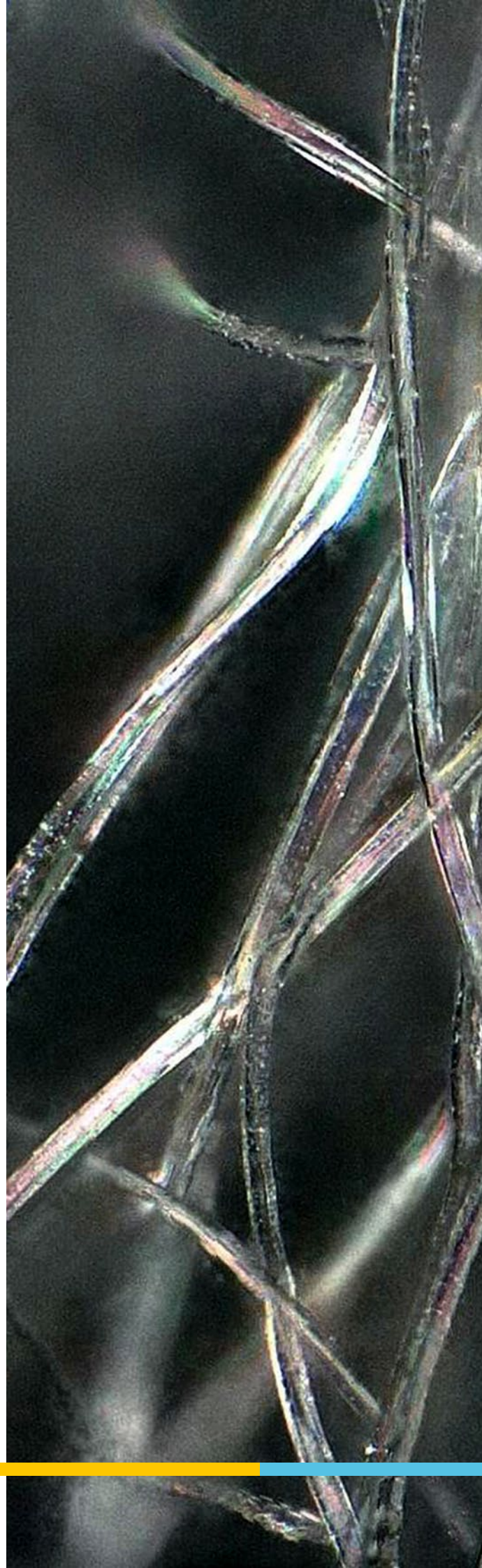
- » den **Gehalt** = Partikelmasse/Gesamtmasse

Neben Partikeln und Stückgütern werden Materialien auch als Fasern beschrieben. Dies sind dünne, lineare, flexible Gebilde aus organischen oder anorganischen Werkstoffen. Faserförmiges Mikroplastik kann textilbasiert sein, oder auch

anderen Quellen entstammen, bei denen es z. B. durch Abschälen zu langen, dünnen, flexiblen Fragmenten mit den entsprechenden Abmaßen kommt. Faserförmiges Mikroplastik textilen Ursprungs basiert überwiegend auf Polymeren petrochemischer (fossiler) Herkunft, wie Polyester (PES), Polyamid (PA), Polyacrylnitril (PAN) und Polypropylen (PP), aber auch auf Polymeren aus nachwachsenden Rohstoffen (z. B. Polylactid [PLA]) oder auf Derivaten natürlicher Polymere wie Celluloseacetate (CA und CTA). Charakteristisch für Fasern ist ein großes Verhältnis von Länge zu Durchmesser. Bei Naturfasern kann es von 1000:1 (Baumwolle) bis 10.000:1 (Schurwolle) reichen. Synthetische Fasern sind in ihrem Längen-Durchmesser-Verhältnis an Naturfasern durch Schneiden von Filamenten adaptiert und werden nach ihrer Länge klassifiziert: **Filamente** sind quasi endlos, Stapelfasern haben üblicherweise Längen von 30 - 80 mm. Flock- oder Kurzfasern bezeichnen sehr kurze Fasern mit typischen Längen von 0,3 - 2 mm, sie werden nicht zu Garnen versponnen, sondern z. B. über Spezialverfahren auf textile Flächen gedruckt. Faserförmiges Mikroplastik kann somit den Größenklassen in Tabelle 5.1 nicht eindeutig zugeordnet werden.

Verwendete und weiterführende Literatur:

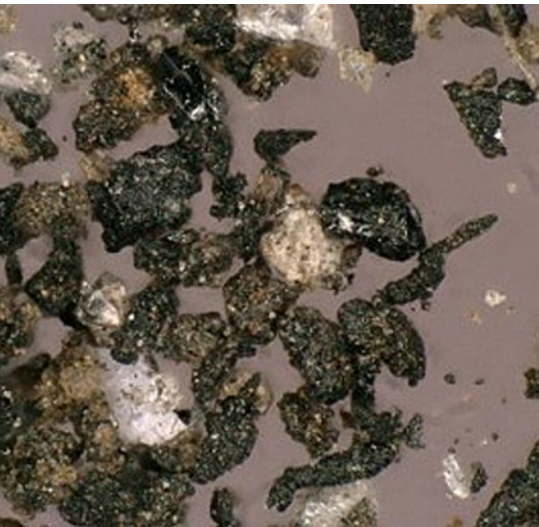
- Baur, Erwin; Brinkmann, Sigrid; Osswald, Tim A.; Rudolph, Natalie; Schmachtenberg, Ernst [2013]. Saechtling Kunststoff Taschenbuch. Baur editor. Hanser: München.
- Bobeth, Wolfgang (Hrsg.) [1993]: Textile Faserstoffe. Beschaffenheit und Eigenschaften. Springer-Verlag: Berlin / Heidelberg / New York.
- Denton, Michael James; Daniels, Paul N. (Hrsg.) [2002]: Textile Terms and Definitions. 11. Aufl. The Textile Institute: Manchester.
- DIN [2017]: Messen disperser Systeme – Begriffe. DIN 66160:2017-02.
- Falkai, Béla von [1981]: Synthesefasern. Verlag Chemie: Weinheim.
- Ingenieurkurse.de [2020]: Mechanische Verfahrenstechnik. Merkmale der Feinheit. URL: <https://www.ingenieurkurse.de/mechanische-verfahrenstechnik/partikel-und-disperse-systeme/merkmale-der-feinheit.html> [zuletzt abgerufen: 18.09.2020].
- ISO [2020]: Plastics — Environmental aspects — State of knowledge and methodologies (ISO/TR 21960:2020).
- Koslowski, Hans-J. [2008]: Chemiefaser – Lexikon. 12., erw. Aufl., Deutscher Fachverlag: Frankfurt am Main.
- Mediadidact; TextilWirtschaft; BTE [2020]: Glossar „Textilwissen“, Stichwort Mikrofaser. URL: <https://textilwissen.de/#!/glossar/M/Mikrofaser> [zuletzt abgerufen: 28.02.2020].
- Schnegelsberg, Günter [1999]: Handbuch der Faser. Deutscher Fachverlag: Frankfurt am Main.
- Schnegelsberg, Günter [1971]: Systematik der Textilien. Goldmann Wilhelm GmbH: München.





Vergrößerung: X500,0

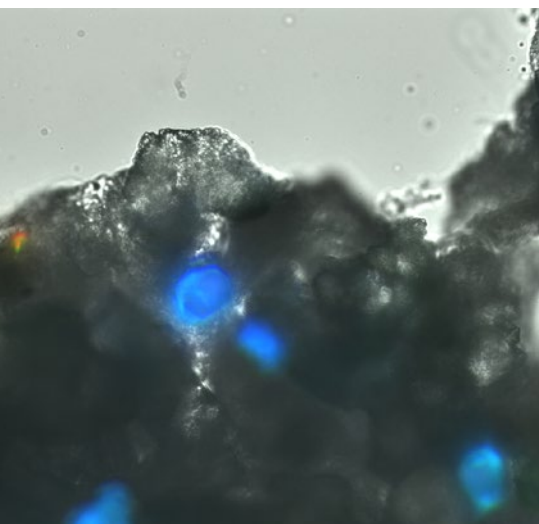
07 Transfer und Rückhaltung von



Undefinierter Straßenkehrriecht mit Bestandteilen an Reifen- und Fahrbahnabrieb.



Durch Faserbrüche während des Waschvorgangs von Textilien gelangt Mikroplastik ins Abwasser.



Fluoreszierende Mikroplastikpartikel in Belebtschlamm einer Kläranlage

Kunststoffe können aus verschiedenen Quellen in die Abwassersysteme gelangen (z. B. durch Hygieneprodukte, Wasch- und Reinigungsmittel, Abrasion von Abwasserrohren, Faserbrüche bei Textilien während Waschvorgängen, Produktionsrückstände, Reifenabrieb, Verwitterung von Oberflächen, Kunstrasenflächen, Bauprodukte im Außenbereich etc.). Die Straßenreinigung, bei der **Straßenkehrriecht** – d. h. die auf Straßenverkehrsflächen akkumulierten/deponierten Feststoffe (vor allem Reifenabrieb) – einer ordnungsgemäßen Entsorgung zugeführt wird, entlastet die Abwassersysteme, insbesondere bei regelmäßiger Durchführung.

Abwasser ist nach § 54 Abs. 1 WHG das durch häuslichen, gewerblichen, landwirtschaftlichen oder sonstigen Gebrauch in seinen Eigenschaften veränderte Brauchwasser (**Schmutzwasser**) sowie das von Niederschlägen aus dem Bereich bebauter oder befestigter Flächen gesammelt abfließende Wasser (**Niederschlagswasser**). Abfließendes Niederschlagswasser von Straßenverkehrsflächen wird gemeinhin als **Straßenabfluss** bezeichnet. Als Schmutzwasser gelten auch die aus Anlagen zum Behandeln, Lagern und Ablagern von Abfällen austretenden und gesammelten Flüssigkeiten. Die Masse der mit dem Abwasser oder Stoffstrom abgeleiteten Stoffmengen wird i. d. R. als **Fracht** bezeichnet.

Kommunales Abwasser und Abwasser von Indirekteinleitern wird in der Kanalisation gesammelt und abgeleitet. Hierbei handelt es sich um Abwasser, welches im Wesentlichen aus Haushalten stammt oder ähnlichen Einrichtungen wie Gemeinschaftsunterkünften, Hotels, Gaststätten, Campingplätzen, Krankenhäusern und Bürogebäuden (kommunales Abwasser) oder aus Anlagen, die gewerblichen oder landwirtschaftlichen Zwecken dienen, sofern die Schädlichkeit dieses Abwassers mittels biologischer Verfahren mit gleichem Erfolg wie bei häuslichem Abwasser verringert werden kann. Über 96 Prozent der Haushalte in Deutschland sind an die öffentliche Abwasserentsorgung durch kommunale Kläranlagen angeschlossen. Bei der Kanalisation im kommunalen Bereich wird zwischen **Trennkanalisation** und **Mischkanalisation** unterschieden. Beide Systeme finden sich in Deutschland etwa zu jeweils gleich großen Anteilen. Im Mischsystem wird das Abwassergemisch aus Schmutzwasser, Fremdwas-

... Kunststoffemissionen im Bereich Abwasser

ser und Niederschlagswasser (**Mischwasser**) in einem einzigen Leitungs-/Kanalsystem gemeinsam abgeleitet [DIN EN 16323:2014]. Bei der Trennkanalisation erfolgt die Ableitung der Abwasserströme von Schmutz- und Niederschlagswasser in getrennten Kanalsystemen: Das Schmutzwasser wird zur Kläranlage und das Niederschlagswasser teilweise nach Zwischenspeicherung und mechanischer Behandlung in Fließgewässer und Grundwasser (durch Versickerung) geleitet. Analog zu kommunalen Kläranlagen existieren darüber hinaus in verschiedenen Branchen industrielle Abwasserbehandlungsanlagen. Dafür finden sich Regelungen in den umfangreichen Anforderungen der Abwasserverordnung (AbwV).

Der in § 60 WHG verwendete Begriff **Abwasserbehandlungsanlage** wird dort nicht definiert, es heißt jedoch: „Abwasseranlagen sind so zu errichten, zu betreiben und zu unterhalten, dass die Anforderungen an die Abwasserbe-

seitigung eingehalten werden.“ Laut § 2 Abs. 5 Klärschlammverordnung ist eine Abwasserbehandlungsanlage eine ortsfeste Einrichtung, in der die Schädlichkeit des Abwassers physikalisch, biologisch oder chemisch vermindert oder beseitigt wird.

Aus den kommunalen Abwassersystemen können Kunststoffe vorwiegend über vier verschiedene **Eintragspfade** in die Umwelt gelangen:

- » In Abhängigkeit der Abwasserbehandlung können Kunststoffe über den Ablauf der Kläranlage in die Umwelt gelangen, indem das behandelte Abwasser aus Abwasserbehandlungsanlagen in die Gewässer eingeleitet oder zur Bewässerung eingesetzt wird. Der überwiegende Teil des im Rohabwasser vorhandenen Kunststoffes wird allerdings vorher (mechanische Behandlung) sowie gemeinsam mit dem Klärschlamm entfernt.
- » Über **Klärschlämme** gelangen Kunststoffe, die über das Abwasser oder die Covergärung von Substraten im Faulturn (z. B. durch nicht abgetrennte Verpackungsreste in

Abbildung 7.1

Abwasserströme in Deutschland

Abwasserstrom	Art der Behandlung	Volumen in Mio. m ³
Schmutzwasser (häuslich/gewerblich)	in Kläranlagen behandelt	5080 ^a
Fremdwasser		2240 ^b
Niederschlagswasser		2570 ^b
Gesamtabwassermenge		9890
Abschläge aus der Mischkanalisation	nicht in Kläranlagen behandelt, teilw. mechanische Behandlung	1310 ^b
Einleitung von Niederschlagswasser	nicht in Kläranlagen behandelt, teilw. mechanische Behandlung oder natürliche Prozesse	3960 ^b

a Destatis Fachserie 19 Reihe 2.1.2, Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung - Öffentliche Abwasserbehandlung und -entsorgung, 2013, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2015

b Eigene Schätzung

c Rigolen, Regenrückhaltebecken

Quelle: UBA 2019

Lebensmittelabfällen) in die Abwasserbehandlungsanlage eingetragen werden, auf und in die Böden, wenn diese in Landwirtschaft, Landschaftsbau und zur Rekultivierung verwendet werden.

- » Über die **Niederschlagswassereinleitungen** gelangen Kunststoffe in Gewässer, wenn Niederschlagswasser aus der Trennkanalisation – dabei meist ohne effektive Reinigung – in diese eingeleitet wird.
- » Über **Mischwasserentlastungen** erfolgt ebenfalls ein Eintrag in die Umwelt, wenn bei starken Niederschlägen zur hydraulischen Entlastung der Mischkanalisation oder der Abwasserbehandlungsanlage an einem Überlauf (Regenüberlaufbauwerk, Regenüberlaufbecken) Mischwasser, teilweise nach mechanischer Vorbehandlung, in ein Fließgewässer eingeleitet wird.

Abbildung 7.1 zeigt eine Übersicht der in Deutschland anfallenden Abwassermengen im kommunalen Bereich (UBA 2019).

Verwendete und weiterführende Literatur:

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) [2016]: Gewässerschutzpolitik in Deutschland. URL: <https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/binngewaesser/gewaesserschutzpolitik/deutschland/> [zuletzt abgerufen: 04.12.2020].
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) [2020]: Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes legt Grundlagen für weniger Abfall und mehr Recycling. Pressemitteilung vom 12.02.2020. URL: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/novelle-des-kreislaufwirtschaftsgesetzes-legt-grundlagen-fuer-weniger-abfall-und-mehr-recycling/> [zuletzt abgerufen: 04.12.2020].
- DIN [2014]: Wörterbuch für Begriffe der Abwassertechnik; Dreisprachige Fassung EN 16323:2014.
- Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG) vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 23. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2232).
- Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetz vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1408).
- Kolbe, Sabrina [2018]: Microplastic or microfibers? The conceptual confusion. In: Melliand International 4/2018: S. 165.
- Umweltbundesamt, UBA [2019]: Kunststoffe in der Umwelt, Dessau-Roßlau. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/190515_uba_fb_kunststoffe_bf.pdf [zuletzt abgerufen: 24.10.2019].
- Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung - AbfKlärV) vom 27.09.2017 (BGBl. I S. 3465), zuletzt geändert durch durch Artikel 6 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465).

Wasserhaushaltsgesetz (WHG)



Das Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz, WHG) ist das zentrale Gesetz für den Gewässerschutz in Deutschland. Es wurde 2009 verabschiedet und setzt verschiedene europäische Richtlinien in nationales Recht um, als bedeutendste darunter die europäische Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG, WRRL).

Zweck des WHG ist es, „durch eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut zu schützen.“ (§1 WHG). Gewässer werden nach festgelegten Flussgebietseinheiten bewirtschaftet - dabei gilt ein allgemeines Verschlechterungsverbot des ökologischen und chemischen Zustandes (§27 WHG). In sechsjährigen Zyklen sollen alle Gewässer bis spätestens 2027 in einen ökologisch und chemisch guten Zustand gebracht werden. Weitere wichtige Verordnungen zur Ausführung des WHG sind die Abwasserverordnung (AbwV), die Oberflächengewässerverordnung (OGewV) und die Grundwasserverordnung (GrwV) (BMU 2016).

Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)



Das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG) besteht seit 1994 und wurde mehrfach überarbeitet, so in 2012 und zuletzt in 2020. Es zielt darauf ab, „die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen“ sowie die Umsetzung der europäischen Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) zu unterstützen (§1 KrWG).

Die Gesetzesinhalte konzentrieren sich auf Abfallvermeidung, -verwertung und -beseitigung entsprechend der Abfallhierarchie. Die Novellierung des KrWG umfasst zusätzliche Vermeidungs- und Recyclingvorgaben sowie neue Vorgaben für Beschaffungen der öffentlichen Hand. Außerdem werden Hersteller mit der ‚Obhutspflicht‘ verstärkt zur Verantwortung gezogen (BMU 2020).



08 (Bio-)Abbaubarkeit und Persistenz



Der Keimling dient als Label für die industrielle Kompostierbarkeit nach Norm DIN EN 13432.



Zersetzungsprozess eines PET-Flaschen-Deckels



Im Gartenkompost werden bioabbaubare Kunststoffe, die es aktuell auf dem Markt gibt, nicht abgebaut.

In der Umwelt unterliegen Kunststoffe **abiotischen Abbauprozessen**, also einer physiko-chemischen **Alterung** durch den Einfluss von Sonne, Wind, Gezeiten etc. Bei vielen Kunststoffen geht dieser Prozess einher mit z. B. Versprödung und/oder Rissbildung bis hin zur **Fragmentierung**. Darüber hinaus unterliegen Kunststoffe auch einem **biotischen** oder **biologischen Abbau** durch Lebewesen oder deren Enzyme. Zugrunde liegen in beiden Fällen oxidative und/oder hydrolytische Degradationsprozesse, wobei durch Kettenspaltung oder **Depolymerisation** die Polymere in kürzere Molekülketten zersetzt werden, bis hin zu Kohlendioxid und Wasser (**Mineralisation**). Häufig sind abiotische Abbauprozesse eine Vorbedingung für nachfolgenden biotischen Abbau.

Die Abbauprozesse verschiedener Kunststoffe werden teilweise auf 100 bis 1.000 Jahre geschätzt, jedoch liegen vor allem für den Abbau schwer abbaubarer Polymere weder aus Experimenten noch Simulationen verlässliche Daten vor. Bis auf vereinzelte Ausnahmen (insbesondere bioabbaubare Kunststoffe) können chemisch-physikalische und biologische Abbauprozesse Polymere nicht in akzeptablen⁶ Zeiten zersetzen. Kunststoffe weisen also eine hohe **Persistenz** auf. Weiterhin verbleiben häufig nicht abbaubare Transformationsprodukte in der Umwelt.

Wesentliche Kriterien zur Beurteilung der biologischen Abbaubarkeit sind die Abbauumgebung (z. B. in Wasser, im Boden) und die Abbaumechanismen mit Kernparametern wie Zeit, Temperatur, Licht, vorhandene Enzyme usw. Weiterhin unterscheidet man generell zwischen **aeroben** (in Anwesenheit von Sauerstoff) Abbauprozessen und **anaeroben** (in Abwesenheit von Sauerstoff).

Angaben zur biologischen Abbaubarkeit sollten immer mit Informationen wie Umgebung, Abbauart und der ggf. zugrundeliegenden Norm versehen werden. Von grundsätzlicher Relevanz sind dabei die allgemeinen OECD-Richtlinien (für alle Stoffe, nicht nur für

⁶ Für einige Werkstoffe in bestimmten Anwendungen sind akzeptable Zeiten durch Normen (ISO 14851 „Aerobe Abbaubarkeit in wässrigen Medien“), ISO 17556 („Aerobe Abbaubarkeit in Böden“), OECD 301/302 „Leichte/inhärente Abbaubarkeit im aquatischen Milieu“) festgelegt. Für andere gibt es dazu noch keine generelle Übereinkunft.

⁷ Der Begriff der Persistenz wird hier im Sinne von Langlebigkeit und Dauerhaftigkeit, nicht aber im chemikalienrechtlichen Sinne verwendet.

Kunststoffe relevant). Bei einem aeroben Abbau von Stoffen wird gemäß dieser Richtlinien zwischen leicht (schnell), inhärent (grundsätzlich), schwer und persistent (nicht abbaubar) unterschieden und durch folgende Tests und Zielparameter definiert:

- » **Leicht abbaubar:** > 60 Prozent Massenabbau in 28 Tagen nach OECD 301
- » **Inhärent abbaubar:** > 70 Prozent Massenabbau in 28 Tagen nach OECD 302
- » **Schwer abbaubar:** < 70 Prozent Massenabbau in 28 Tagen nach OECD 302
- » **Persistent:** < 20 Prozent Massenabbau in 28 Tagen nach OECD 302

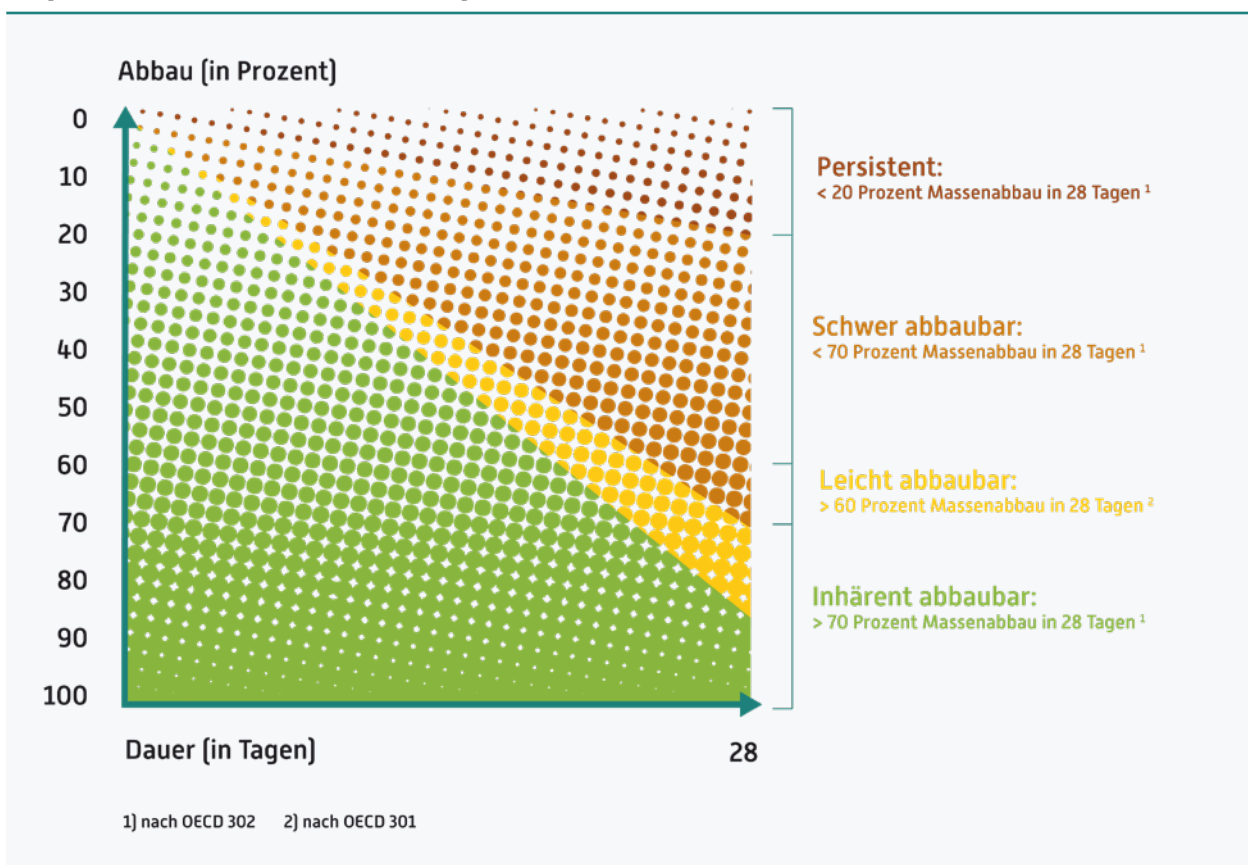
Die für die stoffrechtliche Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Stoffen (wobei Polymere bislang ausgenommen sind) wesentliche REACH-VO konzentriert sich u. a. auf die chemikalienrechtliche „Persistenz“⁷ und differenziert diese auf Basis von Simulationstests (OECD 307 und 308) weiter aus. Die **Halbwertszeit** ist dabei die Zeitspanne, nach der nur noch die Hälfte der Masse übrig ist.

» **Persistent (P)**

- » Halbwertszeit in Meerwasser > 60 d
- » Halbwertszeit in Süßwasser > 40 d
- » Halbwertszeit in Meeressediment > 180 d
- » Halbwertszeit in Süßwasser-, Flussmündungssediment oder Boden > 120 d

Abbildung 8.1

Allgemeine OECD-Richtlinien zur biologischen Abbaubarkeit



Quelle: Ecologic Institut

» **Sehr persistent (vP):**

- » Halbwertszeit in Meer-, Süßwasser oder Flussmündungen > 60 d
- » Halbwertszeit in Meer-, Süßwasser oder Flussmündungssediment oder Boden > 180 d

Neben diesen generellen Normen zur Abbaubarkeit gibt es auch zahlreiche speziell für Kunststoff entwickelte Standards, in denen die **Prüfbedingungen für Bioabbau** [Boden: ISO 17566, Süßwasser ISO 14851, Meerwasser ASTM D6691] sowie die **Anforderungen an Abbaugrade** [Boden: EN 17033, ASTM D7081 (zurückgezogen)] festgelegt sind. Technologisch genutzt wird der Abbau in Kompostierungsanlagen bzw. Vergärungsanlagen. Bezüglich der Abbaubedingungen, dem Grad der Abbaubarkeit und der Pflanzenverträglichkeit bestehen entsprechende Normen zum Abbau unter Kompostier- bzw. Vergärungsbedingungen.

Wichtig ist diesbezüglich das Kriterium **Kompostierbarkeit**. Diese beschreibt, ob sich ein Stoff unter bestimmten Kompostbedingungen abbaut. Ein bioabbaubarer Kunststoff, der – insbesondere unter den Bedingungen einer industriellen Kompostieranlage – abgebaut wird, ist nicht zwingend bioabbaubar gemäß OECD-Richtlinien. Dies liegt insbesondere daran, dass biologischer Abbau eingeschränkt reproduzierbar ist und nur unter definierten Bedingungen stattfindet. So gelten die Kompostierbarkeitsnormen wie etwa die DIN EN 13432 nur in einer geprüften Kompostanlage, jedoch nicht unter Abbaubarkeitsbedingungen im Meer, Süßwasser oder Boden. Die individuellen Normen sind also nicht auf andere Bereiche übertragbar. Es gibt jeweils spezielle Normen für die Anwendung in einer Kompostanlage, einer Vergärungsanlage oder auch für eine gezielte Verstoffwechslung spezieller Kunststoffe beispielsweise Mulchfolien unter kontrollierter Anwendung nach DIN EN 17033.

- » Industriell kompostierbar: > 90 Prozent nach 180 Tagen (< 55 °C) [DIN EN 13432]
- » Heimkompostierbar: > 90 Prozent nach 365 Tagen (< 30 °C) [AS 5810, NF T51-800]
- » Bodenabbaubar: > 90 Prozent nach 730 Tagen (< 28 °C) [DIN EN 13432; EN 17033]

Verwendete und weiterführende Literatur:

- AS (2010): Biodegradable plastics – Biodegradable plastics suitable for home composting [AS 5810:2010].
- ASTM (2017): D6691-17, Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in the Marine Environment by a Defined Microbial Consortium or Natural Sea Water Inoculum, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM (2005): D7081-05, Standard Specification for Non-Floating Biodegradable Plastics in the Marine Environment (Withdrawn 2014), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bertling, Jürgen; Bertling, Ralf; Hamann, Leandra (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Oberhausen.
- Bertling, Jürgen, Hamann, Leandra (2018): Mikroplastik und synthetische Polymere in Kosmetikprodukten sowie Wasch-, Putz- und Reinigungsmitteln; Verfügbar unter: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/publikationen/2018/umsicht-studie-mikroplastik-in-kosmetik.pdf>
- Burgstaller, M., Potrykus, A., Weißenbacher, J., Kabasci, S., Merrettig-Bruns, U.: Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe, im Auftrag des Umweltbundesamtes, 5/2018; abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/18-07-25_abschlussbericht_bak_final_pb2.pdf
- DIN EN ISO (2019): Kunststoffe – Bestimmung der vollständigen aeroben Bioabbaubarkeit von Kunststoffmaterialien im Boden durch Messung des Sauerstoffbedarfs in einem Respirometer oder der Menge des entstandenen Kohlendioxids [ISO 17556:2019].
- DIN EN ISO (2019): Bestimmung der vollständigen aeroben Bioabbaubarkeit von Kunststoff-Materialien in einem wässrigen Medium – Verfahren mittels Messung des Sauerstoffbedarfs in einem geschlossenen Respirometer [ISO 14851:2019].
- DIN (2018): Kunststoffe – Biologisch abbaubare Mulchfolien für den Einsatz in Landwirtschaft und Gartenbau – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 17033:2018.
- DIN (2014): Biobasierte Produkte – Terminologie; Deutsche Fassung EN 16575:2014.
- DIN (2007): Kunststoffe – Bewertung der Kompostierbarkeit – Prüfschema und Spezifikationen; Deutsche Fassung DIN EN 14995:2007-03.
- DIN (2000): Verpackung – Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau – Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen; Deutsche Fassung EN 13432:2000.
- NF (2014): Kunststoffe – Spezifikationen für heimkompostierbare Kunststoffe [NF T51-800:2015-11-14].
- OECD (2009), Test No. 302C: Inherent Biodegradability: Modified MITI Test (II), OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264070400-en>.
- OECD (2002), Test No. 307: Aerobic and Anaerobic Transformation in Soil, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264070509-en>.
- OECD (2002), Test No. 308: Aerobic and Anaerobic Transformation in Aquatic Sediment Systems, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264070523-en>.
- OECD (1992), Test No. 301: Ready Biodegradability, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 3, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264070349-en>.

Sartorius, Ingo (2003): Biodegradable Plastics in the Social and Political Environment, Biopolymers Vol. 10, Wiley-VCH, Weinheim.

Umweltbundesamt (2019a): Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/biobasierte-biologisch-abbaubare-kunststoffe#textpart-1> [zuletzt abgerufen 31.10.2019].

Zweifel, Hans; Maier, Ralph; Schiller, Michael (2009): Plastics Additives Handbook. Carl Hanser Verlag: München.



09 Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft



Der Begriff **Kreislaufwirtschaft** und die auch im deutschsprachigen Raum verwendeten Begriffe **zirkuläre Wirtschaft**, **Zirkularwirtschaft** und auch **Circular Economy** sind weitgehend synonym und können wie folgt verstanden werden: In einer Kreislaufwirtschaft/Circular Economy verbleiben die eingesetzten Stoffe über den Lebenszyklus von Produkten hinaus in einem Stoffkreislauf. Abfälle, Emissionen, **dissipative Verluste** sowie die Entnahme von Rohstoffen aus der Umwelt sollen dabei soweit wie möglich verringert werden. Dissipative Verluste bezeichnen u. a. Verluste durch Abrieb oder Verwitterung. Dabei soll die Nutzungsdauer von Produkten möglichst lang sein und ihre Rückführung in den Kreislauf zum Ende der Nutzungsdauer möglichst schnell geschehen. Eine Nebenbedingung, die die Qualität einer Circular Economy wesentlich mitbestimmt, ist ein möglichst geringer Energiebedarf – idealerweise gedeckt aus erneuerbaren Ressourcen – zur Aufrechterhaltung des Kreislaufs. Stoffe, die nicht im Kreis geführt werden können, sollten energetisch verwertet werden. Materialien, bei denen sich Emissionen nicht vermeiden lassen, sollten idealerweise in der Umwelt vollständig abbaubar sein, sofern dies die Langlebigkeit und Ressourceneffizienz nicht beeinträchtigt. Das Konzept der Kreislaufwirtschaft kann auf Regionen, Branchen, Unternehmen oder einzelne Waren gleichermaßen angewandt werden. Auch wenn die Begriffe Kreislaufwirtschaft und Circular Economy synonym (bzw. als Übersetzung)

verwendet werden sollten, liegt in der aktuellen Debatte zur Circular Economy der Focus vor allem auf der Produktseite (Ökodesign), während die Kreislaufwirtschaft eher auf den Umgang mit Abfällen abzielt.

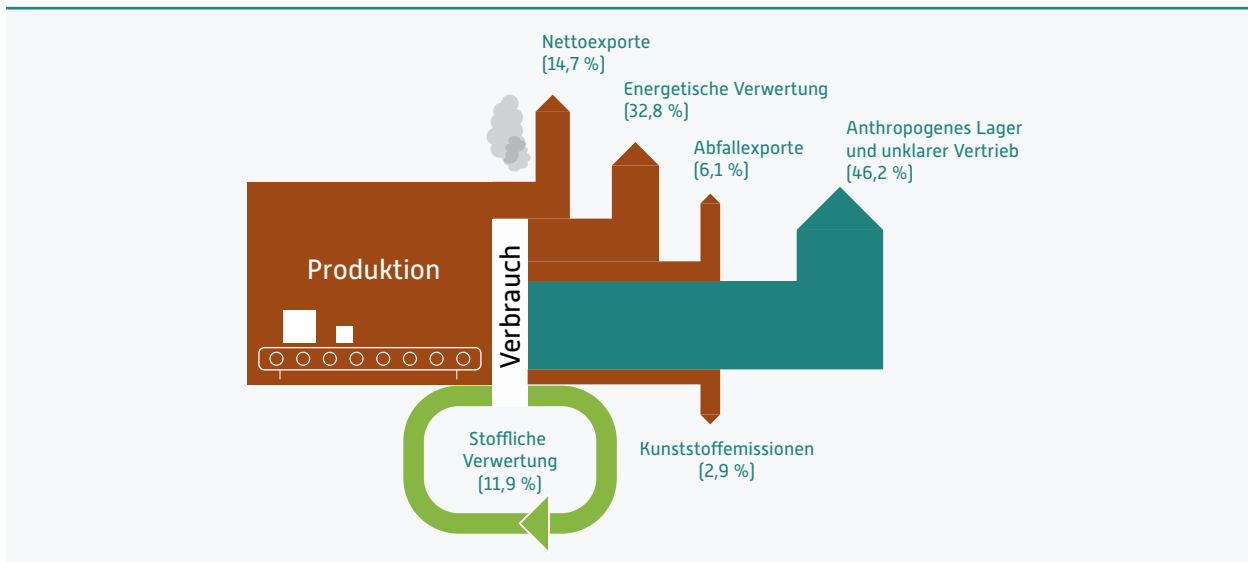
Das Konzept der Circular Economy kann auch auf Polymere, Kunststoffe und die aus ihnen hergestellten Produkte angewandt werden und hat aufgrund einer bislang sehr niedrigen Zirkularität bei diesen Stoffen besonderes Potenzial. In Abbildung 9.1 ist der jährliche Verbleib von Plastik nach der Produktion in Deutschland dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass 14,7 Prozent der produzierten Kunststoffe exportiert werden. Kunststoffe, die in Deutschland in den Verbrauch übergehen, werden zu 32,8 Prozent energetisch verwertet, zu 6,1 Prozent als Abfälle exportiert, 46,2 Prozent landen im anthropogenen Lager (noch in Nutzung oder deponiert) oder der Verbleib ist unklar und 2,9 Prozent in der Umwelt. Lediglich 11,9 Prozent werden stofflich verwertet.

In Deutschland regelt das **Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)** den Umgang mit Abfällen und fördert den Übergang von einer linearen in eine zirkuläre Wirtschaftsweise mit dem Ziel, Ressourcen zu schonen sowie Mensch und Umwelt zu schützen. Wichtige Elemente zur Umsetzung einer Circular Economy sind im Kreislaufwirtschaftsgesetz beispielsweise über die **Produktverantwortung** (§ 23 KrWG) geregelt. Ihr entsprechend sollten Produzent*innen bei der Entwicklung der Produkte „vom Abfall her denken“. Dazu gehören die Wiederverwendung (im Sinne von Mehrfachverwendung) von Produkten, das Recycling von Materialien und Stoffen sowie eine ökologische Gestaltung (Ökodesign) der Produkte, die eine Kreislaufführung ohne Verluste in der Qualität und ohne die Akkumulation von Schadstoffen ermöglichen.

Das **Ökodesign** hat zum Ziel, Umweltaspekte frühzeitig im Produktdesign und der Produktentwicklung zu berücksichtigen, um nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt während des gesamten Lebenszyklus

Abbildung 9.1

Verbleib von Kunststoffen nach der Produktion



Quelle: eigene Darstellung nach Fraunhofer UMSICHT 2018 (basierend auf Daten von Conversio aus 2017, Wirtschaftsverband der Deutschen Kautschukindustrie 2015).

eines Produkts zu reduzieren. Der Begriff **Design-for-Environment (DfE)** ist synonym verwendbar. **Design-for-Recycling (DfR)** ist eine Unterkategorie, bei der die Gestaltung insbesondere Aspekte des Recyclings berücksichtigt. In vielen Fällen ist es wichtig, zwischen Produkten und Abfällen zu unterscheiden, da mit ihnen unterschiedliche Rechtsvorschriften verknüpft sind. **Abfälle** sind nach § 3 Abs. 1 KrWG alle Stoffe oder Gegenstände, dessen Nutzen für den*die Besitzer*in erloschen ist und derer sich ihr*e Besitzer*in entledigt, entledigen will oder entledigen muss.

§ 6 Abs. 1 KrWG enthält die sog. Abfallhierarchie. Abfälle sollen an erster Stelle vermieden werden. Sind sie nicht zu vermeiden, sollen sie zur Wiederverwendung vorbereitet werden. Ist auch dies nicht möglich, fordert die Abfallhierarchie ein Recycling. Die sonstige Verwertung, insbesondere die energetische Verwertung, ist dem Recycling nachrangig. Nur als ultima ratio sind Abfälle zu beseitigen, d. h. zu deponieren oder zu verbrennen. Ausgehend von dieser Rangfolge soll aber diejenige Maßnahme Vorrang haben, die den Schutz von Mensch und

Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet. Die Formen des Umgangs mit Abfällen werden in § 3 des KrWG definiert.

Unter **Vermeidung** wird nach § 3 Abs. 20 KrWG jede Maßnahme verstanden, „die ergriffen wird, bevor ein Stoff, Material oder Erzeugnis zu Abfall geworden ist, und dazu dient, die Abfallmenge, die schädlichen Auswirkungen des Abfalls auf Mensch und Umwelt oder den Gehalt an schädlichen Stoffen in Materialien und Erzeugnissen zu verringern. Hierzu zählen insbesondere die anlageninterne Kreislaufführung, die abfallarme Produktgestaltung, die Wiederverwendung von Erzeugnissen oder die Verlängerung ihrer Lebensdauer sowie ein Konsumverhalten, das auf den Erwerb von abfall- und schadstoffarmen Produkten sowie die Nutzung von Mehrwegverpackungen ausgerichtet ist.“

Wiederverwendung (§ 3 Abs. 21 KrWG) bedeutet dabei, „Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck zu verwenden, für den sie ursprünglich

bestimmt waren.“ Beispiele für Abfallvermeidungsmaßnahmen, die in Abfallvermeidungsprogrammen formuliert werden können, enthält Anhang 4 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes.

Unter **Vorbereitung zur Wiederverwendung** versteht § 3 Abs. 24 KrWG „jedes Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile von Erzeugnissen, die zu Abfällen geworden sind, so vorbereitet werden, dass sie ohne weitere Vorbehandlung wieder für denselben Zweck verwendet werden können, für den sie ursprünglich bestimmt waren.“

Verwertung ist nach § 3 Abs. 23 KrWG „jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis die Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen.“

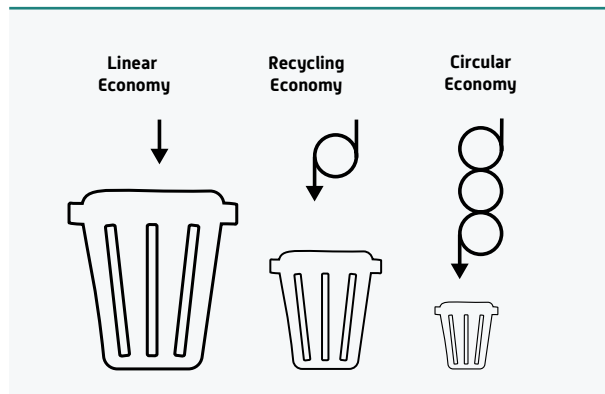
Als **Recycling** gilt nach § 3 Abs. 25 KrWG „jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere, gleichwertige Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.“ Anlage 2 des KrWG enthält eine Liste der Verwertungsverfahren.

Beseitigung beschreibt nach § 3 Abs. 26 KrWG „jedes Verfahren, das keine Verwertung ist, auch wenn das Verfahren zur Nebenfolge hat, dass Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden.“ Beseitigungsverfahren werden in Anlage 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes beispielhaft aufgeführt.

Wichtige technische Voraussetzungen der Kreislaufführung von Kunststoffen sind die abfallwirtschaftlichen Maßnahmen der **Sammlung** und **Sortierung**, die eine spätere Verwertung

Abbildung 9.2

Lineare -, Recycling - und Kreislaufwirtschaft



Quelle: eigene Darstellung

[Recycling] ermöglichen. Die Sammlung erfasst Abfälle im Hol- oder Bringsystem. Für Haushalte existieren Holsysteme mit Sammelgefäßen wie z. B. der Gelben Tonne oder auch der gelbe Sack bzw. die Wertstofftonne für Verpackungen oder stoffgleiche Nichtverpackungen. Bringsysteme sind z. B. Depotcontainer im Straßenraum oder Wertstoffstationen.

Nach der Sammlung, zu der auch der Transport des Sammelgutes zu Umschlag- und/oder Sortieranlagen zählt, ermöglicht die Sortierung eine Auftrennung des Sammelgutes nach verwertungsorientierten **Sortierspezifikationen**. Während industrielle Abfälle oft in bekannter Zusammensetzung und großer Reinheit anfallen, sind Kunststoffabfälle aus Haushalten, die vor allem aus Verpackungen bestehen, stark vermischt und verschmutzt. Neben der Trennung nach Korngrößen und Formen wird in Sortieranlagen vor allem die **Spektroskopie** (vgl. Kapitel 10) für die Kunststoffsortentrennung eingesetzt. Die Sortierung gewinnt aus den entsprechend erfassten Verpackungsabfällen Werkstoffströme definierter Qualität mit hohen Anteilen des Zielwerkstoffs (z. B. PE, PP, PS oder PET) und geringen Störstoffanteilen.⁸ Dabei entstehen auch **Mischkunststoffe**. Sofern diese Zielwerkstoffe für die entsprechende Produktanwendung als **Rezyklat** keine hinreichende Spezifikation aufweisen, können diese nicht werkstofflich verwertet werden. Daher sind dann ggf. andere Verfahren der chemischen oder der energetischen Verwertung notwendig.

⁸ Vgl. beispielsweise die Spezifikationen der DSD GmbH; verfügbar unter: <https://www.gruener-punkt.de/de/downloads.html>.

Beim Recycling von Kunststoffen ist zwischen werkstofflichem Recycling und chemischem Recycling zu unterscheiden. Das **werkstoffliche Recycling** (engl.: **mechanical recycling**) von Kunststoffen beschreibt die Aufbereitung von Altkunststoffen aus Abfällen zu neuen Kunststoffprodukten (Rezyklate, Erzeugnisse). Es umfasst Prozesse zur Vermahlung, aber auch die Aufbereitung über die Schmelze (inkl. Schmelzefiltration) oder in Lösemitteln zur selektiven Extraktion des Zielkunststoffes. Die Polymerketten bleiben, wenn auch z. T. verkürzt, erhalten und werden zur Herstellung eines neuen Produktes verwendet [ISO 15270:2008].

Das **chemische Recycling** (auch **rohstoffliches Recycling** oder **advanced recycling**) von Kunststoffabfällen zielt auf die Umwandlung in niedermolekulare, wiederverwertbare Bausteine ab [ISO 15270:2008]. Es umfasst Prozesse wie Vergasung, Pyrolyse, Solvolyse und Depolymerisation. Die im Kunststoff vorliegenden Polymerketten werden hierbei in kleinere Bausteine, wie z. B. Monomere, zerlegt. Diese Reaktionsprodukte können erneut als Ausgangsmaterialien zur Herstellung von Kunststoffen verwendet werden.

Begriffe wie **Upcycling** oder **Downcycling** werden häufig in Zusammenhang mit Recycling von Kunststoffen verwendet. Sie sind jedoch sehr unscharf und hängen deutlich von der Perspektive der Betrachter*innen ab. Sie sollten nicht oder nur mit umfassenden Erläuterungen verwendet werden. Besser geeignet ist der Begriff der **Kaskadennutzung**. Kaskadennutzung bezeichnet die Wiederverwendung oder das Recycling von Kunststoffprodukten bzw. Kunststoffabfällen in anderen Anwendungen als der ursprünglichen, dort substituieren sie wie beim Recycling Primärrohstoffe. Dabei werden sogenannte Nutzungskaskaden durchlaufen, die von höheren Wertschöpfungsniveaus in tiefere Niveaus fließen. Hierdurch wird die Rohstoffproduktivität gesteigert. Am Ende der Kaskadennutzung steht die energetische Verwertung.

In den aktuellen Debatten rund um eine Kreislaufwirtschaft der Kunststoffe wird zwischen Recycling von **Post-Consumer-Abfällen** einerseits und Recycling von **Post-Industrial-Abfällen** andererseits unterschieden. Post-Consumer-Abfälle entstehen bei den Endverbraucher*innen, d. h. bei Konsument*innen. Post-Industrial-Abfälle sind dagegen Abfälle, die beim Herstellungs- bzw. Verarbeitungsprozess von Kunststoffprodukten entstehen.

Verwendete und weiterführende Literatur:

- Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert (o.D.): Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen. Endbericht i. A. des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) URL: <https://www.irbnet.de/daten/baufo/20108035025/Endbericht.pdf> [zuletzt abgerufen: 28.02.2020].
- Bertling, Jürgen; Bertling, Ralf; Hamann, Leandra (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Oberhausen.
- European Chemical Industry Council (2020): Chemical Recycling; plastic waste becoming a resource; Positionspapier. URL: <https://cefic.org/app/uploads/2020/03/Cefic-Position-Paper-on-Chemical-Recycling.pdf> [zuletzt abgerufen: 16.03.2020].
- Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG) vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 23. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2232).
- ISO (2008): Kunststoffe - Richtlinie für die Verwertung von Kunststoff-Abfällen (ISO 15270:2008-06).
- Krähling, Hermann; Sartorius, Ingo (2012): Plastics after Use - Sustainable Management of Material and Energy Resources, in: Matyjaszewski K. and Möller M. (eds.), Polymer Science: A Comprehensive Reference, Vol 10, 581-595, Elsevier, Amsterdam.
- Sroufe, Robert; Curkovic, Sime; Montabon, Frank; Melnyk, Steven A. (2000): The New Product Design Process and Design for Environment: Crossing the Chasm. International Journal of Operations and Production Management, 20, 267-291.
- Ullmann, Fritz (2002): Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie. Wiley-VCH. Beitrag zu „Plastics Recycling“. DOI: 10.1002/14356007.

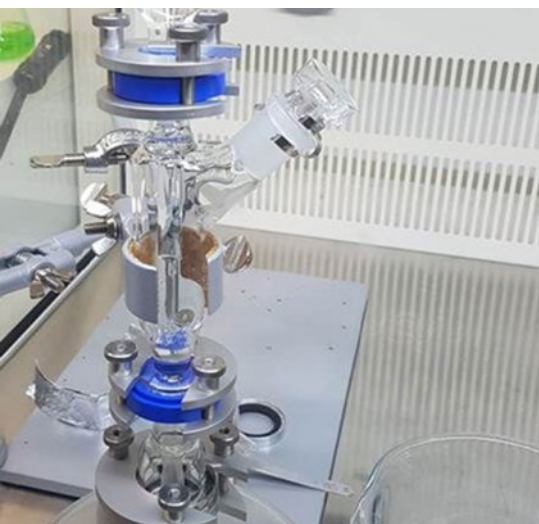
10 Umweltanalytik



Probenahmekorb zur Beprobung von Straßenkehricht.



Probenahmegerät „Rocket“ zur Entnahme von Proben in lymnischen Systemen.



Zweistufige Filtrationsapparatur zur Aufbereitung von Mikroplastik für die Analytik

Im Wesentlichen umfasst die Umweltanalytik die drei Schritte Probenahme, Probenaufbereitung und Detektion.

Die **Probenahme** ist die einmalige oder kontinuierliche Entnahme einer Stich- oder Mischprobe nach einem festgelegten Verfahren aus einem Umweltmedium (z. B. Wasser aus einem Fluss, Boden aus einem Feld oder Luft aus einem Raum). Anhand des Beispiels Wasser werden im Folgenden einige Begriffe der Probenahme erläutert, die sich bedingt aber auch auf Boden und Luft übertragen lassen. Die Probenahme muss einen repräsentativen Anteil des beprobten Mediums und gleichzeitig ausreichende Mengen an Kunststoffen für das gewählte Detektionsverfahren aufweisen. Als **Stichprobe** bezeichnet man eine an einer bestimmten Stelle entnommene Einzelprobe [DIN EN 16323:2014; § 2 Nr. 1 AbwV] oder eine oder mehrere unmittelbar nacheinander entnommene und vereinigte Einzelproben zur Beurteilung eines momentanen Zustandes [DIN 38402-11:2009]. Eine **Mischprobe** entspricht zwei oder mehreren Proben, die in geeignetem und bekanntem Verhältnis vermischt werden [DIN EN 16323:2014], oder einer Probe, die in einem bestimmten Zeitraum kontinuierlich entnommen wird, oder einer Probe aus mehreren Proben, die in einem bestimmten Zeitraum kontinuierlich oder diskontinuierlich entnommen und gemischt werden (§ 2 Nr. 2 AbwV). Im Abwasserbereich sind beispielsweise 2h- oder 24h-Mischproben (Tagesproben) üblich. Eine **qualifizierte Stichprobe** entspricht einer Mischprobe aus mindestens fünf Stichproben, die in einem Zeitraum von höchstens zwei Stunden im Abstand von nicht weniger als zwei Minuten entnommen und gemischt werden (DIN 38402-11:2009; § 2 Nr. 3 AbwV). Von einer **repräsentativen Stichprobe** ist die Rede, wenn man erwartet, dass die Art der Beprobung eine Stichprobe ergibt, die in Bezug auf die Verteilung der zu bestimmenden Merkmale der Grundgesamtheit ausreichend ähnlich ist. Bei der Beprobung von partikelbeladener Gas- oder Flüssigkeitsströmung versucht man dies beispielsweise durch die **isokinetische Beprobung** zu erreichen.

Begleitstoffe sind anorganische oder organische Bestandteile, die in der Probe enthalten sein können und die nachfolgende Detektion stören. Deshalb müssen bei der Beprobung, Probenaufbereitung und

Analytik entsprechende Vorkehrungen beachtet werden. Um die entnommene Probe für die nachfolgende Analyse vorzubereiten, erfolgt zunächst eine **Probenaufbereitung** oder **Probenaufreinigung**, welche sich je nach Eigenschaften der Probe (z. B. Anteil von anorganischen und organischen Stoffen), der zu untersuchenden Probenmenge und der Detektionsmethode voneinander unterscheidet. Häufig beginnt die Probenaufbereitung mit einer **Hygienisierung**, um die Zahl der Keime für die weitere Bearbeitung auf ein gesundheitlich unbedenkliches Maß zu reduzieren.

Bei der Aufbereitung von Proben zur Bestimmung des Kunststoffanteils werden zunächst sämtliche mit dem bloßen Auge sichtbaren Stücke entnommen. Etwaige Makrokunststoffe werden teilweise unter Zuhilfenahme von Mikroskopen identifiziert und dokumentiert. Als weitere Aufreinigungsschritte werden häufig Verfahren zur Oxidation und Dichtentrennung eingesetzt. Unter **Oxidation** ist in diesem Zusammenhang ein chemischer Prozess zu verstehen, bei dem natürliche Organik (z. B. Algen, Fette oder Tier- und Pflanzenreste) zu Kohlendioxid umgewandelt wird. **Dichtentrennung** ist ein physikalisches Verfahren, bei dem der Analyt (hier Kunststoff) in einer Suspension von anorganischen Begleitstoffen aufgrund der sich unterscheidenden Dichten der verschiedenen partikulären Bestandteile getrennt wird.

Der **Probenaufbereitung** schließt sich die Analyse an. Die **Detektion** z. B. von Mikroplastikpartikeln erfolgt mittels thermoanalytischer, spektroskopischer oder chemischer Verfahren. Die generierten Ergebnisse umfassen je nach Verfahren Angaben zu Polymertyp (z. B. PE, PET, PP, PS), Partikelanzahl, Partikelgrößen, Massen und teilweise auch Partikelform. **Thermoanalytische** Verfahren schließen Detektionsmethoden ein, bei denen chemische und physikalische Eigenschaften eines Stoffes oder Stoffgemisches und deren Änderung in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen werden. In der Regel umfassen die Ergebnisse Polymertypen und zugehörige Massen. Die **spektroskopischen** Verfahren sind eine Grup-

pe der optischen Detektionsmethoden, die auf der Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung bestimmter Energie/Wellenlänge mit molekularen Bestandteilen eines Stoffes beruhen. Die Beziehung zwischen den detektierten Signalen bzw. Signaländerungen und der Energie/Wellenlänge wird als **Spektrum** bezeichnet und liefert Informationen über den Polymertyp. Diese Information wird oftmals durch mikroskopische Aufnahmen ergänzt. Die Ergebnisse können Polymertyp, Partikelgrößen und Partikelanzahl wiedergeben.

Zur Validierung von Verfahren und Aufbereitungsschritten werden Referenzmaterialien verwendet. Ein **Referenzmaterial** ist ein ausreichend homogener Stoff mit einer oder mehreren definierten Eigenschaften, die für den Einsatz als Vergleichsgröße geeignet sind [ISO Guide 30:2015-02].

Unter **Blindwert** wird der Messwert verstanden, der ohne Hinzugabe der zu untersuchenden Probe generiert wird. Beim Blindwert werden alle Arbeitsschritte identisch zu einer realen Probe ausgeführt, jedoch ohne Einsatz von Probenmaterial. Er deutet damit auf mögliche Verunreinigungen hin, z. B. durch den Eintrag von Mikroplastik aus der Laborluft. Der Blindwert wird häufig zur Validierung des Verfahrens mitgemessen und sollte im Ergebnis angegeben werden.

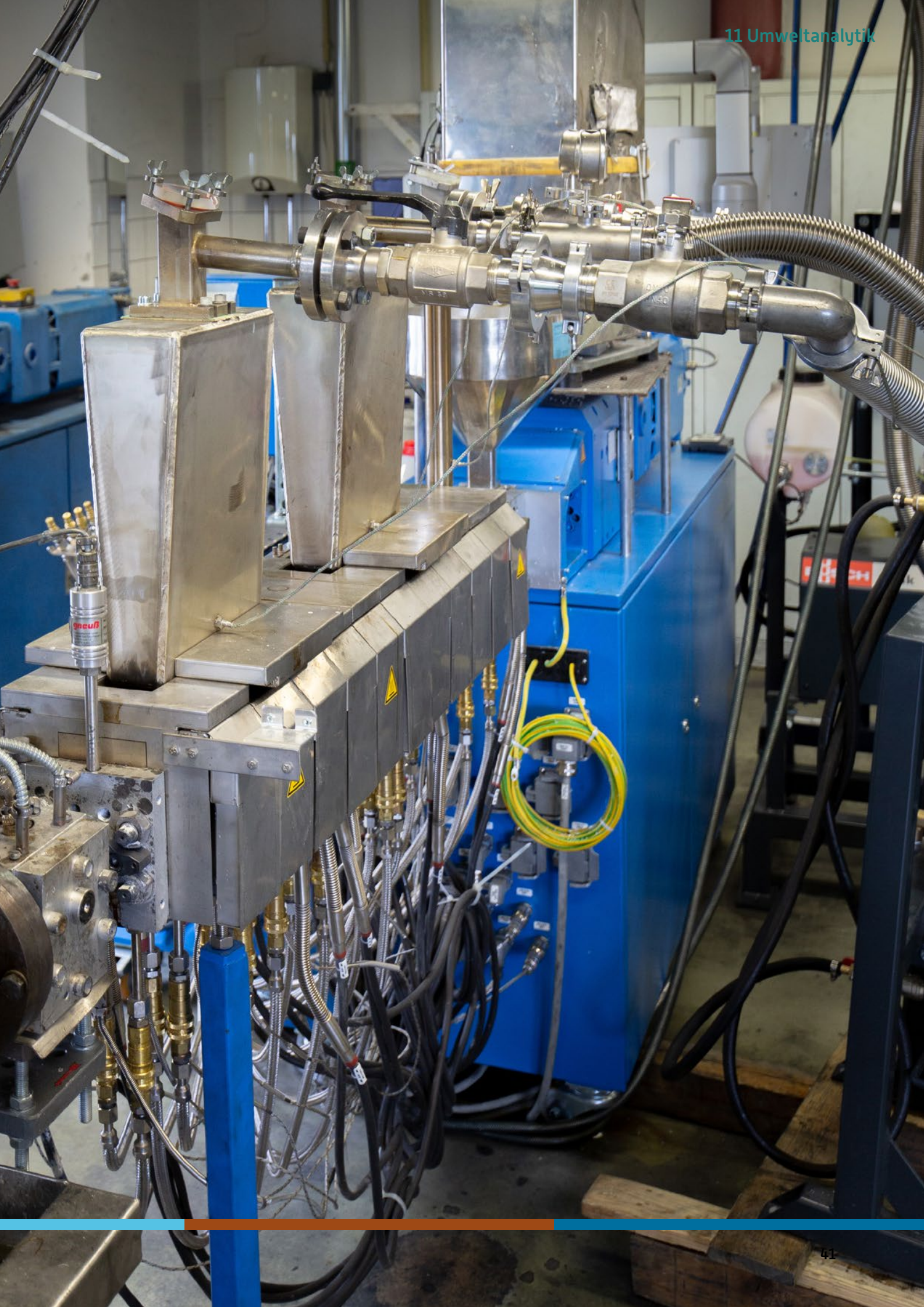
Monitoring umfasst alle systematischen Dokumentationen, Messungen oder Beobachtungen von bestimmten Prozessen oder eines Stoffes innerhalb eines definierten Systems über einen längeren Zeitraum. Es dient in der Regel dazu, Veränderungen zu überwachen oder die Einhaltung von gesetzlichen Vorgaben (z. B. Grenzwerte im Trinkwasser) zu kontrollieren.

Weitere Erläuterungen zu Verfahren und Begriffen im Bereich Mikroplastik finden sich im Statuspapier Mikroplastik-Analytik [Braun et al. 2020].

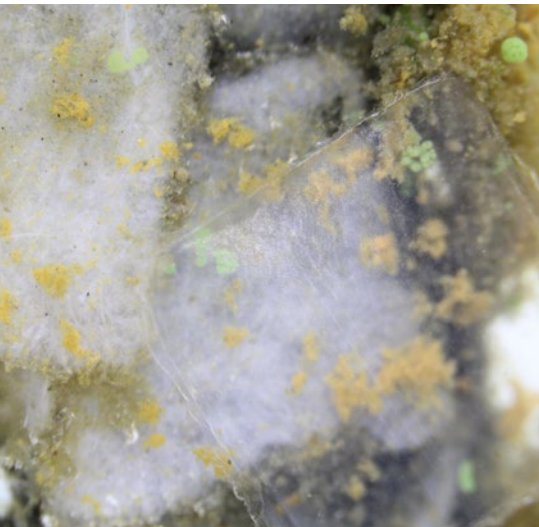
Verwendete und weiterführende Literatur:

- Abwasserverordnung [AbwV] in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 [BGBl. I S. 1108, 2625], zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. August 2018 [BGBl. I S. 1327].
- 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, Fraziska & 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 Probenahme, Probenaufbereitung und Detektionsverfahren. URL: https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2020-11/Statuspapier_Mikroplastik%20Analytik_Plastik%20in%20der%20Umwelt_2020.pdf [zuletzt abgerufen: 03.02.2021].
- DIN [2014]: Wörterbuch für Begriffe der Abwassertechnik; Dreisprachige Fassung. EN 16323:2014.
- DIN [2009]: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Allgemeine Angaben (Gruppe A) – Teil 11: Probenahme von Abwasser [A 11]. DIN 38402-11:2009.
- ISO [2015]: ISO Guide 30:2015-02. Referenzmaterialien - Ausgewählte Begriffe.





11 Wirkung von Kunststoffen



Aufwuchs eines Biofilms auf Polyethylen



Meerestiere verenden durch Verstrickungen und daraus resultierende Einschnürungen.



Größere Meeresorganismen verhungern immer wieder durch die Ingestion von größeren Mengen an Plastik.

Mikroplastik kann von Organismen aufgenommen werden. Schlüsselfaktoren für die Aufnahme im aquatischen Bereich sind die Größe der Mikroplastikpartikel. Im Größenbereich von Plankton (μm -Bereich) wird viel Mikroplastik aufgenommen, da hier grundsätzlich nur eine sehr geringe Selektivität bei der Nahrungsaufnahme existiert. Als **bioverfügbar** wird der Anteil eines Stoffes bezeichnet, dem ein Lebewesen ausgesetzt ist, der tatsächlich in den systemischen Kreislauf (Organe, Gewebe, Zellen) gelangt und dort zur Wirkung kommt. Ob es bei Kunststoffen eine Anreicherung in den Organismen, also eine **Bioakkumulation** gibt, ist bisher ungeklärt. Es werden jedoch Mikroplastikpartikel auch wieder ausgeschieden.

Die Gehalte von Mikroplastikpartikeln variieren je nach Konzentration der Verschmutzung im jeweiligen Umweltkompartiment stark. Diese Unterschiede lassen sich durch transportbestimmende Eigenschaften wie Größe, Form und Dichte der Partikel sowie durch Umweltfaktoren wie Strömungen und Aufwuchs von **Biofilmen** erklären (vgl. Kapitel 2).

Mikroplastikpartikel können im Wasser auch Schadstoffe aus ihrer Umgebung anlagern. Durch den hydrophoben Charakter vieler synthetischer Polymere kommt es zu einer Anhaftung von hydrophoben Schadstoffen am Mikroplastikpartikel, ähnlich wie bei der Anhaftung an natürliche Partikel. Diese werden dort in Konzentrationen nachgewiesen, die mehrere Größenordnungen über der Konzentration des umgebenden Mediums liegen kann. Polymerwissenschaftler*innen sprechen hier allgemein von **Sorption**. Außerdem beschreibt die Sorption einen Gleichgewichtsprozess zwischen Aufnahme (**Ad-** bzw. **Absorption**) und Abgabe (**Desorption**) eines Stoffes. Bei der Auslaugung oder Auslösung von Additiven aus der polymeren Matrix spricht man von **Leaching**.

Gut belegte Auswirkungen von Makroplastik in der Umwelt sind die **Verstrickung** von Meerestieren (marine Makrofauna) in Plastikmüll (Netze) und daraus resultierende **Einschnürungen**, welche durch Stress, Verletzungen oder Verhungern zum Tod der Tiere führen können. Die **Ingestion** (Fraß) von Plastik kann innere Verletzungen des Verdauungstraktes verursachen oder wie Einschnürungen zum Verhungern führen. Dies ist für größere Meeresorganismen (Krebse, Fische, Vögel

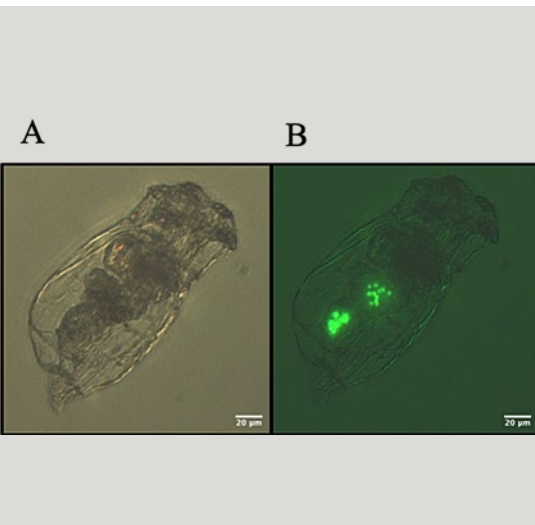
... in der Umwelt

und Wale] vielfach dokumentiert. Negative Effekte wurden auch für Korallenriffe infolge der Abdeckung von Korallen durch flächige Makrokunststoffe nachgewiesen. Darüber hinaus sind **Verblockungen** von Entwässerungskanälen durch (Kunststoff-)Abfälle vor allem im südostasiatischen Raum eine häufige Ursache für Überschwemmungen mit negativen Effekten auf die Umwelt.

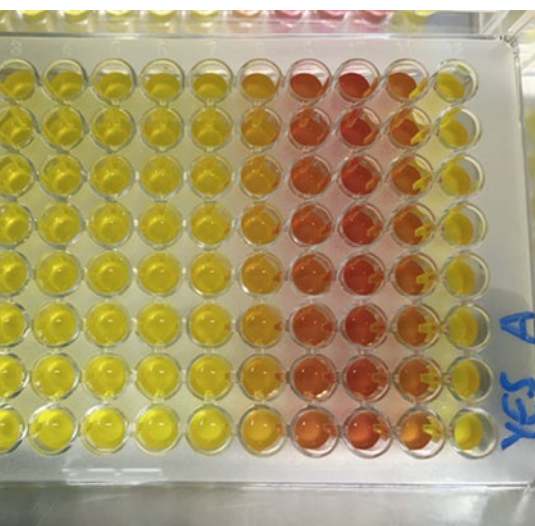
Verwendete und weiterführende Literatur:

- Bertling, Jürgen; Bertling, Ralf; Hamann, Leandra [2018]: Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Oberhausen.
- Sweet, Michael; Stelfox, Martin; Lamb, Joleah [2019]: Plastics and shallow water coral reefs. Synthesis of the science for policy-makers. United Nations Environment Programme: Nairobi. URL: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27646/plastic_corals.pdf?sequence=1&isAllowed=y [zuletzt abgerufen 16.03.2020].
- Umweltbundesamt [2015]: Plastik in der Donau. Untersuchung zum Vorkommen von Kunststoffen in der Donau in Österreich, Wien. URL: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REPO547.pdf> [zuletzt abgerufen: 24.10.2019].
- UNEP [2016]: Marine plastic debris and microplastics – Global lessons and research to inspire action and guide policy change. United Nations Environment Programme: Nairobi. URL: http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7720/-Marine_plastic_debris_and_microplastics_Global_lessons_and_research_to_inspire_action_and_guide_policy_change-2016Marine_Plastic_Debris_and_Microplastic.pdf?sequence=3&isAllowed=y [zuletzt abgerufen 16.03.2020].

12 Toxikologische Untersuchungen



Aufgenommene Polystyrol-Partikel in einem Rädertierchen (*B. calyciflorus*).



Proben werden ökotoxikologisch untersucht, ob sie hormonell wirksam sind.



Mesokosmen sind meist vereinfacht aufgebaute und teilgeschlossene experimentelle Anlagen zur Simulation naturnaher Bedingungen.

Toxikologische Untersuchungen dienen zur Abschätzung von Wirkungen eines Stoffes. Grundlegend zu differenzieren sind die Fachbereiche **Ökotoxikologie** und **Humantoxikologie**. Während sich die Ökotoxikologie mit der Auswirkung von Stoffen auf die belebte Umwelt befasst, untersucht die Humantoxikologie die Wirkung von Substanzen und Substanzgemischen auf den Menschen. Die **Toxizität** eines Stoffes ist dabei abhängig von seinem Wirkmechanismus (z. B. DNA-Schädigung [Genotoxizität] oder hormonelle Schädigung) und der aufgenommenen Menge oder Konzentration. Erreicht ein untersuchter Stoff oder eine bestimmte Substanz eine für ein Lebewesen tödliche Dosis bzw. Konzentration, so wird sie als **letale Dosis** (lethal concentration) bezeichnet. **LD₅₀** (LC₅₀) beschreibt die mittlere tödliche Dosis, bei der 50 Prozent der Individuen der Prüforganismen (Daphnie, Zebraquappe etc.) nach einer bestimmten Expositionszeit gestorben sind. Besteht der beobachtete Effekt nicht im Tod der Prüforganismen, wird das 50-prozentige Eintreten des beobachteten Effekts auch als **EC₅₀** bezeichnet.

Eine Analyse der biologischen Wirkung von Stoffen (bekannte oder unbekannte aktive [Einzel-]Substanzen oder Substanzmischungen) auf lebende Zellen oder Gewebe kann mit Hilfe sogenannter **Biotests** oder **Bioassays** erbracht werden. Hierbei gilt es verschiedene **Endpunkte** zu unterscheiden, auf welche die Untersuchung einer Biotestung ausgerichtet sein kann (Überlebensrate, Wachstum, Verhaltensänderung etc.).

In der Regel werden toxikologische Untersuchungen als standardisierte und reproduzierbare Verfahren im Labor durchgeführt. Eine möglichst starke Annäherung der Testbedingungen an die realen Umweltbedingungen kann im Bereich der Ökotoxikologie durch Mesokosmen erreicht werden. **Mesokosmen** sind künstlich geschaffene, meist vereinfacht aufgebaute und teilgeschlossene experimentelle Anlagen zur Simulation naturnaher Bedingungen.

Verwendete und weiterführende Literatur:

- Fent, Karl (2013): Ökotoxikologie: Umweltchemie - Toxikologie - Ökologie, 4. vollständig überarbeitete Auflage, Georg Thieme Verlag: Stuttgart.
Sadava, David; Hills, David M.; Heller, H. Craig; Hacker, Sally D. (2019): Purves Biologie, 10. Auflage, Springer Spektrum: Berlin.



13 Bewertungsverfahren für

Zur Bewertung der Wirkungen von Kunststoffeinträgen in die Umwelt können verschiedene Bewertungsverfahren eingesetzt werden.

Eine normierte [DIN EN ISO 14040:2009, DIN EN ISO 14044:2018] und weit verbreitete Methode zur Erfassung umweltrelevanter Vorgänge ist die **Lebenszyklusanalyse** [auch bekannt als **Umweltbilanz** oder **Ökobilanzierung** [engl.: **Life Cycle Assessment**, kurz: LCA]], in deren Zentrum die systematische Analyse der Umweltwirkungen eines Produktes während dessen gesamten Lebensweges steht. Mittlerweile findet dieser Ansatz nicht nur in der Produktbewertung Anwendung, sondern kann gleichermaßen auch bei Verfahren, Dienstleistungen und Verhaltensweisen eingesetzt werden. Die Berücksichtigung von Kunststoffeinträgen in die Umwelt erfolgt in Ökobilanzen bislang nicht. Hierzu gibt es jedoch aktuelle Entwicklungsprojekte.

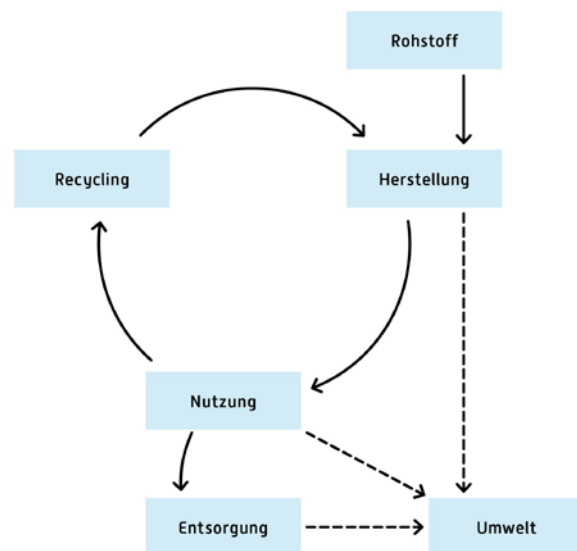
Ein methodisch sehr ähnlicher Ansatz zur Ökobilanz ist die **Stoffstromanalyse**, auch **Stoffstrombilanzierung** genannt, bei der Stoff- und Materialströme erfasst werden. Die beiden Verfahren können nicht immer eindeutig voneinander abgegrenzt werden, allerdings stehen bei Stoffstromanalysen eher die Quantitäten und Wege der Stoff-, Material- und Energieflüsse eines Systems im Vordergrund, während in Ökobilanzen stärker die mit diesen Flüssen verbundenen Umweltwirkungen betrachtet und bewertet werden. Zudem ist die Stoffstromanalyse im Gegensatz zur Ökobilanz nicht international genormt. Die Stoffstrombilanzierung bildet eine wesentliche Voraussetzung für die Umsetzung eines **Energie- und Stoffstrommanagements (ESSM)**, welches auf die ökologische und ökonomische Beeinflussung von Stoff- und Energieströmen abzielt. Im Fokus der Optimierungen stehen dabei die Erhöhung der Ressourcen- oder Materialeffizienz sowie das Schaffen nachhaltiger Kreisläufe.

Ein (Emissions-) **Budgetansatz** kann auf einer solchen Bilanzierung einzelner Stoffströme aufbauen, indem – ausgehend vom aktuellen Bestand einer Substanz in der Umwelt – fort-

laufende direkte und diffuse Einträge berücksichtigt und natürlichen Zerfalls- und Abbauprozessen über einen festgelegten Zeitraum hinweg gegenübergestellt werden. Das Konzept, welches ursprünglich vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen im Kontext der klimapolitischen Debatte entwickelt wurde, kann ferner zur Ableitung von Pro-Kopf-Budgets für verschiedene Materialien oder Substanzen genutzt werden.

Abbildung 13.1

Phasen der Kreislaufwirtschaft



Quelle: Ecologic Institut

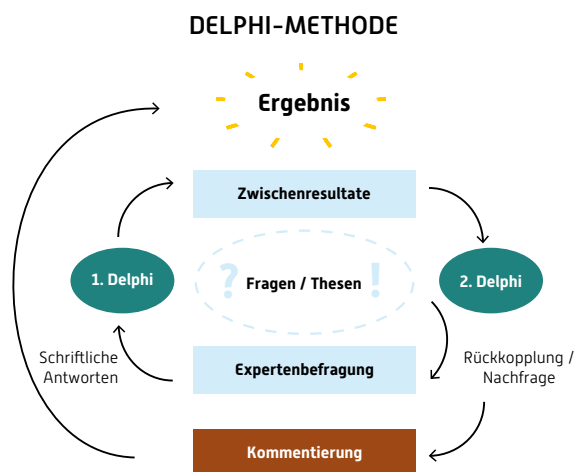
Multikriterielle Bewertungsverfahren können dem*der Entscheider*in helfen, verschiedene Handlungsmöglichkeiten zu bewerten, untereinander zu vergleichen und eine Begründung für die Auswahl einer präferierten Alternative nach objektiven Kriterien bieten. Sie kommen dann zum Einsatz, wenn der*die Entscheider*in gleichzeitig mehrere Ziele verfolgt, die entweder vollständig unabhängig, deckungsgleich, komplementär oder aber auch konkurrierend sein können. Zur multikriteriellen Bewertung existieren in der Fachliteratur eine Vielzahl an Bewertungsverfahren, die für verschiedene

... Kunststoffeinträge in die Umwelt

Verwendungszwecke eingesetzt werden können und allesamt auf vordefinierten Richtlinien und Regeln (Kriterien, Berechnungsverfahren, mathematische Methoden) zur Entscheidungsfindung basieren. Ein Großteil dieser Verfahren nutzt **Indikatoren-Sets**, mit deren Hilfe die einzelnen Kriterien qualitativ oder quantitativ bewertet werden können.

Liegt der Fokus der Bewertung mehr auf der Beobachtung und Analyse globaler Trends in Wissenschaft und Technik, kann eine **Technikfolgenabschätzung** dabei unterstützen, Chancen und Risiken verschiedener technischer Entwicklungen abzuschätzen, um daraus politische Handlungsempfehlungen oder Richtlinien für die Vermeidung dieser Risiken und eine verbesserte Nutzung der Chancen zu geben.

Abbildung 13.2
Delphi-Methode



Quelle: Ecologic Institut

Zur Beantwortung komplexer Fragestellungen, für die bisher wenig gesichertes Wissen existiert oder die stark normativ geprägt sind, eignen sich die oben genannten Bewertungsmethoden jedoch nur bedingt. Vielmehr kommen hierfür explorative Untersuchungsansätze wie beispielsweise Expert*innenbefragungen in

Betracht. Dafür können unterschiedliche Methoden der **(Stakeholder-)Beteiligung** oder **Partizipation** eingesetzt werden. Wird eine Vielzahl von Expert*innen konsultiert, ist die **Delphi-Methode**, eine Expert*innenumfrage in zwei oder mehreren "Runden", eine häufig eingesetzte Methode. Ziel ist es dabei, die Bandbreite an Antworten zu reduzieren und – in diesem Fall – einem Expert*innenkonsens näher zu kommen. Dazu erhalten die Expert*innen im Nachgang zu ihrer individuellen Befragung Feedback in Form einer statistischen Auswertung des Gruppenergebnisses. In jeder Runde werden die Expert*innen ermuntert, ihre vorherigen Antworten in Bezug auf die Kommentare der anderen Expert*innen zu überprüfen.

Verwendete und weiterführende Literatur:

- DIN (2018): Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen [ISO 14044:2006 + Amd 1:2017]; Deutsche Fassung. EN ISO 14044:2006 + A1:2018.
- DIN (2009): Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen [ISO 14040:2006]; Deutsche und Englische Fassung. EN ISO 14040:2006.
- Häder, Michael (2014): Delphi-Befragungen. Ein Arbeitsbuch. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Hein, Andreas; Lévai, Peter; Wencki, Kristina (2015): Multikriterielle Bewertungsverfahren: Kurzbeschreibung und Defizitanalyse (Teil 1). In: gwf Wasser|Abwasser, Heft 1, S. 58-61.
- Laux, Helmut (1998): Entscheidungstheorie. 4. Aufl. Springer-Verlag Berlin u. a. 1998.
- Neu, Matthias. (2015): Unternehmensführung. 2. Aufl. Berliner WissenschaftsVerlag Berlin 2005.
- Umweltbundesamt (2013): Stoffstromanalyse. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/stoffstromanalyse> [zuletzt abgerufen 16.03.2020].

Autor*innen

Korrespondenzautor:

Jürgen Bertling (Fraunhofer UMSICHT)

Weitere Autor*innen

Claus Gerhard Bannick (Umweltbundesamt)

Luisa Barkmann (Technische Universität Darmstadt IWAR)

Ulrike Braun (Umweltbundesamt)

Doris Knoblauch (Ecologic Institut)

Caroline Kraas (WWF Deutschland)

Linda Mederake (Ecologic Institut)

Franziska Nosić (INEOS Styrolution)

Bodo Philipp (Universität Münster)

Maike Rabe (Hochschule Niederrhein)

Ingo Sartorius (BKV GmbH)

Hannes Schritt (Ecologic Institut)

Ulf Stein (Ecologic Institut)

Kristina Wencki (IWW Zentrum Wasser)

Katrin Wendt-Potthoff (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ)

Jörg Woidasky (Hochschule Pforzheim)

Zuarbeit/Rückmeldung aus den Projekten:

Marco Breitbarth (Universität Kassel)

Stephanie Cieplik (BKV GmbH)

Britt Clauß (TU Chemnitz)

Maria Daskalakis (Universität Kassel)

Elke Dopp (IWW Zentrum Wasser)

Carsten Eichert (RITTEC Umwelttechnik GmbH)

Markus Engelhart (TU Darmstadt IWAR)

Klaus Freimuth (Miele & Cie. KG)

Anja Hentschel (Hochschule Darmstadt)

Natalia Ivleva (TU München)

Franziska Klaeger (Baden-Württemberg Stiftung)

Robert Klauer (Vaude GmbH & Co. KG)

Kristina Klein (Goethe Universität Frankfurt)

Oliver Knoop (TU München)

Claus Lang-Koetz (Hochschule Pforzheim)

Rainer Mantel (BKV GmbH)

Jochen Moesslein (Polysecure GmbH)

Annett Mundani

Malin Obermann (Hochschule Niederrhein)

Mandy Paschetag (TU Braunschweig)

Sarah Piehl (Institut für Ostseeforschung Warnemünde)

Christina Röleke (Henkel AG & Co. KGaA)

Frieder Rubik (Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung)

Andreas Schedl (Neue Materialien Bayreuth)

Christian Scheid (TU Kaiserslautern)
Ulrich Schlotter (BKV GmbH)
Stephan Scholl (TU Braunschweig)
Daniel Venghaus (TU Berlin)
Bianca Wilhelmus (INEOS Styrolution)
Cordula Witzig (TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser)
Katharina Wörle (Bayerisches Landesamt für Umwelt)
Nicole Zumbülte (TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser)

Stichwortverzeichnis

A

abbaubar, inhärent 31
abbaubar, leicht 31
abbaubar, schwer 31
Abbau, biologischer 30
Abbau, biotischer 30
Abbaugrade, Anforderungen an 32
Abbauprozesse, abiotische 30
Abfälle 35
Abfälle, Post-Consumer- 37
Abfälle, Post-Industrial- 37
Abrasion 17
Abrieb 17
Absorption 42
Abwasser 26
Abwasserbehandlungsanlage 27
Additive 12
Adsorption 42
advanced recycling 37
aerob 30
Aerosol 22
Agglomerat 22
Alterung 30
amorph 13
anaerob 10 30
Archaeen 10
Atmosphäre 8

B

Bakterien 10
Beach Litter 17
Begleitstoffe 38
Benthal 11
Benthos 11
Beschichtung 13
Beseitigung 36
Beteiligung, (Stakeholder-) 47
Bioabbau, Prüfbedingungen für 32
Bioakkumulation 42
Bioassays 44
Biobasierte Kunststoffe 14
Biofilm 11 42

Biologisch abbaubarer Kunststoff 14
biologischer Abbau 30
Biota 10
Biotests 44
biotischer Abbau 30
bioverfügbar 42
Bioverfügbarkeit 42
Blend 13
Blindwert 39
Boden 8
Bodenlösung 9
Bodenluft 9
Budgetansatz 46

C

chemische Recycling 37
Circular Economy 34

D

Das werkstoffliche Recycling 37
Degradationstemperatur 14
Delphi-Methode 47
Depolymerisation 30
Design-for-Environment (DfE) 35
Design-for-Recycling (DfR) 35
Desorption 42
Detektion 39
Dichte 23
Dichtentrennung 39
disperse Phase 22
disperses System 22
Dispersion 22
dissipative Verluste 34
Downcycling 37
Duroplasten 13

E

EC50 44
Edaphon 11
Einsatz, bewusst (intendiert) 17
Einschnürungen 42
Eintragspfade 27

Elastomeren 13
Emission 16
Emulsion 22
Endpunkte 44
Energie- und Stoffstrommanagement
(ESSM) 46
Exposition 16

F

faserförmiges Mikroplastik 21
Fasern 20 23
Fauna 10
Feststoffdichte 23
Filamente 24
Flocke 22
Flora 10
flüssig 14
Fracht 26
Fragmente 23
Fragmentierung 17 30
Freisetzung 16
Füllstoffe 12

G

Gärrückstände 17
Gebrauchstemperatur 14
Gehalt 23
gelartige Polymere 14
Glasübergangstemperatur 14
Granulate 22
großes Mikroplastik 20
Grundwasserkörper 8
Grundwasser 8
Gummi 13

H

halbsynthetische Polymere 14
Halbwertszeit 31
Haufwerk 22
Humantoxikologie 44
Hydrosphäre 8
Hygienisierung 39

I

Immission 16
Indikatoren-Sets 47
Ingestion 42
Inhärent abbaubar 31
isokinetische Beprobung 38

K

Kaskadennutzung 37
Kautschuk 13
Klärschlämme 17 27
Klebstoffe 13
Komposte 17
Kompostierbarkeit 32
kontinuierliche Phase 22
Konzentration 23
Korn 22
Kreislaufwirtschaft 34
Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) 34
Kunststoffe 12
Kunststoffe, biobasierte 14
Kunststoffe, biologisch abbaubare 14
Kunststoffemission 16

L

LD50 44
Leaching 42
Lebenszyklusanalyse 46
Leicht abbaubar 31
letale Dosis 44
Life Cycle Assessment (LCA) 46
Litter, Beach 17
Littering 17
Litter, Marine Plastic 17
Litter, Plastik 17
Löslichkeit 14
Luft 8

M

Makrofauna 10
Makroflora 10
Makromoleküle 12

Makrophytobenthos 11
 Makroplastik 20
 Makrozoobenthos 11
 Marine Plastic Litter 17
 mechanical recycling 37
 Meiofauna 10
 Mesofauna 10
 Microbeads 21
 Mikrofasern 21
 Mikrofauna 10
 Mikroflora 10
 Mikroorganismen 10
 Mikroplastik 20
 Mikroplastik, faserförmiges 21
 Mikroplastik, großes 20
 Mikroplastik, primäres 21
 Mikroplastik, sekundäres 21
 Mineralisation 30
 Mischkanalisation 26
 Mischkunststoffe 36
 Mischprobe 38
 Mischwasser 27
 Mischwasserentlastungen 28
 Monitoring 39
 monodispers 23
 Monomer 12

N

Nanoplastik 20
 natürliche Polymere 14
 Niederschlagswasser 26
 Niederschlagswassereinleitungen 28

O

Oberflächenwasserkörper 8
 Oberflächenzerrüttung 17
 oberirdische Gewässer 8
 Ökobilanzierung 46
 Ökodesign 34
 Ökotoxikologie 44
 Oligomer 12
 Oxidation 39

P

Partikel 20 22
 Partikeldichte 23
 Partikelform 22
 Partikelgröße 23
 Partikelkonzentration 23
 Partizipation 47
 Pedosphäre 8
 Pellets 22
 persistent 31
 persistent, sehr 32
 Persistenz 30
 Phase, disperse 22
 Phase, kontinuierliche 22
 Plaste 12
 Plastic Litter 17
 Plastik 12
 polydispers 23
 Polymere 12
 Polymere, gelartige 14
 Polymere, halbsynthetische 14
 Polymere, natürliche 14
 Polymere, synthetische 14
 Polymere, wasserlösliche 14
 Post-Consumer-Abfälle 37
 Post-Industrial-Abfälle 37
 primäres Mikroplastik 21
 Probenahme 38
 Probenaufbereitung 39
 Probenaufreinigung 39
 Produktverantwortung 34
 Prokaryonten 10
 Prüfbedingungen für Bioabbau 32
 Puder 23
 Pulver 23

Q

qualifizierte Stichprobe 38

R

Recycling 36
 recycling, advanced 37

Recycling, chemisches 37
recycling, mechanical 37
Recycling, rohstoffliches 37
Recycling, werkstoffliches 37
Referenzmaterial 39
Reindichte 23
repräsentative Stichprobe 38
Rezyklat 36
rohstoffliches Recycling 37

S

Sammlung 36
schädliche Auswirkungen 16
Schadstoffe 16
Schaumstoffe 13
Schmelztemperatur 14
Schmutzwasser 26
Schüttdichte 23
Schüttgut 22
schwer abbaubar 31
Sediment 9
sekundäres Mikroplastik 21
Sekundärquellen 17
Sorption 42
Sortierspezifikationen 36
Sortierung 36
Spektroskopie 36
spektroskopisch 39
Spektrum 39
Stakeholder-Beteiligung 47
Stauhaltungen 9
Stichprobe 38
Stichprobe, qualifizierte 38
Stichprobe, repräsentative 38
Stoffstromanalyse 46
Stoffstrombilanzierung 46
Straßenabfluss 26
Straßenkehrriecht 26
Stückgut 20 22
Suspension 22
synthetische Polymere 14

T

Technikfolgenabschätzung 47
Teilchen 22
teilkristallin 13
Thermoanalytisch 39
Thermoplasten 13
Toxizität 44
Transmission 16
Trennkanalisation 26

U

Übergangsgewässern 8
Umweltbilanz 46
Umwelteintrag 16
Umweltkompartimente 8
Umweltmedien 8
umweltschonend 17
Upcycling 37

V

Verblockungen 43
Verbundwerkstoffe 13
Verluste, dissipative 34
Vermeidung 35
Vernetzung 13
Verschleiß 17
Verstrickung 42
Verwertung 36
Verwitterung 17
Vorbereitung zur Wiederverwendung 36

W

Wasser 8
wasserlösliche Polymere 14
werkstoffliche Recycling 37
Wiederverwendung 35

Z

Zerfall 17
Zersetzungstemperatur 14
zirkuläre Wirtschaft 34
Zirkularwirtschaft 34

Abbildungsverzeichnis

Titel: @Lena Aebli / Ecologic Institut

S. 8: @Jaroslav Machacek / fotolia.com, @Sophie Ittner / Ecologic Institut, @Peter H / pixabay.com

S. 10: @Lebendkulturen.de / Shutterstock.com, @Caros Rondon / Shutterstock.com,
@KatrIn Wendt-Pothoff

S. 12: @bohbeh / adobe stock, @Tabeajaichhalt / pixabay.com, @wikipedia.org

S. 16: @iamporpla / iStockPhoto.com, @varun gaba / unsplash.com, @Fotos593 / shutterstock.com

S. 19: @Richard Whitcombe / shutterstock.com

S. 20: @Fred Dott / Greenpeace, @G. Wahl / adobe stock, / @Julius Bonkhoff / HS Niederrhein

S. 22: ©XXLPhoto.jpg / shutterstock.com, @Julius Bonkhoff / HS Niederrhein, @wikipedia.org

S. 25: @TU Dresden

S. 26: @Daniel Venghaus, @Lena Aebli / Ecologic Institut, @Stefanie Meyer

S. 29: @Ivan Bandura / Unsplash

S. 30: @Ann-Katrin Reuwer / Universität Osnabrück, @herb007 / pixabay.com

S. 33: @Brian Yurasits / Unsplash

S. 38: @Daniel Venghaus, @Alexander Tagg, @Robin Lenz

S. 40/41: @Dauber/IKV

S. 42: @Rico Leiser/ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, @Maxim Blinkov / shutterstock.com,
@White Comberd / fotolia.com

S. 44: @Claudia Drago, Julia Pawlak, Guntram Weithoff / Frontiers in Environmental Science,
@Goethe-Universität Frankfurt, @Ecologic Institut

S. 45: ©Lebendkulturen.de / shutterstock.com





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

ISBN 978-3-937085-35-7



9 783937 085357