



Infobrief

Mikroplastik

Ursachen, Verbreitung und Wirkung

Susanne Donner

Mikroplastik

Ursachen, Verbreitung und Wirkung

Aktenzeichen: WD 8 - 3010 - 091/21
Abschluss der Arbeit: 25. Januar 2022
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und
Forschung

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	4
2.	Definition und Eigenschaften	4
3.	Zusammensetzung von Mikroplastik	6
4.	Vorkommen und bekannte Quellen	7
4.1.	Wasser	8
4.2.	Boden	9
4.3.	Luft	10
5.	Wirkung	11
5.1.	Mensch	11
5.2.	Umwelt	14
6.	Literatur- und Quellenverzeichnis	16

1. Einführung

Mikroplastik stammt aus vom Menschen erzeugten Kunststoffen. Es kann sowohl gezielt mikrometergroß hergestellt werden als auch bei der bestimmungsgemäßen Verwendung entstehen. Bekannte Beispiele für letzteres sind der Abrieb von Reifen, die Befüllung und der Gebrauch von Wasserflaschen aus Kunststoff (üblicherweise aus Polyethylenterephthalat PET) oder das Tragen und Waschen von Bekleidung aus synthetischen Fasern, die auf Kunststoffen basieren. Weiterhin entsteht Mikroplastik unausweichlich infolge der molekularen und mechanischen Degradation von Kunststoffen, wenn diese beabsichtigt oder unbeabsichtigt in die Umwelt gelangen. Typische Beispiele sind der Zerfall bzw. Abbau von Makroplastik, also größeren Kunststoffabfällen wie Plastiktüten oder Kunststofffolien auf Äckern. Makroplastik in der Umwelt ist also eine wichtige Quelle von Mikroplastik in der Biosphäre.

Die Verbreitung von Mikroplastik in der Umwelt ist insofern zu erwarten, da Kunststoffe seit über hundert Jahren von Menschen genutzt werden. Die globale Kunststoffproduktion ist seit Erfindung der Materialklasse sukzessive gestiegen und hat sich in den letzten 50 Jahren verzwanzigfacht (Lippelt 2017). 2019 belief sich die weltweit produzierte Menge an Kunststoffen auf 368 Millionen Tonnen (Statista 2021). Marktanalysten erwarten global einen weiteren Anstieg.

Aufgrund der hohen Lebensdauer der zugrunde liegenden Materialien von wenigen Wochen bei bioabbaubaren Kunststoffen bis zu geschätzten 2000 Jahren bei besonders robusten Varianten (Bertling et al. 2018) handelt es sich bei Mikroplastik einen quasi-persistenten Fremdstoff - in Analogie zu langlebigen Chemikalien. Sein Vorkommen in der Umwelt nimmt in dem Maße zu, indem neue Einträge in kurzen Zeitskalen bezogen auf den Abbau erfolgen. Forschende haben erste Prognosen erstellt, die auf eine Zunahme der Mikroplastikbelastung in der Zukunft hindeuten (vgl. Sharma et al. 2020). Die bisher vorhandenen Daten zur Größenverteilung der Partikel reichen jedoch nicht aus, um den Zerfall genau zu beschreiben und damit die Belastung exakt vorherzusagen (Lenz 2022).

Die Forschung hat ergeben, dass die Umweltmedien Luft, Boden und Wasser allgegenwärtig (ubiquitär) und global mit Mikroplastik belastet sind. Im vorliegenden Infobrief wird der Stand der Forschung hierzu wiedergegeben. Sofern bekannt werden einzelne Quellen, aus denen Mikroplastik in das jeweilige Umweltmedium gelangt ist, erörtert. Generell steht die Forschung jedoch bei der Frage, welche kunststoffbasierten Konsumgüter in welchem Umfang zu ubiquitären Mikroplastikbelastung beitragen, erst am Anfang.

Schließlich wird der Wirkungen von Mikroplastik auf Menschen und Umwelt nachgegangen. Über die Umweltmedien Boden, Luft und Wasser gelangen die Partikel in die Nahrungskette und damit in den Menschen. Diskutiert werden verschiedene denkbare Wirkungsweisen von Mikroplastik im menschlichen Körper, die erläutert und mit Blick auf den Stand der Erkenntnisse eingeordnet werden.

2. Definition und Eigenschaften

Als Mikroplastik werden Teilchen aus Kunststoff bezeichnet, die im Durchmesser kleiner als fünf Millimeter sind. Sie können folglich mit bloßem Auge noch sichtbar sein oder auch unsichtbar,

weil nur wenige Mikro- oder gar Nanometer groß. **Mikroplastik** umfasst Partikel, die rund, (scharf)kantig, in unterschiedlichen Geometrien oder auch als Fasern vorliegen können.

Darauf aufbauend hat die Europäische Chemikalienbehörde 2019 eine präzisere Definition mit dem Ziel der Aufnahme von Mikroplastik in den regulatorischen Rahmen der Chemikalienverordnung (Reach)¹ vorgeschlagen: Demnach handelt sich bei Mikroplastik um feste polymerbasierte Partikel, deren Dimensionen zwischen einem Nanometer und fünf Millimetern liegen. Auch Fasern mit einer Länge von drei bis fünfzehn Nanometern zählen hinzu (ECHA 2019: 16). Damit würden ausdrücklich Plastikteilchen, die in der Wissenschaft manchmal als „**Nanoplastik**“ bezeichnet werden, unter dem summarischen Begriff des „Mikroplastik“ erfasst.

Nanoplastik kann aber im Einzelfall von Forschern gesondert betrachtet, untersucht und auch als eigenständige Kategorie bezeichnet werden. Mitunter findet sich in der Fachliteratur die Definition für Nanoplastik für Partikel kleiner einem Mikrometer.

Auf Basis toxikologischen und ökotoxikologischen Wissens kann davon ausgegangen werden, dass Partikel mit abnehmender Größe biologische Schranken leichter passieren - zum Beispiel in Zellen eindringen können. Daher interessieren nanoskalige Partikel hinsichtlich der Wirkung besonders (Gruppe leitender wissenschaftlicher Berater - SAM 2019: 8). Über das Vorkommen nanometergroßer Plastikpartikel ist gleichwohl deutlich weniger bekannt als über größere Mikroplastikteilchen. Das liegt daran, dass es kaum Messmethoden gibt, die nanoskalige Partikel mit detektieren können (vgl. Mitrano et al. 2021).

Abzugrenzen vom Mikroplastik ist das so genannte Makroplastik, auch als „Marine Litter“ bezeichnet. Dabei handelt es sich um Kunststoffteile von mehr als fünf Millimetern Durchmesser, die folglich immer mit bloßem Auge sichtbar sind (vgl. Deutscher Bundestag 2021).

Abhängig von der Quelle des Mikroplastik unterscheidet man darüber hinaus zwischen **primärem** und **sekundärem Mikroplastik**: Primäres Mikroplastik wird gezielt in entsprechenden Abmessungen hergestellt: Es dient dann etwa als Zusatz in Reinigungsmitteln, Kosmetika, Baustoffen und Straßenbelägen. Es entsteht mitunter aber auch erst bei der bestimmungsgemäßen Verwendung kunststoffhaltiger oder kunststoffbasierter Erzeugnisse und Produkte: etwa als Reifenabrieb oder beim Waschen von Synthetikkleidung. Auch beim Fahren von Schiffen werden plastikbasierte Anstriche durch Reibung abgelöst (Bertling et al. 2018: 9).

Sekundäres Mikroplastik entsteht dagegen nach dem Ende des regulären Lebenszyklus kunststoffbasierter Güter in der Umwelt infolge des allmählichen mechanischen wie chemischen Abbaus der Kunststoffe. Makroplastik zerfällt infolge des ultravioletten Lichts der Sonne, der Scherkräfte von Wind und Wellen sowie unter dem Einfluss des Sauerstoffs der Luft unausweichlich in immer kleinere Bestandteile und schließlich zu Mikroplastik. Dieser Zerfall ist ein dem Material „Kunststoff“ innewohnender natürlicher Prozess.

1 Die Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 steht für Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals ‚Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien‘.

Der Abbau dauert je nach Kunststoff und Umweltbedingungen unterschiedlich lang. Wissenschaftlich ist er nicht in Echtzeit untersucht, da Studien selten mehrere Generationen überspannen. Eine der jüngsten Analysen zu Mikroplastik in der Umwelt erstellten Forschende des Fraunhofer-Instituts für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik in Oberhausen im Jahr 2018.² Bertling et al. schätzen in der Analyse, dass der Abbau beständiger Kunststoffe wie Polyethylen PE bis zu 2000 Jahre beanspruchen kann (Bertling et al. 2018: 27).

3. Zusammensetzung von Mikroplastik

Kunststoffe sind eine äußerst vielfältige Werkstoffklasse. All ihren Vertretern ist gemein, dass sie aus Molekülen aufgebaut sind, die ähnlich den Gliedern einer Kette zu sehr langen Verbindungen (Polymeren) verknüpft sind. Die Ausgangsstoffe der meisten Kunststoffe entstehen aus fossilen Energieträgern, vorwiegend Erdöl oder Erdgas. Einige werden aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt (z. B. Polymilchsäure).

Die etwas mehr 200 bekannten Kunststofftypen beschreiben die tatsächliche Vielfalt nur unzureichend. Jeder Kunststoffhersteller kann über die Produktionsbedingungen die Kettenlänge wie auch Verzweigungen zwischen den Ketten einstellen. Auf diese Weise entstehen beispielsweise viele unterschiedliche kurz- und auch langkettige Polyethylene definierter Eigenschaften. Die Vielfalt und Vielzahl der Kunststoffe ist nicht genau bekannt, weil jedes Produkt entsprechend seiner Spezifikation unterschiedlich ist. Die verschiedenen Kunststoffe müssen in der EU nicht registriert oder zugelassen werden. Polymere sind nach Artikel 2 Absatz 9 der REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 von der Registrierung von Chemikalien ausgenommen.

Hinzu kommt, dass handelsübliche Kunststoffe gerade nicht nur aus reinem Kunststoff bestehen, sondern Zusätze enthalten, die sie gebrauchstauglich machen. Dies sind Füllstoffe, Farbstoffe, Konservierungsstoffe zum Schutz vor dem Zerfall durch Luftsauerstoff, Stabilisatoren zum Schutz vor dem Zerfall durch ultraviolette Strahlung, Weichmacher, um den spröden Kunststoff elastisch und formbar zu machen, Flammenschutzmittel zum Schutz vor Entflammbarkeit und Rauchentwicklung und mitunter auch Biozide, die den Kunststoff vor Besiedelung mit Mikroben schützen. Den Anteil der Zusätze im Kunststoff beziffert Bertling et al. zwischen 5 und 73 Prozent (Bertling et al. 2018: 17). Wenn ein Kunststoff also mit „PE“ für Polyethylen gekennzeichnet ist, ist seine genaue Zusammensetzung hinsichtlich der Zusätze wie auch der Kettenlänge nicht näher charakterisiert. Im Kunststoff können als unbeabsichtigte Inhaltsstoffe auch Substanzen aus der Herstellung enthalten sind. Dabei handelt es sich beispielsweise um Katalysatoren, geringe Mengen der Ausgangschemikalien und auch um Lösemittel.

Beabsichtigte und unbeabsichtigte Zusätze sind im Kunststoff in der Regel nicht chemisch fest (bzw. nur selten) gebunden. Sie entweichen über den Lebenszyklus unausweichlich aufgrund der Diffusion langsam aus dem Material und migrieren in das umgebende Medium. Dabei kann es

² In Auftrag gegeben wurde die Literaturstudie von den Organisationen BASF, Evonik, Beiersdorf, Nestec, DSD - Duales System Holding, Wupperverband, Gelsenwasser, hanseWasser, Emschergenossenschaft/Lippeverband sowie von den Hochschulen RWTH Aachen und TU Dresden.

sich um Wasser, Boden, Luft, im Körper von Tieren und Menschen auch um Blut oder Gewebeflüssigkeit handeln. Die Migration der teils toxikologisch und ökotoxikologisch relevanten Zusätze ist bei Kunststoffen eine naturgesetzliche Unausweichlichkeit. Sie ließe sich nur vermeiden, indem Zusätze chemisch dauerhaft fest gebunden wären. Wenn Kunststoffadditive toxikologisch und ökotoxikologisch wirkungslos wären, würde die Migration ihre Relevanz verlieren.

Oft ist nicht klar, wie komplex Kunststoffe tatsächlich zusammengesetzt sind. Im BMBF-geförderten Forschungsvorhaben PlastX analysierten Forscher die Zusammensetzung und Wirkung von 34 Plastikverpackungen, etwa Joghurtbechern, Getränkeflaschen, Obstschalen, Deckel von Kaffeebechern und Schamponflaschen. Sie analysierten in Summe 1411 Substanzen, von denen sie 260 Chemikalien identifizieren konnten. Jeder einzelne Artikel enthielt mindestens einige Dutzend unterschiedliche Chemikalien. 82 Prozent aller Inhaltsstoffe ließen sich mit gängigen Methoden aber nicht identifizieren (Zimmermann et al. 2019: 11474). Daraus kann abgeleitet werden, dass Kunststoffe Additive enthalten können, die nicht immer bekannt sind und sich nicht per se mit gängigen Analysemethoden identifizieren lassen.

4. Vorkommen und bekannte Quellen

Mikroplastik kommt in allen terrestrischen³ Ökosystemen als anthropogener⁴ Fremdstoff vor: Nicht nur im Meer, wo es zuerst nachgewiesen und erforscht wurde, sondern im gesamten Wasserhaushalt, auch den Süßwasserreservoirs weltweit und im Boden. Erst in den letzten Jahren wurde in der Wissenschaft zudem klar, dass auch die Luft mit Mikroplastik belastet ist. Mikroplastik befindet sich in der Atmosphäre und wird global vor allem über Luftmassenströmungen verteilt, genauso wie über Meeresströmungen und den Transport in Wasserkörpern. Im Boden kann Mikroplastik über Lebewesen aufgenommen und verfrachtet, vor allem aber durch menschliche Tätigkeit etwa Aushub verlagert werden. Ein wichtiger Eintragungspfad in den Boden ist die Düngung von landwirtschaftlichen Nutzflächen mit Klärschlamm, der erhebliche Mengen Mikroplastik aus dem Abwasser enthält. Es liegt nahe, dass der Transport im Ökosystem Boden lokal begrenzter ist als im Wasser und der Luft. Da Mikroplastik auch in entlegenen Regionen wie dem Süd- und dem Nordpol nachgewiesen wurde, gehen Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen davon aus, dass der Transport über die Atmosphäre eine besonders bedeutsame Rolle spielt (Rochmann 2018).

Bertling et al. griffen 51 Mikroplastikarten heraus und ermittelten in einer groben Abschätzung, dass sich der Eintrag von primärem Mikroplastik in die Umwelt hierzulande auf 330.000 Tonnen pro Jahr belaufe. Bei allen Unsicherheiten über die tatsächlich emittierten Mengen liegt nahe, dass intentionell hergestelltes primäres Mikroplastik etwa aus Kosmetikprodukten nur einen sehr kleinen Teil des in die Umwelt eingetragenen Mikroplastiks ausmacht. Es überwiegt Mikroplastik, das durch Abrieb oder andere Einflüsse bei der Nutzung und nach dem Ende des Lebenszyklus durch Degradation des Produktes emittiert wird. Bertling et al. geht davon aus, dass die Berei-

3 irdisch

4 menschlich bedingter

che Verkehr, Infrastruktur und Gebäude die wichtigsten Emittenten von Mikroplastik sind (Bertling et al. 2018: 10ff). Vergleichsweise gut erforscht ist der Beitrag des Straßenverkehrs zu den Mikroplastikemissionen. Der Anteil von Mikroplastik infolge von Reifen- und Bremsabrieb wird global auf einen Anteil auf 6,1 Millionen Tonnen und damit 1,8 Prozent der gesamten jährlichen Plastikproduktion geschätzt (Evangelidou et al. 2020: 1).

Mikrometergroße Kunststoffpartikel in verschiedenen Umweltmedien zu messen, ist wissenschaftlich anspruchsvoll und die analytischen Methoden hierzu befinden sich weiterhin in der Entwicklung und Standardisierung. Bisher dominieren optische Messmethoden, die jedoch andere Ergebnisse liefern als thermoanalytische Methoden. Bei letzteren wird die Probe erhitzt, so dass enthaltene Kunststoffpartikel zersetzt werden. Nachfolgend lassen sich die Zerfallsprodukte der Kunststoffe nachweisen und quantitativ erfassen (vgl. Huppertsberg, Knepper 2018).

Kunststoffpartikel insbesondere im Boden oder in menschlichen Geweben zuverlässig und reproduzierbar nachzuweisen, ist eine aktuelle Herausforderung der Forschung. Noch diffiziler ist es aber, Mikroplastik nach seiner Zusammensetzung (siehe Kapitel 3) zu charakterisieren. Die Ergebnisse bisheriger Studien liefern deshalb ein erstes, oft durchaus kongruentes Bild, kommen aber je nach Methodik nicht unbedingt zu identischen Ergebnissen (vgl. Pimpke et al. 2020). Übereinstimmend zeigen sie, dass die Anzahl kleinerer Mikroplastikteilchen deutlich größer ist als die größerer Teilchen (Gruppe leitender wissenschaftlicher Berater - SAM 2019: 33). Vielfach dominieren Verpackungskunststoffe das in Wasser, Luft und Boden gefundene Mikroplastik. Dies verdeutlicht, dass nicht sachgerecht entsorgte Verpackungen und generell die Massenkunststoffe die ubiquitäre Belastung der Biosphäre mit Mikroplastik anführen.

4.1. Wasser

Wasser ist das am besten untersuchte Umweltmedium hinsichtlich der Belastung mit Mikroplastik und bei der Suche nach mutmaßlichen Quellen.

Anfänglich wurde das Vorkommen von Makro- und Mikroplastik vor allem in den Meeren beforscht und in der öffentlichen wie politischen Debatte besprochen (Gruppe leitender wissenschaftlicher Berater - SAM 2019: 27). Dem gegenwärtigen Stand der Forschung zufolge kommt Mikroplastik jedoch ubiquitär in den Süß- und Salzwasserreservoirs der Erde und dort sowohl im Wasserkörper wie auch in den Sedimenten vor. Es ist ebenso in entlegenen Regionen wie dem Mariannengraben wie auch an Industriestandorten nachweisbar. In den Ozeanen zirkuliert Mikroplastik teils als „mariner Schnee“ im Wasserkörper, postulieren Forscher auf Basis von Simulationen: Er sinkt infolge von Agglomeration mit biologischen Bestandteilen und direkter Besiedlung mit Organismen in tiefere Wasserschichten. Dort dienen die biologischen Anhaftungen Bakterien als Nahrungsquelle. Sodann steigen die Mikroplastikpartikel aufgrund des nun verringerten Gewichtes wieder auf. Relevant ist diese These insoweit, als dass danach ein erheblicher Teil des Mikroplastiks im Meereswasserkörper verbleibt und sich nicht mit dem Sediment ablagern würde (Kvale et al. 2020).

Ein wichtiger Eintragspfad von Mikroplastik in den Wasserhaushalt hierzulande ist das Abwasser. In konventionellen Kläranlagen wird Mikroplastik nicht vollständig entfernt. Dadurch gelangt es mit dem Kläranlagenzulauf in Flüsse und Seen. Daneben ist zu beachten, dass mit dem

Straßenablauf nach Niederschlägen hierzulande unterschiedlich umgegangen wird. Er wird nicht immer den Kläranlagen zugeführt und fließt nach Schätzungen von Bertling et al. mit einem Anteil von 22 Prozent am gesamten Abwasseraufkommen ungeklärt in den Wasserhaushalt (Bertling et al. 2018: 21). Da Mikroplastik aus Reifen und Fahrbahnbelägen in erheblichem Umfang abgegeben werden, ist dies ein nicht zu vernachlässigender Eintragspfad. Hinzu kommen Plastikgegenstände, die über den Wind eingetragen oder infolge menschlicher Aktivität eingebracht werden. Zur Mikroplastikbelastung tragen weiterhin Schiffsanstriche und Lacke bei. Farben und Lacke enthalten in der Regel Kunststoffe etwa auf Acrylatbasis zum Aushärten der Produkte. Diese degradieren ihrer chemischen Natur folgend im Laufe der Zeit, wobei sie als Mikroplastik ins Wasser übergehen. Sie könnten infolge der Reibung abgerieben werden und so eine „Bremsspur“ im Wasser hinterlassen, wie Forscher jüngst darlegten. Sie hatten in Wasserproben in der Nähe wichtiger Schifffahrtsrouten – in der Elbemündung und der offenen Nordsee hohe Anteile von Acrylaten, PVC und Polycarbonaten im Mikroplastik gefunden und führten diese auf Anstriche und Lacke zurück. Generell dominieren in anderen Wasserproben oft die typischen Verpackungskunststoffe Polyethylen, Polypropylen, Polystyrol und Polyethylenterephthalat (Dibke et al. 2021).

Ein wesentlicher, vor Jahren noch wenig bekannter Eintragspfad für Mikroplastik in die Gewässer ist überdies die Luft (siehe Kapitel 4.3).

4.2. Boden

Die Datenlage zum Vorkommen von Mikroplastik in Böden ist erheblich begrenzter verglichen mit den Umweltmedien Wasser und Luft. Dies liegt an der komplexen Zusammensetzung von Bodenproben und der Schwierigkeit, Plastik aus einem Gemisch partikulärer mineralischer und humushaltiger Substanzen zu trennen und zu detektieren (vgl. Nöller et al. 2020).

Wissenschaftler gehen jedoch von einer besonders ausgeprägten Akkumulation von Mikroplastik im Boden aus, da er seit vielen Jahrzehnten eine Senke für die nicht bzw. sehr langsam abbaubaren Partikel darstellt (Gruppe leitender wissenschaftlicher Berater des SAM 2019: 27). In Sedimenten von Meeren und Flüssen werden tatsächlich höhere Gehalte an Mikroplastik gemessen. Mikroplastik, das in den Boden gelangt ist, kann lediglich über Wind und Wasser verfrachtet oder über Pflanzen und Tiere aufgenommen werden.

Es konnte zudem nachgewiesen werden, dass der Anteil an Mikroplastik in landwirtschaftlichen Nutzflächen höher ist als in anderen Böden. Abschätzungen zufolge übersteigt das Vorkommen von Mikroplastik in ackerbaulich genutzten Flächen jenes in Süß- und Salzwasservorkommen (Wanner 2021).

Kunststoffpartikel gelangen auf verschiedenen Wegen in Ackerflächen. Über Düngemittel wie Klärschlamm, Gärreste und Kompost erreicht Mikroplastik die ackerbauliche Flächen. Ein Teil des Mikroplastiks wird im Zuge der dreistufigen Abwasserbehandlung in Kläranlagen entfernt und befindet sich sodann im Klärschlamm. Dieser wird hierzulande überwiegend thermisch verwertet. Rund 24 Prozent werden jedoch als Dünger auf landwirtschaftlichen Nutzflächen eingebracht und weitere 10 Prozent im Landschaftsbau eingesetzt (Bertling et al. 2018: 24). Mikroplastik auf landwirtschaftlichen Flächen kann auch aus anderen Quellen stammen: Folien, Vliese

und Gewächshäuser aus Kunststoff werden abgerieben und nach und nach unter dem Einfluss der UV-Strahlung, der Witterung und aufgrund der natürlichen Alterung zwangsläufig fragmentiert. Hinzu kommen der Reifenabrieb von Fahrzeugen und der Beitrag von Mikroplastikemissionen über die Luft. Pflanzentöpfe können vor allem in In-Door-Anbau eine weitere Quelle der Kontamination von Böden sein. Schließlich sind bestimmte Dünge- und Pflanzenschutzmittel mit Kunststoffen umhüllt, um ein bestimmtes Freisetzungsmuster zu gewährleisten (Umweltbundesamt 2020).

Einen insgesamt deutlichen Beitrag zur Mikroplastikbelastung des Bodens dürfte der Reifenabrieb haben, der im Umfeld von Straßen direkt in das Erdreich eingetragen wird. Das Umweltbundesamt beziffert diesen auf 130.000 bis 160.000 Tonnen pro Jahr (Umweltbundesamt 2020). Wie sich der Abrieb auf die Umweltmedien Luft, Boden und Wasser aufteilt, ist allerdings nicht klar.

4.3. Luft

Während sich größere Mikroplastikteilchen aufgrund der Schwerkraft am Emissionsort absetzen können, werden insbesondere Mikroplastikteilchen kleiner 2,5 Mikrometern über die Luft verfrachtet. Mikroplastik befindet sich dem aktuellen Stand der Wissenschaft folgend ubiquitär in der Luft und wird dort über den Feinstaub als summarischer Schadstoffparameter mit erfasst. Die Teilchen in der Atmosphäre werden mit Luftmassenbewegungen lokal und global verteilt. Mit Niederschlägen gelangen sie in den Boden und die Gewässer (Gruppe leitender wissenschaftlicher Berater - SAM 2019: 27).

Gestützt wird dieser Stand der Erkenntnis durch eine Reihe empirischer Befunde. So konnte in entlegenen Gegenden etwa an der Wetterstation Bernadouze in den Pyrenäen über fünf Monate der mit dem Niederschlag und Staub niedergehenden partikuläre Fall-out aufgefangen und analysiert werden. Die Forscher konnten mit optischen Methoden Mikroplastik nachweisen, im konkreten Partikel der Massenkunststoffe Polyethylen, Polystyrol, Polypropylen und Polyethylenterephthalat. Sie rechneten hoch, dass 2000 Tonnen an Mikroplastik pro Jahr als Staubregen und mit Niederschlägen auf französisches Terrain niedergehen (Allen et al. 2019).

In dieselbe Richtung weisen Untersuchungen von Schneeproben. Demnach enthielt ein Liter Schnee gesammelt an einer bayerischen Landstraße 140.000 Partikel Mikroplastik. Eine Schneeprobe vom Standort Spitzbergen wies 14.000 Partikel auf (Bergmann et al. 2019). Sowohl lokale Emissionen tragen somit wahrscheinlich zur Mikroplastikbelastung der Luft bei wie auch der Ferntransport über globale Luftmassenströmungen.

Der Ferntransport über das Medium Luft wird insgesamt als sehr relevant eingeschätzt, da Modellierungen ergaben, dass 48.000 Tonnen der globalen Mikroplastikemissionen (Reifenabrieb

und Bremsabrieb) aus dem Straßenverkehr beispielsweise auf diese Weise auf schnee- und eisbedeckten Flächen insbesondere der Arktis landen. Da sie auf diesen Oberflächen haften, stellen diese eine Schadstoffsene⁵ und damit einen Akkumulationsort dar.

Weitere 140.000 Tonnen Mikroplastikemissionen aus dem Straßenverkehr gelangen über den Transportweg „Atmosphäre“ in die Ozeane. Damit liege die über die Luft allein aus dem Straßenverkehr eingetragene Menge in ähnlicher Größenordnung wie der direkte Zufluss in die Meere (Evangeliou et al. 2020: 3-4). Die Autoren weisen folgerichtig daraufhin, dass die Belastung der Luft wichtig für die Belastung der Umweltmedien Wasser und Boden sein könnte.

5. Wirkung

Die ubiquitäre Belastung der Umwelt mit Mikroplastik bedingt, dass auch Menschen, Pflanzen und Tiere dem Fremdstoff ausgesetzt sind. Mikroplastik kommt in Nahrungsmitteln vor und wurde konkret in Mineralwasser, Bier, Salz, Fisch, Meeresfrüchten, Honig, Gemüse und Obst nachgewiesen (Paul et al. 2020).

Der **Mensch** kann Mikroplastik vorrangig auf zwei Wegen aufnehmen: Mikroplastik kann prinzipiell über die Atemluft mittels Inhalation in den Körper gelangen, wie auch Feinstaub den menschlichen Organismus erreicht. Weiterhin kommt Mikroplastik mit belasteten Nahrungsmitteln in den Magen-Darmtrakt (Paul et al. 2020).

Analog dazu nehmen **Pflanzen und Tiere** Mikroplastik über die Nahrung auf, was im Falle von Pflanzen vornehmlich über den Nährstofftransport aus dem Boden bzw. über das Wasser geschieht. Organismen, die einen Gasaustausch mit der Luft aufrecht erhalten, wie viele Vertreter der Flora und Fauna könnten theoretisch auch darüber mit Mikroplastik befrachtet werden. Die Aufnahmepfade von Mikroplastik verschiedener Spezies sind empirisch kaum untersucht, da sich die Detektionsmethoden zum Nachweis und zur Messung von Mikroplastik in den verschiedenen Medien (Pflanzengewebe, Zellen, Blut) aktuell in Entwicklung befinden.

5.1. Mensch

Menschen sind Mikroplastik ausgesetzt und nehmen es insbesondere aus der Nahrung und der Luft auf (Paul et al. 2020). Gleichwohl schwanken die Angaben in bisherigen Studien, wie viel Mikroplastik Menschen typischerweise aufnehmen, erheblich. Eine Ursache abweichender Angaben ist nach wie vor die Methodik, die sich immer noch in der Entwicklung befindet.

In einer der ersten Abschätzungen wurde die durchschnittliche Aufnahmemenge von Mikroplastik auf 74.000 bis 121.000 Teilchen pro Jahr und Kopf beziffert. Die Forscher gingen davon aus, dass noch einmal 90.000 Partikel hinzukämen, wenn die Flüssigkeitszufuhr ausschließlich durch

5 Als Schadstoffsene bezeichnet man ein System, das der Umwelt Schadstoffe entzieht. Sie ist damit das Gegenteil einer Schadstoffquelle.

Wasser aus Plastikflaschen gedeckt würde. Beim Verarbeiten und Abfüllen lösen sich unweigerlich kleine Kunststoffteilchen aus den Behältern ab (Cox et al. 2019). Diese Hochrechnung ist gleichwohl als Momentaufnahme anzusehen, da erst nach und nach weitere Lebensmittel auf ihren Mikroplastikgehalt untersucht werden. So detektierten Forschende bis zu 223 000 Plastikteilchen je Gramm Obst oder Gemüse. Sie untersuchten Brokkoli, Salat, Karotten, Kartoffeln, Birnen und Äpfel. Je wasserhaltiger das Lebensmittel, desto mehr Kunststoff fanden sie darin. Mit nur einem einzigen Apfel würde ein Mensch demnach über eine Million Partikel aufnehmen und damit die von Cox auf das Jahr ermittelte Anzahl von 121.000 Teilchen weit überschreiten. Der Grund für die hohen Partikelanzahlen ist: Anders als frühere Forschungsarbeiten analysierten die Autorinnen Teilchen kleiner zehn Mikrometer (Conti et al. 2020). Da Makroplastik über die Zeit in immer kleinere Teilchen zerfällt, ist zu erwarten, dass die Anzahl der Teilchen steigt, je kleiner ihr Durchmesser ist.

Gewöhnlich interessiert in der Toxikologie auch das Gewicht an aufgenommenen Schadstoffen je Kilogramm Körpergewicht. Solche Angaben fehlen gleichwohl bislang bei Mikroplastik im Menschen, da in der Regel die Zahl der Plastikteilchen ermittelt wird. Das Gesamtgewicht ließe sich nur aus der Größenverteilung und Gewichtsverteilung der Partikel errechnen. Die Erfassung dieser Daten würde eigenständige analytische Methoden erfordern.

Weiterhin analysierten Forscher kürzlich Stuhlproben von Kindern und Erwachsenen auf das Vorkommen von PET und Polycarbonat, zwei Kunststoffarten, die aber nicht die dominierenden Verpackungskunststoffe darstellen. Sie fanden eine höhere Belastung der kindlichen Stuhlproben verglichen mit erwachsenen Proben (Zhang et al. 2021). Dass Kinder höher mit Schadstoffen belastet sind, ist aus toxikologischer Sicht insofern zu erwarten, da sie bezogen auf ihr Körpergewicht mehr essen, zumal sie sich in der Wachstumsphase befinden.

Entscheidend für die fragliche Wirkung von Mikroplastik im Menschen ist dessen Verhalten im Körper, seine Beschaffenheit und Größenverteilung. Aus der Forschung zu toxikologischen Effekten von Feinstaub ist bekannt, dass die Wirkungen mit abnehmender Größe relevanter werden können. Ein vergleichbares Bild zeichnet sich der bisherigen Datenlage folgend bei Mikroplastik ab: Mikroplastikteilchen kleiner 20 Mikrometer können Organe erreichen und solche kleiner zehn Mikrometer können Zellmembranen und die Plazentaschranke in Zellkultur- und Tierversuchen überwinden, fasst Kannan den aktuellen Erkenntnisstand zusammen (Kannan, Vimalkumar 2021).

Risiken infolge von Mikroplastik können sich in vierfacher Hinsicht ergeben:

Kunststoffe bestehen durchgängig aus mehreren Inhaltsstoffen, die darin oftmals nicht fest gebunden sind. Sie zersetzen sich ganz allmählich infolge von Alterung und mechanischer Beanspruchung, was mit einem chemischen Abbau bis hin zu den Ausgangsstoffen der Kunststoffe, den Monomeren, oder anderer niedermolekularer Stoffe einhergehen kann. All diese Substanzen können aus Plastikteilchen in das umgebende Milieu migrieren (vgl. Kapitel 3). Eine denkbare Quelle der Toxizität besteht also in der Toxizität der Inhaltsstoffe, namentlich genannt seien: Weichmacher, Farbstoffe, Füllstoffe, UV-Stabilisatoren, Flammhemmer etc. Von diesen sind teils

toxische Effekte ab bestimmten Dosen⁶ bekannt, etwa von Bisphenol A und S, bestimmten Phthalaten oder bromierten Flammhemmern. Diese Form der (chemischen) Toxizität versuchen Forscher derzeit genauer zu untersuchen, wobei die Fragen beantwortet werden müssen, wie viele Mikroplastikteilchen im menschlichen Körper wie lange verweilen, wie sich diese bei der Passage oder der Einlagerung in den menschlichen Körper verhalten und wie viel ihrer chemischen Fracht in den Körper übergeht (vgl. Leslie, Depledge 2020).

Partikel können zudem aufgrund ihrer Größe und Gestalt, also ihrer physikalischen Eigenschaften eine entzündliche Reaktion im Gewebe hervorrufen. Dies ist aus der Toxikologie etwa bei inhalativer Aufnahme von Holzstäuben oder Mehl bekannt, die schließlich bei langzeitlicher Exposition und anhaltender Entzündung das Risiko einer Krebserkrankung erhöhen können. Es gibt Hinweise, dass diese physikalische Toxizität auch bei Mikroplastik relevant ist. Entzündliche Reaktionen werden in Zellkulturexperimenten beobachtet (vgl. Fleury, Baulin 2021 und Hong et al. 2020).

Weiterhin besitzen Kunststoffe die Eigenschaft, bestimmte Schadstoffe, persistente⁷ organische Substanzen, wie PCB (polychlorierte Biphenyle), Dioxine und Furane, aber auch Metalle anzulagern (Umweltbundesamt 2015). Diese zusätzliche chemische Fracht kann womöglich im Verdauungstrakt des Menschen, insbesondere im sauren Milieu des Magens, wieder abgegeben werden (z. B. Hildebrandt et al. 2021) und könnte sodann toxisch wirken.

Und viertens dienen Mikroplastikpartikel Mikroorganismen und Viren als zu besiedelnde Oberfläche. Aus demselben Grund bilden sich auf Kunststoffen verschiedenster Art in feuchter Umgebung schnell Biofilme, die sich aus dort lebenden Mikroorganismen zusammensetzen. Gegenstand laufender Forschungen ist, in welchem Umfang Mikroplastik als Siedlungsraum und globales Transportsystem für antibiotikaresistente Keime im Wasser wie auch für Krankheitserreger dient. Für beide Zusammenhänge liegen mehrfache wissenschaftliche Indizien aus Studien vor. Damit könnte Mikroplastik als Vehikel zur Verbreitung bestimmter Viren und Mikroorganismen dienen und infolge seiner ubiquitären Verteilung über Luft, Wasser, auch den Boden zum globalen Transport entsprechender Spezies, mithin auch von Krankheitserregern beitragen (vgl. Bowley et al. 2021).

Nach gegenwärtigem Stand der Forschung gibt es insgesamt erst wenige wissenschaftliche Daten zur Frage des Vorkommens von Mikroplastik im Menschen und zur Toxizität des Mikroplastiks (SAPEA 2019, WHO 2019). Daher kam das wissenschaftliche Beraterkonsortium Science Advice for Policy by European Academies SAPEA, das Teil der wissenschaftlichen Politikberatung der EU ist, zu dem Fazit: „Die fehlende Evidenz für Risiken durch Mikroplastik lässt gegenwärtig

6 Die Dosis, ab der in einer exponierten Population keine beobachtbare schädliche Wirkung mehr auftritt, wird als NOAEL (No Observed Adverse Effect Level) beschrieben. Der NOAEL wird nach einem standardisierten Verfahren aus toxikologischen Daten ermittelt. Er hängt von der untersuchten Substanz, der Datenlage, vom untersuchten Effekt und dem Zielorganismus ab. Beispielhaft liegt der NOAEL für Bisphenol A in Studien an Ratten und Mäusen in der Größenordnung von einigen Milligramm je Kilogramm Körpergewicht. Bei Diethylhexylphthalat DEHP liegt der NOAEL bei Ratten und Mäusen je nach untersuchtem Effekt ebenfalls bei wenigen Milligramm (Fortpflanzungsfähigkeit) bis hin zu einigen hundert Milligramm je Kilogramm Körpergewicht.

7 langlebige

nicht den Schluss zu, dass mit ausreichender Sicherheit gesagt werden kann, dass ein Risiko besteht und genauso wenig, dass kein Risiko besteht.“ (SAPEA 2019: 11). Vielmehr ist es gegenwärtig nicht möglich, wissenschaftlich zu beurteilen, was die Anwesenheit von Mikroplastik im Körper über die Lebenszeit bewirkt. Zu bedenken ist dabei, dass negative Wirkungen sich als begründbare wissenschaftliche Hypothese aus den bisherigen Erkenntnissen der Toxikologie und Mikrobiologie im obigen Sinne postulieren lassen (Leslie, Depledge 2020).

Bis vor etlichen Jahren war die Hypothese durchaus verbreitet, Mikroplastik würde vollständig und unverändert ausgeschieden; es sei inert⁸ und stelle kein Risiko dar. Es blieb allerdings unklar, auf welche wissenschaftliche Argumentationsführung und Evidenz sich diese oft als These ausgeführte Einschätzung stützte. Erst in den letzten Jahren setzte Forschungsförderung zur Klärung von toxikologischen Wirkungen von Mikroplastik ein. Nach bisherigen Erkenntnissen wird Mikroplastik nicht vollständig und unterschiedlich abhängig von Größenverteilung ausgeschieden (vgl. Cox et al. 2019). Aber auch die direkte Passage von Schadstoffen, ohne dass diese in bestimmten Geweben gespeichert werden, besagt allein nichts über die toxikologische Wirkweise. Es sind zahllose Beispiele von Schadstoffen bekannt, die zwar rasch verstoffwechselt und kaum in Gewebe eingelagert werden, aber dennoch toxisch auf den Menschen wirken können, etwa perfluorierte Verbindungen aus der Kategorie der PFAS. Das gilt insbesondere dann, wenn sie täglich über Nahrung und Luft neu aufgenommen werden, sie also quasi-persistent⁹ sind, wie es auch bei Mikroplastik der Fall ist.

5.2. Umwelt

Grundsätzlich ist bezüglich der toxischen Wirkungen von Mikroplastik auf Mikroorganismen auf Organismen zu bedenken, dass Mikroplastik sich bereits seit vielen Jahrzehnten in den Biota in möglicherweise zunehmenden Mengen - infolge der zunehmenden Plastikproduktion - befindet. Wenn es auf Spezies akut toxisch gewirkt hat, hat sich deren Niedergang wahrscheinlich schon in der Vergangenheit vollzogen. Bei Mikroplastik handelt es sich aber um ein langfristig einwirkendes Schadstoffkonglomerat mit ganz unterschiedlichen, teils toxischen Inhaltsstoffen, die erwartungsgemäß in physiologische Prozesse von Organismen eingreifen könnten, ohne dass diese unmittelbar sterben. Subletale Effekte dieser Art können die Fortpflanzung, die Entwicklung von Organismen, genauso das Verhalten wie die Nahrungsaufnahme oder das Verhalten gegenüber Fressfeinden und vieles mehr betreffen. Grundsätzlich stellen unnatürliche toxische Substanzen einen Stressor für Organismen dar. Eine Schwächung von Populationen kann, wie die Forschung zum Korallensterben, zum Insektensterben, zum Amphibiensterben etc. schlüssig darlegt, in den Verlust der Biodiversität münden. Dieser ist multifaktoriell, wobei anthropogene toxische Substanzen, etwa Pestizide im Falle des Insektenrückgangs, einen Faktor unter mehreren Ursachen darstellen. Analog dazu kann die Mikroplastikbelastung Organismen und ihre Bestände zusätzlich belasten.

8 reaktionsträge

9 faktisch langlebig

Es ist bekannt, dass Makroplastik eine Gefahr für Meerestiere und Wasservögel darstellt, da sie Plastikmüll verschlucken, gesundheitliche Schädigungen erleiden und daran auch ersticken können.

Im Fokus der ökotoxikologischen Wirkungen von Mikroplastik steht momentan der aquatische Lebensraum. Es konnte gezeigt werden, dass Mikroplastik von verschiedenen Lebewesen in Meeren, Flüssen und Seen wie Fischen, Muscheln, Plankton, Vögeln, Walen, Schildkröten etc. aufgenommen wird. Dies ist insoweit zu erwarten, als sämtliche Lebewesen über Luft, Wasser und Boden Mikroplastik ausgesetzt sind und zwecks Atmung und Nahrungsaufnahme mit dem Umweltmilieu in Austausch stehen. So wiesen Forschende zuletzt auch nach, dass Korallen Mikroplastik über ihre Polypen aufnehmen und auch ausscheiden können, aber zu einem gewissen Grad auch in ihr Kalkskelett einbauen. Welche Konsequenzen für Korallen im Speziellen daraus resultieren, ist Gegenstand weiterer Forschungen (Hierl et al. 2021).

Eine Schwierigkeit für die Forschungen besteht darin, die kontinuierliche Belastung mit Mikroplastik der realen Welt auf Laborbedingungen zu übertragen. Kurzzeitige Effekte auf die Gesundheit von aquatischen Organismen stellen sich bei höheren Dosen in Laborexperimenten ein. Etwa vermindern bestimmte Muscheln dann schon in einer Woche ihre Filtrationsrate; DNA-Schädigungen sind nachweisbar. Indes wirken Mikroplastikpartikel in Realität über den gesamten Lebenszyklus der Organismen mitunter in geringeren Dosen auf diese ein (SAPEA 2019: 10ff).

Über 42 Wochen bildeten Forschende daher die Belastung von Miesmuscheln mit niedrigen Dosen an Mikroplastik in Süßwasservorkommen im Experiment nach. Sie untersuchten schließlich, verschiedene nicht normierte Vitalitätsparameter der Spezies. Dazu gehörten zum Beispiel die Wachstumsraten der jungen Muscheln, die Produktion der Haftfäden, mit denen sie sich am Untergrund festhalten, oder auch das Fressverhalten. Schwache, negative Effekte traten zum Ende der 42 Wochen auf (Hamm, Lenz 2021).

Den bisherigen Labor- und Umweltstudien zufolge kann Mikroplastik bestimmte Organismen beeinträchtigen. Teils ist unklar, was die beobachteten Effekte für den Erhalt einer Population bedeuten. Kritisch hinterfragt werden Laborexperimente, die mit hohen Dosen an Mikroplastikpartikeln in kurzer Zeit durchgeführt wurden, da sie die reale Belastung über den gesamten Lebenszyklus eines Organismus mit geringerer Menge an Mikroplastik nur näherungsweise abbilden. Dies ist eine generelle und bekannte Herausforderung in der toxikologischen Erforschung von Langzeiteffekten. Die offenen Fragen veranlassen die Wissenschaft zu weiteren Untersuchungen. Sie werden seitens der Kunststoffindustrie und in der politischen Debatte als Begründung herangezogen, an bisher entwickelten Kunststoffen als eines der wichtigsten Materialien des Industriezeitalters festzuhalten.

6. Literatur- und Quellenverzeichnis

- Allen, Steve et al. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. In: *Nature Geoscience*, 12, 339–344, Abstract online abrufbar unter: <https://www.nature.com/articles/s41561-019-0335-5> (11. Januar 2022)
- Bergmann, Melanie et al. (2019). White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. In: *Science Advances*, 5, 8, online abrufbar unter: <https://advances.sciencemag.org/content/5/8/eaax1157/tab-pdf> (6. Januar 2022)
- Bertling, Jürgen; Bertling, Ralf; Hamann, Leandra (2018). *Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik: Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie*, 21. Juni 2018, abrufbar unter: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/publikationen/2018/kunststoffe-id-umwelt-konsortialstudie-mikroplastik.pdf> (6. Januar 2022)
- Bowley, Jake et al (2021). Oceanic Hitchhikers – Assessing Pathogen Risks from Marine Microplastic. In: *Trends in Microbiology*, 29, 2, online abrufbar: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966842X20301906> (11. Januar 2022)
- Conti, Gea Olivieri et al. (2020). Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. In: *Environmental Research*, 187, 109677, online abrufbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935120305703> (11. Januar 2022)
- Cox, Kieran (2019). Human Consumption of Microplastics. In: *Environmental Science and Technology*, 53, 12, 7068–7074, online abrufbar unter: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.9b01517> (6. Januar 2022)
- Deutscher Bundestag (2021). *Plastikmüll in deutschen Meeresgewässern. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der FDP-Fraktion, BT-Drs. 19/28746 vom 20. April 2021*, abrufbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/287/1928746.pdf> (3. Januar 2022)
- Dibke, Christopher et al. (2021). Microplastic Mass Concentrations and Distribution in German Bight Waters by Pyrolysis-Gas Chromatography-Mass Spectrometry/Thermochemolysis Reveal Potential Impact of Marine Coatings: Do Ships Leave Skid Marks? In: *Environmental Science and Technology*, 55, 4, 2285–2295, Abstract online abrufbar unter: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.0c04522> (3. Januar 2022)
- Europäische Chemikalienagentur (2019). Annex XV restriction report. Proposal for a restriction 22. August 2019, online abrufbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/05bd96e3-b969-0a7c-c6d0-441182893720> (3. Januar 2022)
- Evangelidou, Nikolaos et al. (2020). Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions. In: *Nature Communications*, 11, 3381, abrufbar unter: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-17201-9.pdf> (11. Januar 2022)

Fleury, Jean-Baptiste; Baulin, Vladimir (2021) Microplastics destabilize lipid membranes by mechanical stretching. In: Proceedings of the National Academy of Sciences, 118, 31, online abrufbar unter: <https://www.pnas.org/content/118/31/e2104610118#:~:text=This%20study%20demonstrates%20that%20microplastics,stretche%20due%20to%20microplastic%20adsorption.> (3. Januar 2022)

Gruppe leitender wissenschaftlicher Berater - SAM (2019). Risiken für Umwelt und Gesundheit. Umweltverschmutzung durch Mikroplastik. Europäische Union, 2019, abrufbar unter: <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/f235d1e3-7c4d-11e9-9f05-01aa75ed71a1> (3. Januar 2022)

Hamm, Thea; Lenz, Mark (2021) Negative impacts of realistic doses of spherical and irregular microplastics emerged late during a 42 weeks-long exposure experiment with blue mussels. In: Science of the Total Environment, 778, 146088, online abrufbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721011554?via%3Dihub> (11. Januar 2022)

Hierl, Florian et al. (2021). Scleractinian corals incorporate microplastic particles: identification from a laboratory study. In: Environmental Science Pollution Research, 28, S. 37882-37893, online abrufbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11356-021-13240-x> (3. Januar 2022)

Hildebrandt, Lars et al. (2021). Microplastics as a Trojan horse for trace metals, Journal of Hazardous Materials Letters, 2, 100035, online abrufbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266691102100023X?via%3Dihub> (4. Januar 2022)

Hong, Jinkee et al. (2020). In vitro chemical and physical toxicities of polystyrene microfragments in human-derived cells. In: Journal of Hazardous Materials, 400, 123308, online abrufbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389420312978> (4. Januar 2022)

Huppertsberg, Sven; Knepper, Thomas (2018). Instrumental analysis of microplastics – benefits and challenges. In: Analytical and Bioanalytical Chemistry, 410, 6343-6352, online abrufbar unter: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00216-018-1210-8.pdf> (11. Januar 2022)

Kannan, Kurunthachalam; Vimalkumar, Krishnamoorthi (2021). A Review of Human Exposure to Microplastics and Insights Into Microplastics as obesogens. In: Frontiers in Endocrinology, 18. August 2021, online abrufbar unter: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fendo.2021.724989/full#B11> (4. Januar 2022)

Kvale, Karin et al. (2020). The global biological microplastic particle sink. In: Scientific Reports, 10, 16670, online abrufbar unter: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-72898-4.pdf> (11. Januar 2022)

Lenz, Peter et al. (2022). Extracting microplastic decay rates from field data. In: Scientific Reports, 12, 1223, online abrufbar unter: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-04912-w> (25. Januar 2022)

Leslie, Heather; Depledge, Michael (2020). Where is the evidence that human exposure to microplastics is safe? In: Environmental International, 142, 105807. Online abrufbar unter: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7319653/pdf/main.pdf> (4. Januar 2022)

Lippelt, Jana (2017). Kurz zum Klima: Klein, kleiner, am kleinsten – Plastikabfälle und das Mikroplastikproblem. Ifo Schnelldienst, 11/2017, 70. Jahrgang, 8. Juni 2017, abrufbar unter: <https://www.ifo.de/publikationen/2017/aufsatz-zeitschrift/kurz-zum-klima-klein-kleiner-am-kleinsten-plastikabfaelle> (5. Januar 2022)

Mitrano, Denise et al. (2021). Placing nanoplastics in the context of global plastic pollution, In: Nature Nanotechnology, Abstract online abrufbar unter: <https://www.nature.com/articles/s41565-021-00888-2> (11. Januar 2022)

Nöller, Julia et al. (2020) Finding Microplastics in Soils: A Review of Analytical Methods. In: Environmental Science and Technology, 54, 4, 2078–2090, online abrufbar unter: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.9b04618> (11. Januar 2022)

Paul, Maxi et al. (2020). Micro- and nanoplastics – current state of knowledge with the focus on oral uptake and toxicity. In: Nanoscale Advances, 2, 4350, online abrufbar unter: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2020/na/d0na00539h> (11. Januar 2022)

Primpke, Sebastian (2020). Comparison of pyrolysis gas chromatography/mass spectrometry and hyperspectral FTIR imaging spectroscopy for the analysis of microplastics. In: Analytical and Bioanalytical Chemistry, 412, 8283-8298, online abrufbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00216-020-02979-w> (11. Januar 2022)

Rochmann, Chelsea (2018). Microplastics research – from sink to source. In: Science, 360 (6384), 28-29, online abrufbar unter: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aar7734> (11. Januar 2022)

Science Advice for Policy by European Academies - SAPEA (2019). A scientific perspective on microplastics in nature and society, online abrufbar unter: <https://www.sapea.info/wp-content/uploads/report.pdf> (4. Januar 2022)

Sharma, Surbhi et al. (2020). Microplastics in the Environment: Occurrence, Perils, and Eradication. In: Chemical Engineering Journal, 408, 127317, online abrufbar unter: <https://www.science-direct.com/science/article/abs/pii/S1385894720334410?via%3Dihub> (11. Januar 2022)

Statista 2021. Weltweite und europäische Kunststoffproduktion in den Jahren von 1950 bis 2019, abrufbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltproduktion-von-kunststoff-seit-1950/#:~:text=Die%20weltweit%20produzierte%20Kunststoffmenge%20ist,Millionen%20Tonnen%20im%20Jahr%202019> (4. Januar 2022)

Umweltbundesamt (2015). Quellen für Mikroplastik mit Relevanz für den Meeresschutz in Deutschland. August 2015, online abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_63_2015_quellen_fuer_mikroplastik_mit_relevanz_fuer_den_meeresschutz_1.pdf (4. Januar 2022)

Umweltbundesamt (2020). Kunststoffe in Böden. Derzeitiger Kenntnisstand zu Einträgen und Wirkungen. Online abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/factsheet_kunststoffe_in_boeden.pdf (4. Januar 2022)

Wanner, Philipp (2021). Plastic in agricultural soils. A global risk for groundwater systems and drinking water supplies? In: Chemosphere, 264, 128453, online abrufbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653520326485> (4. Januar 2022)

Zhang, Junjie et al. (2021). Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. In: Environmental Science and Technology Letters, online abrufbar unter: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.estlett.1c00559> (4. Januar 2022)

Zimmermann, Lisa et al. (2019). Benchmarking the in Vitro Toxicity and Chemical Composition of Plastic Consumer Products. In: Environmental Science & Technology, 53, 11467-11477, abrufbar unter: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.9b02293> (4. Januar 2022)