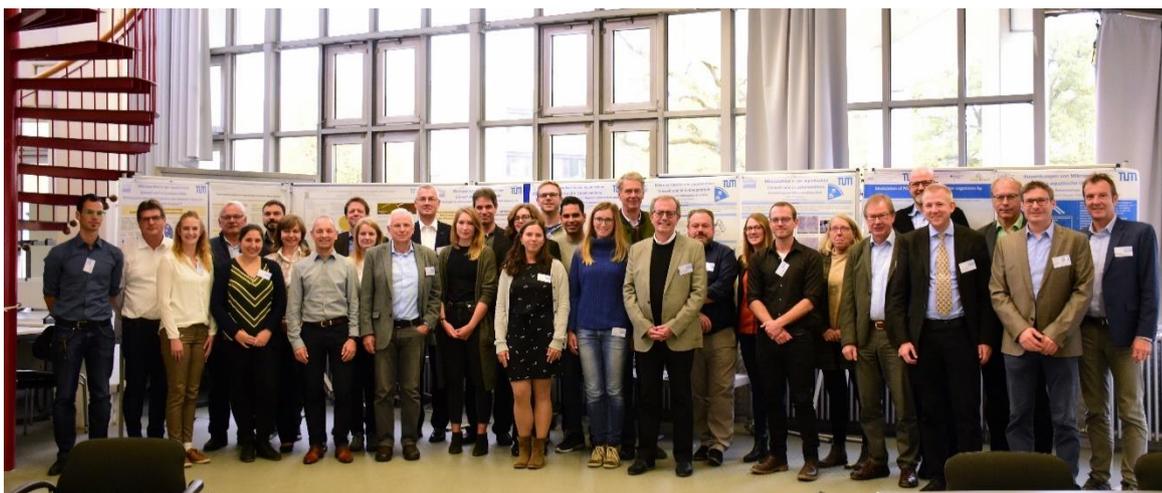


Der Eintrag von Mikroplastik in Lebensmittel und die Aquatischen Umwelt und seine Folgen – aktuelle Fragen und Antworten

Hannes K. Imhof (Hannes.Imhof@tum.de), Mohammed Al-Azzawi (mohammed.al-azzawi@tum.de), Astrid Bartonitz (Astrid.bartonitz@tum.de), Sebastian Beggel (sebastian.beggel@tum.de), Joerg E. Drewes (jdrewes@tum.de), Martin Elsner (m.elsner@tum.de), Elisabeth von der Esch (elisabeth.esch@tum.de), Karl Glas (k.glas@wzw.tum.de), Natalia P. Ivleva (natalia.ivleva@ch.tum.de), Simone Kefer (simone.kefer@tum.de), Oliver Knoop (oliver.knoop@tum.de), Horst-Christian Langowski (h-c.langowski@tum.de), Oliver Miesbauer (oliver.miesbauer@tum.de), Julia Reichel (julia.reichel@tum.de), Christian Schwaferts (christian.schwaferts@tum.de), Jana Weisser (jana.weisser@wzw.tum.de), Juergen P. Geist (geist@tum.de)



Abstract

Das Thema Mikroplastik erfährt große Aufmerksamkeit in der Bevölkerung, die nach Aufklärung zu den damit in Zusammenhang stehenden potenziellen Gefahren verlangt. Bedingt durch die komplexen und uneinheitlichen analytischen Nachweis- und Quantifizierungsverfahren fehlen jedoch bislang vergleichbare Daten zur Menge von Mikroplastik in der Umwelt oder in Lebensmitteln. Gleichzeitig ist eine fundierte Risikobewertung, aufgrund teils widersprüchlicher Ergebnisse, aktuell sehr schwierig. Beides steht im Fokus von „MiPAq“, einem Forschungsprojekt mit Industriebeteiligung an der Technischen Universität München. Für eine sachlich fundierte Information der Öffentlichkeit entstand im Rahmen von MiPAq ein Katalog mit Fragen und Antworten, den wir hier in gekürzter Form vorstellen möchten.

Einleitung

Das Thema Mikroplastik belegt seit zwei Jahren einen der ersten Plätze im Verbrauchermonitor des Bundesinstituts für Risikobewertung [1]. Durch die Aktualität dieser Thematik sieht sich vor allem die Verpackungs- und Lebensmittelindustrie oft dem Vorwurf ausgesetzt, ihre Produkte würden Mikroplastik enthalten und damit eine Gefahr für den Verbraucher darstellen. Die Diskussion um die etwaigen von Mikroplastik ausgehenden Gesundheitsgefahren wird meist sehr emotional geführt. Bedingt durch die sehr aufwendigen und noch nicht standardisierten analytischen Nachweisverfahren fehlen verlässliche Daten zur Menge von Mikroplastik in Lebensmitteln und

deren Eintragspfade. Gleichzeitig ist aufgrund der teils widersprüchlichen Ergebnisse aus der Forschung die Frage nach dem Risiko für eine Gesundheitsgefährdung oder den Auswirkungen auf Organismen aus der aquatischen oder terrestrischen Umwelt aktuell ungeklärt [2, 3].

Um dem entgegenzuwirken, steht der Eintrag von Mikroplastik in Lebensmittel und ob dies nach dem Verzehr ein Risiko darstellt im Fokus des Forschungsprojektes MiPAq an der Technischen Universität München. Weitere Fragestellungen sind die Eintragspfade in die aquatische Umwelt und die Auswirkungen auf die darin lebenden Organismen. Die Untersuchungen erfolgen unter Koordination des Lehrstuhls für Aquatische Systembiologie in enger Zusammenarbeit von fünf Lehrstühlen mit 15 Industriepartnern aus der Kunststoffbranche, der Lebensmittelindustrie, der Instrumentellen Analytik und der Abwasserbehandlung. Ermöglicht wird dieses transdisziplinäre Konzept durch die besondere Art der Förderung durch die Bayerische Forschungstiftung. Um die Öffentlichkeit sachlich fundiert zu informieren, haben wir im Rahmen von MiPAq einen Katalog mit Fragen und Antworten zum Thema Mikroplastik erstellt. Einen Auszug aus den Fragen und Antworten möchten wir an dieser Stelle vorstellen. Die vollständigen FAQs stehen online unter <https://www.wasser.tum.de/mipaq/startseite/> zur Verfügung

1. Was ist Mikroplastik und wie entsteht es?

Aktuell werden Partikel oder Fasern aus synthetischen Polymeren als Mikroplastik definiert, wenn sie kleiner als 1 mm sind [4-6]. Zum Teil werden Partikel zwischen 5 und 1 µm als großes Mikroplastik bezeichnet [5]. Eine einheitliche internationale anerkannte Definition gibt es derzeit jedoch noch nicht [6].

„Primäres“ Mikroplastik wird gezielt industriell hergestellt (Typ A). Dabei kann es sich um kugelförmige Microbeads handeln, oder um scharfkantige Partikel, die z.B. Haushaltsreinigern, Peelings oder Kosmetika zugesetzt werden. Ebenfalls unter primäres Mikroplastik Typ A fallen Pellets oder Granulate, die als Ausgangsmaterial für die industrielle Fertigung von Kunststoffteilen und -folien verwendet werden. Als Typ B werden freigesetzte Mikropartikel bezeichnet, die während der Nutzungsphase eines Produktes entstehen, z. B. Abrieb von Reifen, Bitumen im Asphalt, Sport- und Spielplätze, Schuhsohlen, Baustellen [7]. Auch Fasern aus Kleidungsstücken werden hierzu gezählt [8, 9].

Im Gegensatz dazu handelt es sich bei sekundärem Mikroplastik um Fragmente, die erst in der Umwelt aus größeren Kunststoffteilen entstehen. Dabei spielen neben der UV-Strahlung, die Kunststoffe spröde und damit brüchig macht, mechanische, chemische und biologische Prozesse eine große Rolle.

2. Wie werden Umwelt- und Lebensmittelproben untersucht?

Da mehr natürliche Partikel in der Umwelt vorkommen als künstliche ist der Nachweis von Mikroplastik aus Umwelt- oder Lebensmittelproben eine große Herausforderung. Vor allem, da die Proben oft eine komplexe Matrix darstellen.

Zur Probenahme von aufschwimmenden Partikeln oder Partikeln in der Wassersäule werden Netze unterschiedlicher Maschenweiten (oft 300 µm) oder Filtersysteme (bis in den unteren µm-Bereich oder darunter) verwendet. Sedimentproben mit abgesunkenen Partikeln oder Bodenproben werden mit Greifern, Schaufeln oder Stechrohren entnommen [8]. Lebensmittelproben können in der Regel direkt dem Produktionsprozess oder der Verpackung entnommen werden. In allen Fällen müssen Probenmenge und -anzahl repräsentativ für die beprobten Medien sein und eine ausreichende Menge Analyt beinhalten [5].

Für eine erfolgreiche Identifizierung von Mikroplastik müssen zuerst möglichst alle natürlichen Partikel abgetrennt werden. Für Sand- und Sedimentpartikel wird zum Beispiel auf die Dichtentrennung zurückgegriffen [8]. Organisches Material wie Pflanzenteile, Insekten u.a. werden mit chemischen Reinigungsschritten entfernt. Hierbei sind die verwendeten Chemikalien von großer Bedeutung, da bestimmte Kunststoffsorten stark angegriffen werden können. Eine Methode, die Kunststoffe nicht angreift und organisches Material gut abbaut, ist zum Beispiel der enzymatische Abbau [10] in Kombination mit der sogenannten Fenton Reaktion [11]. Diese Prozesse sind sehr aufwendig und müssen für jede Matrix speziell

angepasst werden, wodurch sie aktuell noch nicht routinefähig sind.

Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Probenahme, -vorbereitung und der Partikelidentifizierung ist, dass keine Verunreinigung durch externe Einflüsse stattfindet. So sollten zum Beispiel Kleidung und Geräte aus Kunststoff vermieden und letztere regelmäßig gespült werden. Zusätzlich sollte in Objektschutzwerkbanken gearbeitet werden, um eine Kontamination der Proben zu reduzieren. Blindproben müssen stets mitgeführt werden, um Ergebnisse unter Berücksichtigung der nie komplett vermeidbaren Kontamination bewerten zu können.

3. Wie kann man Mikroplastik sicher identifizieren?

Eine rein mikroskopische und damit visuelle Identifizierung ist für die zum Teil sehr kleinen Fasern und Partikel aufgrund der Verwechslungsgefahr mit anderen natürlich vorkommenden Materialien nicht geeignet [9, 12]. Auch Färbemethoden oder die Schmelzprobe erlauben keine eindeutige Unterscheidbarkeit und können nur als Hilfestellung bei einer optischen Vorsortierung dienen [12, 13].

Umwelt- und Lebensmittelproben müssen vielmehr spektroskopisch und/oder massenspektrometrisch untersucht werden. Nur so kann festgestellt werden, ob es sich tatsächlich um Mikroplastik handelt und Polymerart, Anzahl, Form und Größe der Partikel bestimmt werden [5]. Für die zerstörungsfreie spektroskopische Untersuchung von Einzelpartikeln oder mehrerer Partikel auf einem Probenfilter werden häufig die Fourier-Transform-Infrarot-(FTIR) Mikrospektroskopie oder die Raman-Mikrospektroskopie (RM) angewendet [8, 9, 12].

Ein Nachteil beider Methoden ist der zum Teil große Aufwand, um die auf Filtern aufgelagerten Partikel sicher zu identifizieren. Im Falle der FTIR-Mikrospektroskopie können Partikel bis zu einer unteren Größengrenze von 10 - 20 µm mittels sogenannter focal plane array (FPA) Detektoren analysiert werden, die eine größere Fläche abstrahieren können. Die Identifizierung erfolgt dann anhand der Spektralinformationen mittels Datenbankabgleich [14] oder Random Decision Forest Klassifizierungen [15].

Bei der Raman Mikrospektroskopie (RM), die für Partikel oder Fasern bis zu 1 µm angewendet werden kann, werden die Partikel auf den Probenfiltern durch die Software TUM-ParticleTyper [16] zuerst optisch lokalisiert und morphologisch charakterisiert. Die anschließende Identifizierung erfolgt anhand einer reduzierten Anzahl von Partikeln, die durch statistische Methoden aus der Gesamtheit ausgewählt werden [4], wodurch eine korrekte Extrapolation mit bekannter Messunsicherheit für Partikel zwischen 10 und 500 µm gewährleistet wird. Dieses beschleunigte Verfahren wurde mittels gealterter Referenzpartikeln validiert [17] und bereits erfolgreich angewendet.

Eine vielversprechende Methode für die Analyse von Plastikpartikeln im sub-Mikron-Bereich ist die Kombination von Feld-Fluss-Fraktionierung und RM, die neben der Größenverteilung auch chemische Informationen liefert [18].

Daneben gibt es weitere Methoden, die mit Hilfe thermischer Zersetzung und nachgeschalteter Gas- bzw. Massen-

spektrometrie die Analyse von Mikroplastik ermöglichen. Dazu gehören die Thermogravimetrie, die oft mit der Gaschromatographie-Massenspektrometrie gekoppelt wird, oder die Pyrolyse-Gaschromatographie-Massenspektrometrie, die über Zerfallsprodukte die Polymerarten von Partikeln identifiziert. Wird vor dem Pyrolyseprozess noch eine Thermodesorption durchgeführt, können auch Additive (z.B. Weichmacher wie Phthalate oder Bisphenol A) oder zusätzliche adsorbierte Stoffe identifiziert und quantifiziert und damit die Schadstoffbelastung der Partikel beurteilt werden [8, 19]. Je nach Art und Ausstattung der Geräte liegt die untere Nachweisgrenze bei den massenspektroskopischen Verfahren bei 0,5 µg. Das entspricht z.B. einem PE-LD-Partikel mit 10 µm Durchmesser [5].

Aufgrund der vielen verschiedenen Prozesse zur Probenvorbereitung und -analyse ist es nicht immer möglich, die Ergebnisse unterschiedlicher Studien sinnvoll miteinander zu vergleichen. Daher finden auf nationaler und internationaler Ebene Initiativen zur Methodenharmonisierung statt [20]. Außerdem gibt es bereits drei Ausschüsse beim Deutschen Institut für Normung (DIN), in denen auch Beteiligte aus dem Projekt MiPAq aktiv sind.

4. Wo in der Umwelt gibt es Mikroplastik und wie gelangt es dahin?

In den letzten Jahren wurde Mikroplastik weltweit in immer mehr Gewässern nachgewiesen. Ebenfalls mehren sich die Hinweise, dass auch in terrestrischen Ökosystemen Mikroplastik ubiquitär vorhanden ist [21, 22].

Aufgrund der vielfältigen Eintragspfade und der methodischen Schwierigkeiten (siehe Fragen 1 - 3) ist eine gezielte Quantifizierung sowie die Unterscheidung, ob vorgefundene Partikel dem primären oder sekundären Mikroplastik zuzuordnen sind, kaum möglich. Betrachtet man bisher in der Umwelt nachgewiesenes Mikroplastik, scheint sekundäres Mikroplastik aus Kunststoffabfällen, die unter anderem durch fehlerhafte Entsorgung in die Umwelt gelangen, eine große Rolle zu spielen [7, 8].

Bei Betrachtung der Produktions- und Verkaufszahlen von Produkten, aus denen Mikroplastik in die Umwelt gelangen kann, werden jedoch auch andere Eintragspfade deutlich. Zum Beispiel enthalten Kosmetika teilweise primäres Mikroplastik; dieser Trend ist jedoch rückläufig. Abrieb, der während der Lebensphase von Kunststoffprodukten entsteht (siehe Frage 3), gelangt zum Teil direkt in die Umwelt oder, wie synthetische Fasern, die beim Waschen von Kleidung entstehen, durch kommunale Abwässer und Mischwasserentlastungen [7-9].

Weitere potenzielle Eintragspfade in die terrestrische Umwelt sind z.B. organische Düngemittel aus der Bioabfallvergärung, Kompostierung und Klärschlamm [23-25], landwirtschaftliche Verwendung von Kunststoffen [v.a. Folien, 26] oder auch Partikel und Fasern, die in der Atmosphäre transportiert werden [27].

5. Was passiert mit Kunststoffmüll und Mikroplastik in der Umwelt und in Abwässern?

Mikroplastik akkumuliert aufgrund der sehr guten chemischen Beständigkeit in der Umwelt. Die Abbauprozesse hängen stark von der Kunststoffsorte ab und ob die Fragmente starkem Sonnenlicht oder mechanischen Auswirkungen ausgesetzt sind. Außerdem kommt es, je nach Kunststoffsorte, zu unterschiedlich starker Biodegradation, u.a. durch anhaftenden Biofilm.

Ist Mikroplastik einmal in die Umwelt gelangt, ist es nach aktuellem Stand des Wissens, nahezu unmöglich dieses wieder zu entfernen. Kläranlagen sind, je nach Ausbaustufe, ein wertvolles Werkzeug, um Mikroplastik zumindest aus Abwässern zu entfernen [z.B., durch die Einbindung von Partikeln in Belebtschlammflocken, mittels finaler Sandfiltration oder durch physische Abtrennung in Membran-Bioreaktoren, 29, 30]. Zum Teil gelingt dies bei über 98% der eingetragenen Partikel [$> 10\mu\text{m}$, 29, 31]. Der verbleibende, wenn auch geringe Anteil in Kläranlagenabläufen führt dennoch zu einem stetigen Eintrag von Mikroplastik in die Gewässer. Ein ebenso großer Anteil kann aus Mischwasserentlastungen, die bei Starkregenereignissen anspringen, in die aufnehmenden Gewässer gelangen [32].

6. Wird Mikroplastik von Tieren aufgenommen? Welche Auswirkungen kann das haben?

Eine Vielzahl unterschiedlicher Lebewesen mit unterschiedlichen Ernährungsstrategien nehmen Mikroplastik mit der Nahrung auf. Über diesen Weg kann Mikroplastik auch im Nahrungsnetz weitergegeben und angereichert werden [z.B., 33, 34].

Als potenzielle Risikofaktoren werden mechanische Einflüsse der Partikel und Fasern diskutiert, da sie sich im Magen-Darm-Trakt anreichern und schlecht ausgeschieden werden können. Dabei können sie Schädigungen an empfindlichen Geweben hervorrufen [8]. Weitere Auswirkungen auf Organismen können durch die Kunststoffe an sich oder durch Zusatzstoffe (Additive) hervorgerufen werden, die sich aus dem Polymer lösen und direkt toxisch sein können oder hormonähnliche Wirkungen besitzen [z.B., 35, 36]. Zudem können Mikroplastikpartikel aufgrund ihrer chemischen Struktur andere organische Schadstoffe anreichern und damit als Vektor dienen. In wie fern dieser Transfer, im Vergleich zu anderen Quellen (z.B. natürlichen Partikeln, Kontamination von Futterorganismen) oder dem umgebenden Medium (Wasser, Sediment), zu einer tatsächlichen und anhaltenden Exposition beiträgt und somit von Bedeutung ist, wird aktuell diskutiert [z.B., 37, 38].

Zur Bewertung der möglichen Auswirkungen müssen die rein mechanischen/physikalischen Effekte der Partikel von der Toxizität der Polymerbestandteile, der beigefügten Additive und etwaiger angelagerter Substanzen unterschieden werden. Gängige Testsysteme zur Toxizitätsbewertung in Umweltkom-

partimenten erlauben diese Unterscheidung allerdings nicht und sind darüber hinaus für nicht lösliche Substanzen zum Teil ungeeignet. Aufgrund der hohen Komplexität der unterschiedlichen Kunststoffsorten und der möglichen Zusatzstoffen sind die aktuell vorliegenden Untersuchungsergebnisse noch sehr widersprüchlich [2]. Zudem können, je nach Substanzklasse und Umweltbedingungen, das Verhalten der Partikel und deren Auswirkungen sehr unterschiedlich ausfallen oder es können potentiell gefährliche Substanzen aus anderen Quellen einen stärkeren Einfluss haben [2, 38, 39]. Erschwerend kommt hinzu, dass in den ökotoxikologisch relevanten Größenklassen nur wenige zuverlässige und vergleichbare Daten über Mikroplastik vorliegen, die eine umweltrelevante Überprüfung ermöglichen [8, 39]. Über die möglichen Auswirkungen von Mikroplastik liegen daher noch keine abschließenden Ergebnisse vor.

7. Kommt Mikroplastik auch in Lebensmitteln oder im Trinkwasser vor?

Bei der Diskussion um die Relevanz und das Risiko, das durch Mikroplastik aus Nahrungsmitteln hervorgerufen wird, sollte beachtet werden, dass nach heutigem Stand der Technik eine Vielzahl von Studien durchgeführt wurden, die nicht miteinander vergleichbar sind (siehe Frage 3). Dennoch deutet vieles darauf hin, dass Mikroplastik in Lebensmitteln wie auch der Umwelt ubiquitär vorhanden ist, wenn auch zum Teil in geringen Mengen [40]. Vor allem, da Kunststoffe als maschinentechnischer Werkstoff bei der Produktion und bei der Verpackung vieler Lebensmittel verwendet wird.

Da Mikroplastik in allen Ozeanen vorkommt, ist es nicht überraschend, dass Mikroplastik in Nahrungsmitteln aus dem Meer nachgewiesen wurde. Zum jetzigen Zeitpunkt sind zweifelsfreie Nachweise bei Meeresfrüchten [z.B., 41], Fischen [z.B., 42] und Meersalz [z.B., 43] dokumentiert. Bei vielen Organismen, wie zum Beispiel bei den Fischen, befindet sich Mikroplastik häufig im Verdauungstrakt, der vor dem Verzehr jedoch entfernt wird [44].

Auch in Leitungswasser [45] und abgefülltem Mineralwasser [46, 47] konnte Mikroplastik durch Studien, die mit validen Methoden gearbeitet haben, nachgewiesen werden. Ein Grund ist der Abrieb beim wiederholten Öffnen und Schließen von PET-Flaschen. Andere mechanische Belastungen scheinen jedoch keine Auswirkungen auf die Partikelzahl im Getränk zu haben [48]. Auch beim Aufbrühen von Tee in reinen PET- und Nylonbeuteln (PA) zeigte sich, dass Partikel aus diesen Beuteln freigesetzt werden können [49]. Für die meisten handelsüblichen Teebeutel werden jedoch pflanzliche Fasern verwendet.

8. Was bedeutet das für den Menschen? Ist Mikroplastik gefährlich?

Grundsätzlich kann man inzwischen sagen, dass Mikroplastik allgegenwärtig vorhanden ist; auch in der Luft befinden sich neben natürlichen Teilchen wie Pollen, Pilzsporen und Saharastaub auch menschenverursachte Partikel wie Staub, Ruß und

Mikroplastik [3, 50-52]. Somit kommen wir unvermeidlich in den Kontakt mit Mikroplastik aus der Nahrung oder der Luft [3, 53].

Inwiefern Mikroplastik oder von Mikroplastik abgegebene Substanzen mit dem menschlichen Körper reagieren, ist derzeit unbekannt, vor allem, da Partikel von den Schleimhäuten der Atemwege zurückgehalten werden bzw. den Magen-Darm-Trakt passieren und wieder ausgeschieden werden [3, 40, 53-56]. Eine mögliche Gefährdung dürfte stark von der Mikroplastikkonzentration in den Nahrungsmitteln, der Größe der Partikel, sowie der Ernährungsweise und sonstigen Lebensbedingungen abhängen [3, 40, 41].

Damit ist derzeit trotz ersten Erkenntnissen eine Risikobewertung zu Mikropartikeln in Lebensmitteln nur schwer möglich. Die bislang publizierten Daten liefern zum Teil widersprüchliche Ergebnisse [2, 3, 44]. Weiterhin sind Ergebnisse aus Tierversuchen nicht ohne weiteres auf den Menschen übertragbar. Nach aktuellem Wissensstand geht das Bundesinstitut für Risikobewertung davon aus, dass von Mikroplastik in Lebensmitteln keine gesundheitlichen Risiken ausgehen [54, 55].

Literatur

1. BfR, Verbrauchermonitor. 2019. 02.
2. Bucci et al., What is known and unknown about the effects of plastic pollution: A meta-analysis and systematic review. *Ecol. Appl.*, 2020. 30(2): p. e02044.
3. Verla et al., Microplastic-toxic chemical interaction: A review study on quantified levels, mechanism and implication. *Appl. Sci.*, 2019. 1(11): p. 1400.
4. Anger et al., Raman microspectroscopy as a tool for microplastic particle analysis. *TrAC*, 2018. 109: p. 214.
5. Braun et al., Diskussionspapier "Mikroplastik-Analytik" - Probenahme, Probenaufbereitung und Detektionsverfahren. 2018, BMBF Forschungsschwerpunkt "Plastik in der Umwelt", Querschnittsthema "Analytik und Referenzmaterialien".
6. Hartmann et al., Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environ. Sci. Technol.*, 2019. 53(3): p. 1039.
7. Bertling et al., Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik, Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen; Kurzfassung der Konsortialstudie. 2018, Fraunhofer UMSICHT Oberhausen.
8. Wendt-Potthoff et al., Mikroplastik in Binnengewässern, in Hupfer, Calmano, Fischer und Klapper [Hrsg.] *Handbuch Angewandte Limnologie: Grundlagen – Gewässerbelastung - Restaurierung - Aquatische Ökotoxikologie - Bewertung - Gewässerschutz*. 2017, Wiley-VCH, Weinheim.
9. Ivleva et al., Microplastic in aquatic ecosystems. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2017. 56(7): p. 1720.
10. Löder et al., Enzymatic purification of microplastics in environmental samples. *Environ. Sci. Technol.*, 2017, 51(24): p. 14283.

- Hurley et al., Validation of a method for extracting microplastics from complex, organic-rich, environmental matrices. *Environ. Sci. Technol.*, 2018. 52(13): p. 7409.
- Löder & Gerdts, Methodology used for the detection and identification of microplastics - A critical appraisal, in Bergmann, Gutow, and Klages, [Eds.] *Marine Anthropogenic Litter*. 2015, Springer International Publishing. p. 201.
- Lachenmeier et al., Microplastic identification in German beer – an artefact of laboratory contamination? *Deut. Lebensm.-Rundsch.*, 2015. 111: p. 437.
- Primpke et al., Reference database design for the automated analysis of microplastic samples based on Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2018. 410(21): p. 5131.
- Hufnagl et al., A methodology for the fast identification and monitoring of microplastics in environmental samples using random decision forest classifiers. *Anal. Methods*, 2019. 11(17): p. 2277.
- von der Esch et al., TUM-ParticleTyper: A detection and quantification tool for automated analysis of (microplastic) particles and fibers. *PLOS ONE*, accepted.
- von der Esch et al., Simple generation of suspensible secondary microplastic reference particles via ultrasound treatment. *Front. Chem.*, 2020. 8(169).
- Schwaferts et al. Nanoplastic analysis by online coupling of Raman microscopy and field-flow fractionation enabled by optical tweezers. *Anal. Chem.*, 2020. 92(8): p. 5813.
- Fischer & Scholz-Böttcher, Simultaneous trace identification and quantification of common types of microplastics in environmental samples by pyrolysis-gas chromatography–mass spectrometry. *Environ. Sci. Technol.*, 2017. 51(9): p. 5052.
- Schymanski et al., Analysis of microplastics in freshwater and drinking water: Minimum requirements and best practice guidelines. in preparation.
- Liu et al., Plastic and microplastic pollution: From ocean smog to planetary boundary threats, in G. Jiang and X. Li [Eds.] *A New Paradigm for Environmental Chemistry and Toxicology: From Concepts to Insights*. 2020, Springer, Singapore. p. 229.
- Hurley et al., Chapter 7 - Plastic waste in the terrestrial environment, in T.M. Letcher [Ed.] *Plastic Waste and Recycling*. 2020, Academic Press, London. p. 163.
- Weithmann et al., Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Sci Adv*, 2018. 4 (4).
- Zhang et al., An overlooked entry pathway of microplastics into agricultural soils from application of sludge-based fertilizers. *Environ. Sci. Technol.*, 2020. 54(7): p. 4248.
- Möller et al., Finding microplastics in soils: A review of analytical methods. *Environ. Sci. Technol.*, 2020. 54(4): p. 2078.
- Huang et al., Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environ. Pollut.*, 2020. 260: p. 114096.
- Zhang et al., Importance of atmospheric transport for microplastics deposited in remote areas. *Environ. Pollut.*, 2019. 254: p. 112953.
- Harrison et al., Biodegradability standards for carrier bags and plastic films in aquatic environments: A critical review. *R. Soc. Open Sci.*, 2018. 5(5).
- Talvitie et al., Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Res.*, 2017. 123: p. 401.
- Mintenig et al., Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-Transform Infrared imaging. *Water Res.*, 2017. 108: p. 365.
- Simon et al., Quantification of microplastic mass and removal rates at wastewater treatment plants applying Focal Plane Array (FPA)-based Fourier Transform Infrared (FT-IR) imaging. *Water Res.*, 2018. 142: p. 1.
- Baresel & Olshammar, On the importance of sanitary sewer overflow on the total discharge of microplastics from sewage water. *J. Environ. Prot.*, 2019(10): p. 14.
- Elizalde-Velázquez et al., Translocation, trophic transfer, accumulation and depuration of polystyrene microplastics in *Daphnia magna* and *Pimephales promelas*. *Environ. Pollut.*, 2020. 259: p. 113937.
- Carbery et al., Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. *Environ. Int.*, 2018. 115: p. 400.
- Schrank et al., Effects of microplastic particles and leaching additive on the life history and morphology of *Daphnia magna*. *Environ. Pollut.*, 2019. 255: p. 113233.
- Zimmermann et al., Benchmarking the in vitro toxicity and chemical composition of plastic consumer products. *Environ. Sci. Technol.*, 2019. 53(19): p. 11467.
- Bartonitz et al., Modulation of PAH toxicity on the freshwater organism *G. roeseli* by microparticles. *Environ. Pollut.*, 2020. 260: p. 113999.
- Koelmans et al., Microplastic as a vector for chemicals in the aquatic environment: Critical review and model-supported reinterpretation of empirical studies. *Environ. Sci. Technol.*, 2016. 50(7): p. 3315.
- Triebkorn et al., Relevance of nano- and microplastics for freshwater ecosystems: A critical review. *TrAC*, 2019. 110: p. 375.
- Welle & Franz, Microplastic in bottled natural mineral water – literature review and considerations on exposure and risk assessment. *Food Addit. Contam. A*, 2018. 35(12): p. 2482.
- Catarino et al., Low levels of microplastics (MP) in wild mussels indicate that MP ingestion by humans is minimal compared to exposure via household fibres fallout during a meal. *Environ Pollut*, 2018. 237: p. 675.

42. Roch & Brinker, Rapid and efficient method for the detection of microplastic in the gastrointestinal tract of fishes. *Environ. Sci. Technol.*, 2017. 51(8): p. 4522.
43. Karami et al., The presence of microplastics in commercial salts from different countries. *Sci. Rep.*, 2017. 7(46173).
44. EFSA, Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA Journal*, 2016. 14(6): p. e04501.
45. Mintenig et al., Mikroplastik in Trinkwasser. Untersuchungen im Trinkwasserversorgungsgebiet des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes (OOWV) in Niedersachsen. Probenanalyse mittels Mikro-FTIR Spektroskopie. 2014, Alfred-Wegener Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI): Helgoland.
46. Ossmann et al., Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Res.*, 2018. 141: p. 307.
47. Schymanski et al., Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Res.*, 2018. 129: p. 154.
48. Winkler et al., Does mechanical stress cause microplastic release from plastic water bottles? *Water Res.*, 2019. 166: p. 115082.
49. Hernandez et al., Plastic teabags release billions of microparticles and nanoparticles into tea. *Environ. Sci. Technol.*, 2019. 53(21): p. 12300.
50. Liu et al., Widespread distribution of PET and PC microplastics in dust in urban China and their estimated human exposure. *Environ. Int.*, 2019. 128: p. 116.
51. Abbasi et al., Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dusts from Asaluyeh County, Iran. *Environ. Pollut.*, 2019. 244: p. 153.
52. Klein & Fischer, Microplastic abundance in atmospheric deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany. *Sci Total Environ*, 2019. 685: p. 96.
53. Vianello et al., Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a breathing thermal manikin. *Sci. Rep.*, 2019. 9(1): p. 8670.
54. BfR, Schwerpunkt: Mikroplastik in Lebensmitteln, "Kleine Teile - große Wirkung?", in BfR2GO. 2019.
55. BfR. Mikroplastik: Fakten, Forschung und offene Fragen. 2019; Available from: https://www.bfr.bund.de/de/mikroplastik_fakten_forschung_und_offene_fragen-192185.html.
56. Schwabl, et al., Detection of various microplastics in human stool: A prospective case series. *Ann. Intern. Med.*, 2019. 171(7): p. 453.

Korrespondenzadresse

Dr. Hannes Imhof
Wissenschaftliche Projektkoordination MiPAq
Lehrstuhl für Aquatische Systembiologie
Technische Universität München
Mühlenweg 22
85354 Freising
Tel.: 08161-714176
Email: Hannes.Imhof@tum.de
Homepage: www.fisch.wzw.tum.de/