

Factsheet Mikroplastik als Vektor für Schadstoffe

1. Abstract

Die Rolle von Mikroplastik (MP) als Vektor für Schadstoffe war lange umstritten in der Forschung. Verschiedene Studiendesigns haben zum Teil gegenteilige Schlüsse produziert. Erwiesen ist, dass hydrophobe Verbindungen an MP adsorbieren und unter magenähnlichen Bedingungen schneller desorbieren als im Seewasser. Zahlreiche neuere Untersuchungen kommen zum Schluss, dass der Effekt von MP als Vektor im Vergleich mit anderen Aufnahmewegen aber vernachlässigbar klein ist. Organischer Kohlenstoff ist zum Beispiel ein um Grössenordnungen relevanterer Vektor. Wie sich MP und assoziierte Schadstoffe in der Nahrungskette anreichern, ist noch zu wenig untersucht. MP führen zu adversen Gesundheitseffekten bei marinen Organismen, persistente organische Schadstoffe (POPs) führen zu Funktionsstörungen in grossen Meeressäugern, viele POPs gelten als kanzerogen.

2. Einleitung

Weltweit sammeln Leute unter dem Hashtag #trashtag Müll und teilen Bilder ihrer Sammlungen auf Twitter. Medien berichten über MP in der Umwelt und wie sie über die Nahrungskette im Menschen landen können¹. Die Europäische Kommission beschloss 2018 Massnahmen, Umweltverschmutzungen durch Mikroplastik einzudämmen². Die Thematik Mikroplastik ist in der Öffentlichkeit angekommen. Die Wissenschaft leistet ihren Teil und versucht Fragen rund um die Umweltverschmutzungen durch Mikroplastik zu klären. Es bestehen jedoch immer noch Wissenslücken. Im Jahr 2019 veröffentlichte die *Science Advice for Policy by European Academies* (SAPEA) einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung³.

Die vorliegende Literaturübersicht versucht die Frage zu beantworten, wie Mikroplastik als Vektor für POPs agieren. Es wird versucht, aufzuzeigen welche Gesundheitsschäden durch POPs und MP drohen. Die Übersicht ist im Rahmen des Umweltsysteme Seminars für Bachelorstudenten Umweltnaturwissenschaften an der ETH im Frühjahrssemester 2019 entstanden. Als Grundstein zur Beantwortung dieser Frage diente der Bericht der SAPEA und die dem Bericht zugrunde liegenden Artikel. Um mehr über POPs zu erfahren, wurde Google Scholar und die Datenbank Mendeley zu Hilfe genommen.

Die Arbeit ist in sieben Teile geteilt und besteht grösstenteils aus kurzen Zusammenfassungen von Papers des betroffenen Themas. Nach einer kurzen Einleitung wird der Frage nach den Pathways in Organismen nachgegangen. Danach folgt ein kurzer Einblick in die gesundheitlichen Schäden, welche durch MP und POPs verursacht werden. Im folgenden Teil wird der Frage nachgegangen, welche Folgen die Aufnahme von MP mit absorbiertem POPs hat. Im fünften Teil wird die Bioakkumulation entlang des Nahrungsnetzes beschrieben. Im letzten Teil geht um die Sorption von POPs an MP in der Umwelt. Das Ziel der Arbeit, war es der Fragestellung nachzugehen, ob POPs an MP absorbieren und wie die gesundheitlichen Folgen aussehen und ob MP dadurch schädlicher wird für die Umwelt.

3. 1 Pathways im Organismus, Jana Härri

1. Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions (2014)⁴

Das Ziel der Autor/innen ist es herauszufinden, ob POPs, welche an Mikroplastik adsorbiert sind, unter Bedingungen ähnlich denen eines Magens desorbieren. Andere Modelle, die physiologische Prozesse ausser Acht lassen, ergeben, dass die desorbierten POPs in Organismen im Vergleich zu anderen Expositionen eher von geringer Wichtigkeit sind⁵. Andere Forschung hat aber bereits gezeigt, dass die

Desorption erhöht wird, wenn Tenside, die im Magen von Organismen vorkommen, beigegeben werden⁶.

In diesem Paper werden die Plastikarten Polyvinylchlorid (PVC) und Polyethylen (PE) untersucht, ausserdem wurden vier verschiedene, radioaktiv markierte POPs verwendet. Das Experiment wurde bei zwei verschiedenen pH-Werten und Temperaturen durchgeführt.

Allgemein konnte gezeigt werden, dass die Desorption viel schneller geschieht, wenn die Umgebung derjenigen eines Verdauungstraktes ähnlich ist. Im extremsten Fall war die Desorptionsrate unter magenähnlichen Bedingungen 30-mal höher als im Seewasser.

Im Vergleich zu anderen Papers wird hier die Wichtigkeit von MP als Vektor eher überschätzt, da die Stoffflüsse und deren Grössenordnung nicht in Betracht gezogen werden.

2. Relative importance of microplastics as a pathway for the transfer of hydrophobic organic chemicals to marine life (2016)⁷

Die Autor/innen dieses Papers haben zum Ziel, ein Modell zu erstellen, welches den Transfer vom Mikroplastik und dessen Sorbent in verschiedene Organismen wiedergibt. Ausserdem möchten die Autor/innen die Wichtigkeit von diesem Mechanismus mit anderen Aufnahmemechanismen vergleichen.

Um diese Fragen zu beantworten wurde ein Ein-Kompartiment-Modell für einen benthischen Organismus, einen Fisch und einen Meeresvogel erstellt. Drei verschiedene Methoden wurden verwendet, um die chemische Konzentration in den drei Spezies auszurechnen. Zwei Methoden sind «worst case» Szenarios, die dritte und realitätsnächste wird im Paper vorgestellt. Dabei werden die Steady State Konzentrationen der Chemikalien im Organismus ausgerechnet. Es wurden die in «Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastic under simulated physiological conditions» verwendet. Es wird angenommen, dass Schadstoffe über das Wasser, Nahrung und adsorbiert an Mikroplastik aufgenommen werden können. Ausscheidungen sind möglich über Wasser, Fäzes und Verdünnung in der Biomasse durch Wachstum oder Fortpflanzung. Es wird angenommen, dass sich der Stoff nach der Aufnahme nicht verändert. Ausserdem wurde angenommen, dass ein beziehungsweise fünf Prozent der Nahrung aus Mikroplastik bestehen.

Aufgrund von diesen Annahmen kann für den benthischen Organismus, den Fisch und den Vogel gezeigt werden, dass die Aufnahme von Schadstoffen vorwiegend über die Nahrung und das Wasser erfolgen und nur minimal über an Mikroplastik adsorbierte Schadstoffe.

Im Gegensatz zum vorangehenden Paper wird die Wichtigkeit von Mikroplastik als Aufnahmeweg von POPs hier als eher gering bezeichnet. Dies liegt daran, dass der Stofffluss durch Mikroplastik in Relation mit anderen Aufnahmewegen gestellt wurde. Man sollte aber beachten, dass es sich hier um ein Modell und nicht um ein Experiment handelt.

3. The Effect of Microplastic on the Uptake of Chemicals by the Lugworm *Arenicola marina* (L.) under Environmentally Relevant Exposure Conditions (2017)⁸

Die Fragestellung des Papers beschäftigt sich damit, ob an Mikroplastik adsorbierten Schadstoffen massgeblich zur Schadstoffkonzentration im Organismus beitragen oder ob diese Schadstoffe auf anderem Weg in den Organismus gelangen. Das Paper will alle anderen Aufnahmemechanismen einbeziehen, um die Wichtigkeit des Mikroplastiks als Vektor abschätzen zu können.

In diesem Experiment wurde als Schadstoff Polychloriertes Biphenyle (PCB), als Mikroplastik wurde Polyethylen (PE) verwendet. Als Testorganismus wurde der Wattwurm (*Arenicola marina*) gewählt. Es wurde untersucht, wie sich der Schadstoff verhält, wenn kein Plastik (0%), nur wenig Plastik (0.05%) und viel Plastik (0.5%) vorhanden ist. Das Experiment wurden bei verschiedene Konzentrationen PCB durchgeführt.

Es kann gezeigt werden, dass ein erhöhter Mikroplastikgehalt nicht zu einer erhöhten Schadstoffakkumulation führt. Bei sehr grossen PCB Konzentrationen führt der Mikroplastik gar zu einer

Abnahme der Schadstoffkonzentration im Organismus. Diese Resultate werden mit einem Modell überprüft, dass ebenfalls ergibt, dass Mikroplastik nicht als Vektor von PCB fungiert.

Die Autor/innen können in einem Experiment zeigen, dass MP als Vektor für PCB nicht relevant ist und unterstützen somit die Ergebnisse des vorangehenden Papers. Das zusätzlich zum Experiment erstellte Modell kommt zum gleichen Schluss wie das vorangehende Modell und steht somit im Kontrast zum ersten Paper.

4. Estimating microplastic-bound intake of hydrophobic organic chemicals by fish using measured desorption rates to artificial gut fluids (2018)⁹

Die Autor/innen dieses Papers wollen herausfinden, ob hydrophobe organische Schadstoffe (HOC) von Organismen durch Mikroplastik aufgenommen werden können.

Dabei wird sowohl HOC berücksichtigt, dass am Mikroplastik adsorbiert ist sowie HOC, der dem Plastik bereits bei der Herstellung zugegeben wurde. Die Desorptionsraten der verwendeten Stoffe wurden unter Berücksichtigung von magenähnlichen Bedingungen bestimmt.

Es konnte gezeigt werden, dass schwach hydrophobe HOC nur geringfügig durch Mikroplastik in den Organismus gelangen. Die Aufnahme über Mikroplastik bei stark hydrophoben HOC kann jedoch mehr als 10% der gesamten Aufnahme betragen. Da jedoch die Plastikaufnahme eher über umwelt-relevanten Konzentration liegt, sollte diese Zahl mit Vorsicht genossen werden. Bei der Berechnung konnte ausserdem gezeigt werden, dass Stoffe, welche dem Plastik zugegeben wurden, einen sehr grossen Einfluss haben können, da diese nicht im Gleichgewicht sind. Diese Beobachtung muss aber noch weiter erforscht werden.

Die Autor/innen differenzieren zwischen verschiedenen HOCs und finden experimentell heraus, dass die Hydrophobie eine Rolle spielt. Bei schwach hydrophoben Verbindungen kommen sie zu gleichen Ergebnissen wie Paper 2 und 3, bei stark hydrophoben Verbindungen ist der Anteil aber grösser.

3. 2 Effekt auf Gesundheit des Organismus, Marco Kronenberg

5. Persistent organic pollutants (POPs): state of the science (2015)¹⁰

Das Ziel der Autor/innen dieses Review ist es, einen Überblick über POPs zu geben. POPs werden definiert als organische Stoffe, welche in Umweltsystemen Halbwertszeiten von mehreren Jahren aufweisen und werden als hydrophil und lipophil charakterisiert. Sie können über Aerosole in der Atmosphäre transportiert werden. POPs können in viele verschiedene Klassen kategorisiert werden. Da POPs bioakkumulieren, ist ihr Effekt am stärksten auf Beutetiere am Ende der Nahrungskette¹¹. Es wird aber darauf aufmerksam gemacht, dass Konzentrationen in Raubtieren in den 90er Jahren zurückgingen und damit verbunden sich die Bestände wieder erholten¹². In Belugawalen konnten Reproduktionsstörungen gezeigt und in Verbindung mit PCB gebracht werden¹³. Da jedoch viele POPs nachweisbar sind und sich diese in der Biota gleichzeitig bioakkumulieren und miteinander interagieren, ist es schwer nachzuweisen, ob eine einzelne Kategorie von POPs dafür verantwortlich ist. Viele POPs gelten als karzinogen, insbesondere PAHs und PCDD/Fs, welche ausgiebig untersucht wurden¹⁴. Des weiteren wirken POPs negativ auf das Immunsystem von Spezies¹⁵ am Ende der Nahrungskette und machen diese so anfälliger auf Krankheiten¹⁶. Im weiteren Teil beschreibt das Paper Quellen, Messungen und Trends, welche für unser Themenbereich nicht von Interesse sind.

Die Autor/innen unterstreichen die schädliche Wirkung von POPs und bilden somit eine Grundlage, dass Forschung über mögliche Aufnahmewege von POPs wichtig ist.

6. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress (2013)¹⁷

Die Autor/innen wollen herausfinden, ob mariner MP für Fische schädlicher ist, als sauberes MP. Ausserdem wollen sie zeigen, dass MP zu Schäden in der Leber führen kann.

Im Experiment werden Fische sowohl sauberen als auch verschmutztem MP ausgesetzt. Beiden Versuchsgruppen wurden 10% low-density polyethylene (LDPE) in ihre Nahrung gemischt, einer Gruppe verschmutzte Partikel aus dem Meer und der anderen unverschmutzte neue Partikel. Das verschmutzte Mikroplastik wurde drei Monate lang in der Bucht von San Diego eingelegt und anschliessend auf die adsorbierten Stoffe untersucht und mit anderer Nahrung verglichen.

Die beiden verschmutzten Wassertanks wiesen einen deutlich höheren Anteil an Polzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAHs) auf, die verschmutzte Gruppe zusätzlich erhöhten Anteil an Polychlorierten Biphenyle und Polybromierten Diphenylethern (PBDEs). Nach zwei Monaten wurden die Gruppen verglichen. Die beiden Versuchsgruppen wiesen schweren Glykogenabbau, sowie Fetteinlagerungen auf. Beides wurde in der Kontrollgruppe gar nicht oder schwächer beobachtet. Der Effekt war deutlicher in der Gruppe mit dem verschmutzten Plastik, wo zusätzlich vereinzelt Einzelzellnekrosen beobachtet wurden.

Im Gegensatz zu Paper 2, 3 und 4 konnten Schädigungen an den Fischen beobachtet werden, die durch die Aufnahme von Mikroplastik sowie adsorbierten Schadstoffen entstanden sind. Die Autor/innen unterscheiden aber nicht wirklich zwischen der Wirkung vom Mikroplastik und derjenigen der adsorbierten Schadstoffe.

7. 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 (2018)¹³

Das Autor/innen versuchen die Menge an Mikroplastikpartikel, welche durch das Verspeisen von Muscheln aufgenommen werden, mit anderen Quellen zu vergleichen.

Muscheln werden betrachtet, da diese besonders viel MP über die Nahrung aufnehmen und so einen guten Biomonitor für MP bilden¹⁸. In einem ersten Schritt wurden dazu Muscheln an verschiedenen Punkten der schottischen Küste gesammelt und in einer Enzymmischung aufgelöst. Die dabei zurückbleibenden Partikel wurden anschliessend untersucht und gezählt. Bei einem Grossteil der gesammelten Partikel handelte es sich um Fasern. Als Vergleich wurden in drei Haushalten in Edinburgh Petrischalen aufgestellt und jeweils zwanzig Minuten (Zeitspanne Konsum von Essen), vierzig Minuten (Zeitspanne Kochen und Essen) respektive gar nicht (Kontrollgruppe) geöffnet, um die passiv gesammelten Partikel im Essen abzuschätzen.

Es konnte dabei gezeigt werden, dass im Vereinigten Königreich durchschnittlich 123 Mikroplastik-Partikel pro Person und Jahr durch Muscheln aufgenommen werden. Die passiv aufgenommenen Partikel während des Essens belaufen sich auf rund 15'000 bis 60'000 Partikel, wobei rund 33% davon Mikroplastik Partikel sind¹⁹.

Die Autor/innen können zeigen, dass Mikroplastik auch von Menschen aufgenommen wird, jedoch wird nicht auf die adsorbierten Schadstoffe eingegangen. Somit ist ein Vergleich mit vorangehenden Papers nicht möglich.

8. Polychlorinated Biphenyls In Wild Birds In Britain And Their Avian Toxicity (1970)²⁰

Dieses Paper von 1970 war der erste Artikel, welcher in der Zeitschrift "Environmental Pollution" veröffentlicht wurde. Das Paper ist in zwei Teile geteilt. Für den ersten Teil wurden Leber und Eier von Wildvögeln in diversen Teilen Grossbritanniens gesammelt und auf den Anteil von PCB analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Konzentration von PCB in Vögeln abhängig von ihrer Ernährung variiert. So wiesen Vögel die sich primär von anderen Vögeln, kleinen Säugetieren oder Fischen ernähren höhere Konzentrationen an PCB auf, als jene welche sich von Insekten ernähren. Dies lässt den Schluss zu, dass sich PCBs entlang der Nahrungskette bioakkumulieren. Im zweiten Teil des Papers wurde versucht, die Frage nach der toxischen Wirkung von PCB in Vögeln zu untersuchen. Die Autoren kommen zum Schluss, dass PCBs wahrscheinlich nicht verantwortlich für ein weitverbreitetes Vogelsterben in Grossbritannien ist. Es ist jedoch wahrscheinlich mitverantwortlich für den Rückgang erfolgreicher Bruten¹¹. Im Experiment wurden japanische Möwen acht Wochen lang mit Futter gefüttert, welches mit Aroclor 1254, einem Kühlmittel und Dielektrikum, in unterschiedlichen Dosen

versetzt wurde. Während den acht Wochen verendeten sieben der 38 Vögel, alle zeigten dabei Schüttelkrämpfe in den Flügeln, einen Verlust des Gleichgewichtssinns sowie Vergrösserungen der Leber. Die mittlere letale Dosis wurde auf $254 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ geschätzt und ist somit deutlich weniger tödlich als das in den 1940er Jahren weit verbreitete Insektizid DDT. Jedoch wird darauf aufmerksam gemacht, dass auch Vögel mit deutlichen geringeren Dosen verendeten und somit die Mortalitätskurve flacher verläuft als für DDT.

Die Autor/innen unterstreichen ähnlich wie in Paper 5 die Schädlichkeit von POPs, in diesem Fall PCB.

3. 3 Aufnahme von Mikroplastik mit POPs, Livia Brunner

9. Potential for Plastics to Transport Hydrophobic Contaminants (2007)²¹

In diesem Paper wurde das Loslösen von Phenanthren von drei verschiedenen Plastikarten betrachtet. Dafür hat man die drei meist gebrauchten Plastiken in West Europa untersucht (Polyethylene, Polypropylene, PVC). Dazu wollte man einen Vergleich zu der Adsorption von hydrophobischen Verbindungen an Sediment machen. Dafür wurde natürliches, marines Sediment aus Devon U.K. in zwei verschiedenen Monaten gesammelt. Oft schwimmen Mikroplastikteile an der Wasseroberfläche, wo es eine hohe Konzentration an hydrophoben Verbindungen hat²⁴. Somit können diese an die Mikroplastikteile gebunden werden. Der Plastik sinkt ab und transportiert somit die Verunreinigungen auf den Boden²⁵. So gibt es eine Akkumulation im Sediment, was Auswirkungen auf darin lebende Tiere haben kann²³.

Das Paper konnte aufzeigen, dass die Loslösung vom Sediment schneller passiert als vom Plastik. Ausserdem wurde aufgrund von mathematischen Berechnungen abgeschätzt, dass bereits eine Beigabe von 1 Mikrogramm kontaminierter Polyethylene zu einem Gramm Sediment eine grosse Auswirkung auf den Wattwurm (*A. marina*) hat. Damit wird darauf hingewiesen, dass es sich bei Plastik um einen wichtigen Agenten im Transport von hydrophoben Verbindungen handelt.

Das Paper steht im Widerspruch mit Papers, die gezeigt haben, dass die Aufnahme von POPs über Mikroplastik sehr gering ist. Auch hier sollte man beachten, dass es sich um ein Modell handelt und nicht um ein Experiment. Ausserdem wurde das Modell für ein Sediment erstellt.

10. Effects of Microplastic on Fitness and PCB Bioaccumulation by the Lugworm *Arenicola marina* (L.) (2013)²⁶

Im Paper wird eine erste kontrollierte Studie über den Effekt von Plastik in Verbindung mit POPs an Hand des Wattwurmes (*A. marina*) gemacht. Der Fokus liegt dabei auf den Einflüssen von dem Mikroplastik Polystyrene (PS) in Verbindung mit 19 PCBs.

Dafür wurden die Tiere gesammelt und in Aquarien gehalten. Um zu vergewissern, dass ausschliesslich gesunde und "schnell-grabende" Individuen verwendet wurden, wurden diese auf ihre Grab-Geschwindigkeit geprüft.

Die Aquarien wurden randomisiert angeordnet und mit verschiedenen Behandlungen (Kontrolle, sowie unterschiedliche Dosierung von PS) gehalten.

Es wurde dabei das Überleben, die Aktivität und die Gewichtsmasse der Würmer gemessen.

Im Paper wurde eine positive Relation zwischen der Konzentration des Mikroplastiks im Sediment, der Aufnahme von Partikeln und des Gewichtsverlustes von *A. marina* erkannt. Für PCB105 ergab sich eine Signifikanz bei grösserer Dosis, bei kleinerer Dosis hingegen war die biologische Akkumulation verringert. Am Schluss wird darauf hingewiesen, dass andere Plastikkonzentrationen oder Plastik mit einer höheren Affinität auf POPs haben, andere Ergebnisse geben könnten.

Das Resultat dieses Papers schliesst sich dem Resultat von Paper 9 an. Es widerspricht Papers, in denen gezeigt werden konnte, dass die Aufnahme von POPs über Mikroplastik im Vergleich zu anderen Aufnahmewegen eher gering ist.

11. Plastic as a Carrier of POPs to Aquatic Organisms: A Model Analysis (2013)²⁸

Aufgrund der Hypothese, dass POPs in Verbindung mit Mikroplastik ein Risiko für aquatische Organismen darstellen könnten, wurde ein konzeptionelles Modell aufgestellt.

Plastikpartikel im Meer absorbieren persistente organische Partikel²⁹. Das Modell soll die Effekte von Plastik und Bioakkumulation von POPs aufzeigen, wobei es auf den Wattwurm (*A. marina*) berechnet wurde. Im Modell über den PCB Transfer in *A. marina* in geschlossenen Systemen mit Polystyren konnte bei einer positiven PCB absorption zu erst einen Mechanismus als Träger und nach etwa 5 Tagen eine Funktion als "Reiniger" dargestellt werden.

Der Transfer in Verbindung mit Polyethylene, ebenfalls im geschlossenen System, konnte nicht verglichen werden, da keine Daten vorliegen. Des Weiteren wurden die Effekte von Plastik auf die Bioakkumulation von PCBs in offenen Systemen modelliert. Dabei konnten aber weder für Mikroplastik noch für Nanoplastik signifikante Resultate dargestellt werden.

Die Resultate dieses Papers lassen darauf schliessen, dass Mikroplastik als Vektor für Schadstoffe eher vernachlässigbar ist. Jedoch sollte man auch hier beachten, dass es sich um ein Modell und nicht um ein Experiment handelt.

12. Transfer of benzo[a]pyrene from microplastics to *Artemia nauplii* and further to zebrafish via a trophic food web experiment: CYP1A induction and visual tracking of persistent organic pollutants (2016)³⁰

Die Autor/innen erläutert die Weitergabe von POPs und Plastik Partikeln über die natürliche Nahrungskette. Dabei geht es um den Übergang von Invertebraten zu Vertebraten, da dieser bisher noch nicht untersucht worden waren. In dem Paper werden "uptake, retention, and effects" von kleinen Polymer Partikel (1-20 µm) im Salzwasserkrebs *Artemia nauplii* betrachtet. Es wird ausserdem die Übertragung von den Partikeln auf Zebrafische, als Prädator des Salzwasserkrebse, angeschaut.

Als Beispielstoff wird benzo[a]pyren (BaP) betrachtet. Die *Artemia nauplii* wurden mit fluoreszierenden Mikroplastik gefüttert. Später wurden sie an Zebrafische verfüttert. Diese wurden dann sezziert, um den vorhandenen Anteil von Mikroplastik zu analysieren. Dasselbe wurde mit BaP gemacht.

Bei der Analyse hat sich herausgestellt, dass sowohl bei den Salzwasserkrebse als auch bei den Zebrafischen das Mikroplastik nach einigen Stunden wieder ausgeschieden wurde, ohne einen Effekt auf die Tiere auszuüben. Das BaP konnte zum grössten Teil von *Artemia nauplii* aufgenommen werden, und somit auf die Zebrafische übertragen werden. Die fluoreszierte Substanz konnte vor allem in den Darmzotten der Fische gefunden, nach einer längeren Beobachtungszeit konnten sie auch in der Leber gesehen werden. Am Ende des Papers wird diskutiert, dass das Mikroplastik zwar aufgenommen wurde, jedoch nach einiger Zeit auch wieder ausgeschieden wird und es dadurch wohl keinen Einfluss auf die Zebrafische hat. Dies wurde unter anderem dadurch begründet, dass keine Krankheitssymptome aufgewiesen wurden. Für die Fische machte es auch keinen Unterschied im Energielevel, da ihnen die gleiche Menge an Salzwasserkrebse gefüttert wurde wie bei der Kontrollgruppe. Für die *Artemia nauplii* hingegen bedeutet die Aufnahme von Mikroplastik einen Energieverlust, da es nicht um energiereiche Nahrung handelt. Bei den mit BaP versehenen Mikroplastikteile konnte gezeigt werden, dass diese im Darm und teils in die Leber aufgenommen wurden.

Dieses Paper zeigt, dass ein Transfer von adsorbierten Schadstoffen in einen Organismus stattfindet. Im Paper wird jedoch nicht quantifiziert, wie gross der Anteil der so aufgenommen Schadstoffen im Vergleich zu der totalen Menge ist. Somit ist es eher schwierig, dieses Paper mit anderen zu vergleichen.

13. Microplastic as a Vector for Chemicals in the Aquatic Environment: Critical Review and Model-Supported Reinterpretation of Empirical Studies (2016)³¹

Im Paper wird die Hypothese behandelt, dass Mikroplastik gefährliche hydrophobische organische Chemikalien (HOCs) transportiert.

Dazu wurden vor allem mathematische Modelle betrachtet. Die Sorption von Plastik zum Beispiel wurde als Koeffizient von der Konzentration im Plastik über der Konzentration im Wasser definiert.

Am Schluss wird diskutiert, dass der Plastik zwar HOCs transportiert, die Masse aber vernachlässigbar ist, im Vergleich zu anderen Medien². Auch wird Bezug genommen auf die Bioakkumulation durch die Aufnahme am Plastik, die aber unbedeutend klein ist auf dem Meeresboden²⁸. Schlussendlich wird darauf hingewiesen, dass die Bioakkumulation von Mikroplastik sich wahrscheinlich auf das Meer beschränken, deswegen es schwierig ist aus Daten der Feldforschung eine Aussage über das Meeresleben zu machen. Es werden also langfristige Studien mit verschiedenen Spezies gefordert.

Die Resultate dieses Papers decken sich mit anderen Modellen, die versucht haben, die Aufnahme von adsorbierten Schadstoffen in Relation zu anderen Aufnahmewege zu simulieren.

3. 4 Akkumulation in der Nahrungskette, Lukas Guyer

14. Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health (2018)³²

Die Autor/innen des Reviews haben zum Ziel einen Forschungsüberblick über das Verhalten von MP in marinen Nahrungsnetzen zu geben. Es sollen zum einen Faktoren benannt werden, welche die Aufnahme von MP begünstigen. Zum anderen interessiert auch, wie der trophische Transfer vom MP funktioniert. Schliesslich möchte man auf diesen Erkenntnissen aufbauend das gesundheitliche Risiko der diätetischen Aufnahme von MP und den damit assoziierten Schadstoffen auf marine Organismen und auf den Menschen abschätzen.

In einem Experiment von Cedervall et al. (2012)³³ konnte der Transfer von MP erstmals bestätigt werden. Dabei wurden Polystyrol Nanopartikel (24nm) in eine Süsswasser-Nahrungskette gegeben. Der Goldfisch, der am Ende der Nahrungskette stand, zeigte inhibiertes Fressverhalten, auch metabolische Effekte konnten gezeigt werden. In ähnlichen Experimenten wurde Biotransfer ebenfalls nachgewiesen³⁴. Santana et al. (2017)³⁵ vermuten aber nur ein vernachlässigbares Risiko auf höhere trophische Level aufgrund der schnellen Reinigung von MP. Die Vektorfunktion für Schadstoffe ist in isolierten Untersuchungen ("controlled feeding studies") bei Amphipoda, Polychaeten, Muscheln und Fischen nachgewiesen worden. Wie dieser Effekt in grösseren Nahrungsketten aussieht, wurde hingegen in nur zwei Studien untersucht. In Batel et al. (2016)³⁰ wurde der trophische Transfer von PE und daran adsorbiert Benzo(a)pyrene gezeigt. Es konnte gezeigt werden, dass BaP in die Darmschleimhaut des betrachteten Fisches desorbiert und in die Leber gelangt. In Tosetto et al. (2017)³⁶ konnte dagegen kein Effekt auf das Verhalten von den trophisch höheren Fischen festgestellt werden (mit Polyethylen MP und PAHs als adsorbierter Schadstoff).

Zusammenfassend ist der Vektor Effekt auf die gesamte Nahrungskette unsicher, die Datengrundlage für ein Risk Assessment von marinen MP dementsprechend noch "ungenügend". Was bedeutet das für potenzielle adverse Gesundheitseffekte beim Menschen? Während empirische Daten vermuten lassen, dass Menschen durch Seafood MP aufnehmen, ist der Anteil verglichen mit der Belastung durch andere Quellen nicht bekannt³⁷. Dementsprechend unsicher ist die sekundäre Belastung durch Schadstoffe, welche durch kontaminiertes Gewebe aufgenommen werden³⁸.

Die Resultate, welche im Review diskutiert werden, sind nicht einheitlich, was die Aussagen der in diesem Literaturbericht zusammengetragenen Papers unterstützt.

15. Microplastics are not important for the cycling and bioaccumulation of organic pollutants in the oceans—but should microplastics be considered POPs themselves? (2017)³⁹

Lange wurde angenommen, dass MP ein effektiver Vektor ist, um POPs in Biota und somit ins Nahrungsnetz zu transportieren. Das vorliegende Paper erklärt diese falsche Annahme mit dem experimentellen Design, das verwendet wurde, um diese wissenschaftliche Erkenntnis zu reproduzieren. Das verwendete Design (Design b)) gibt nicht die realen Umweltbedingungen wieder.

Es wird zwischen drei grundsätzlichen experimentellen Designs unterschieden (Abbildung 1). In a) liegt ein bereits durch Aufnahme von POPs aus der Umwelt verschmutzter Fisch vor. Der Fisch wird mit verschmutztem MP gefüttert. Dieses Szenario ist realistisch, da weder komplett saubere (POPs-freie) Ozeane noch saubere Fische vorkommen. In einer Messung von Rochman (2014)⁴⁰ im südlichen Atlantischen Ozean konnte keine Korrelation zwischen HOCs in MP und HOCs in Amphipoden festgestellt werden. Andere Studien kommen ebenfalls zum Schluss, dass unter diesem Design keine Beweise vorliegen, dass dem MP eine wichtige Rolle als Vektor von POPs zukommt. In b) werden saubere Fische MP mit hohen Konzentrationen von POPs ausgesetzt. Die meisten Studien zu Bioakkumulation verwenden dieses Design. Man beobachtet unter diesen Bedingungen ein Transfer von POPs vom MP zu den Organismen. Das bedeutet aber nicht, dass dieser Effekt auch im Feld relevant ist. In c) wird bereits verschmutztem Fisch sauberes MP gefüttert. Unter diesen Bedingungen wird eine Abnahme der Schadstoffe in der Biota erwartet⁵. Rummel (2016)⁴¹ konnte hingegen keinen signifikanten reinigenden Effekt feststellen.

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass die Bedeutung von MP als Vektor stark vom Studiendesign abhängig ist. Unter umweltnahen Bedingungen kann kein relevanter Effekt festgestellt werden. Das "leaching" von bestimmten Chemikalien des MP wurde in einer Studie an Seevögeln von Tanaka (2013)⁴² nachgewiesen.

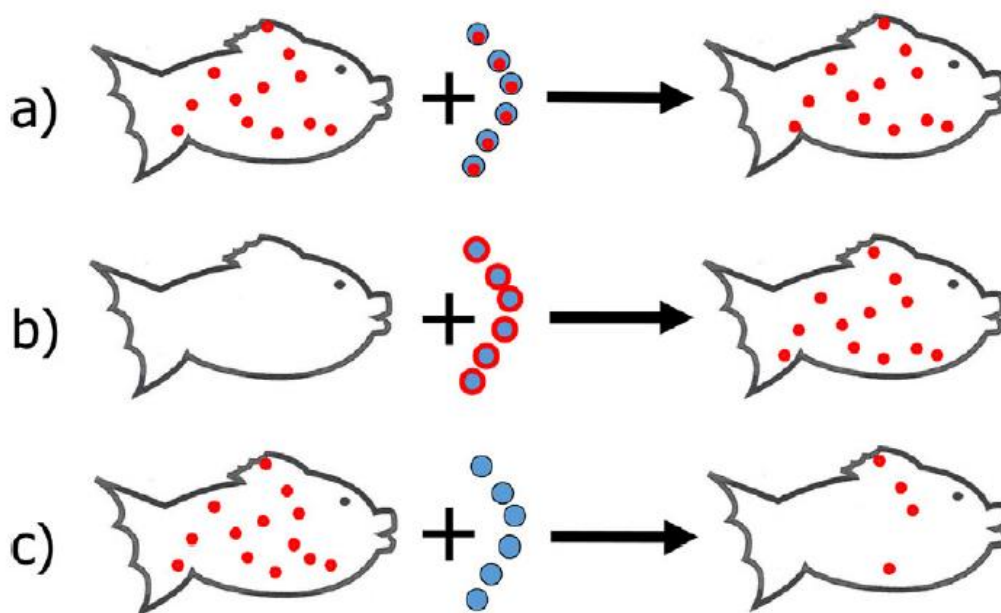


Abbildung 1 Drei verschiedene hypothetische Experimente mit Fischen, Mikroplastik (blau) und organische Schadstoffe (rot).

Die Autor/innen versuchen aufzuzeigen, weshalb es in den verschiedenen Papers zu unterschiedlichen Resultaten kommt. Aufgrund der sehr abweichenden Fragestellung ist dieses Paper schwer einzuordnen.

16. Microplastics as vectors for bioaccumulation of hydrophobic organic chemicals in the marine environment: A state-of-the-science review (2016)³⁸

Die verfügbaren Studien können die These, dass an MP adsorbierte HOCs ein "signifikantes ökologisches Risiko" darstellen, nicht unterstützen. Das Paper macht einen Vergleich zwischen der Nettoproduktion von Plastik im Jahr 2013 und der Produktion von natürlichem Kohlenstoff. Beide Materialien können HOCs transportieren. Im Jahr 2013 wurden 298 Millionen Kubikmeter Plastik produziert⁴³, schätzungsweise gelangen 0.1% davon in die Ozeane. Die Nettoproduktion von organischem Kohlenstoff in den Ozeanen wird auf 40 Gigatonnen geschätzt⁴⁴. Die Autor*innen ziehen daraus den Schluss, dass der Anteil der HOCs, die an MP adsorbiert sind, gegenüber den an anorganischen Kohlenstoff adsorbierten HOCs "unwesentlich" klein sind.

Die Autor/innen vergleichen auch hier den Stofffluss und können daraus schliessen, dass Mikroplastik als Vektor vernachlässigbar ist.

3. 5 Sorption, Annette Temperli

17. Sorption of Toxic Chemicals on Microplastics (2018)⁴⁵

Die Autor/innen dieses Buches untersuchen das Absorptionsverhalten von Mikroplastik und toxischen Substanzen. Mikroplastik kann schädliche Chemikalien (wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs), PCBs, Dichlordiphenyltrichlorethane (DDTs) und Hexachlorcyclohexane (HCHs)) aufnehmen und damit die marine Nahrungsketten beeinflussen¹⁷. Darüber hinaus kann Mikroplastik toxische und schädliche Chemikalien (z.B. Weichmacher) freisetzen, die bei der Herstellung zur Verbesserung der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Kunststoffen eingesetzt werden^{38 46}. Die enthaltenen Chemikalien aus den MP-Proben waren hauptsächlich Spurenelemente^{4 17}. Dazu gehören toxische Metalle, wie z.B. Al^{3+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Ti^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{2+} , Pb^{2+} , Co^{2+} , Mo^{2+} , Sn^{2+} , Sb^{2+} , Ag^{2+} , U^{2+} , Hg^{2+} ⁴⁰ und organische Chemikalien wie PCBs, PAHs, DDTs und HCHs, während die chemische Bestandteile, die aus dem MP freigesetzt werden, hauptsächlich PBDEs, Bisphenol A (BPA) und NP sind⁴⁷. Die Absorption von POPs und anderen lipophilen Chemikalien erfolgt in das Innere des Plastikpartikel und nicht an dessen Oberfläche. Die Grösse der Kunststoffpartikel beeinflusst die chemische Absorption. Kunststoffpartikel mit kleinen Grössen besitzen im Vergleich zu großen Partikeln eine grössere Absorptionsoberfläche, so dass kleinere Partikel eine höhere Konzentration von Chemikalien absorbieren können⁴⁸. Einige Studien zeigen, dass gummiartige Kunststoffe eine höhere Affinität zu organischen Chemikalien haben als glasartige Kunststoffe¹⁷.

Das Kapitel des Buches «Microplastic Contamination in Aquatic Environments - An Emerging Matter of Environmental Urgency» beschreibt, von welchen Faktoren die Adsorption abhängt und welche Stoffe adsorbieren können. Einige Faktoren, die für die Adsorption mitverantwortlich sind und in diesem Kapitel Beachtung finden, wurden von Papers nicht beschrieben.

18. Characterisation of microplastics and toxic chemicals extracted from microplastic samples from the North Pacific Gyre (2015)⁴⁹

In diesem Paper werden Mikroplastikproben auf toxische Substanzen untersucht. Organische Schadstoffe kommen im Wasser in sehr geringen Konzentrationen vor, da sie lipophil sind können sie sich aber in höheren Konzentrationen auf Kunststoff ablageren²⁹. In diesem Paper wurden 40 Proben von Kunststoffpartikeln chemisch analysiert.

Die Resultate enthielten Kunststoffpartikel, die genügend klein waren, um sie mit einem Rasterelektronenmikroskop zu visualisieren. Möglicherweise sind die kleinen Partikel gefährlicher für Meeresorganismen als die größeren (>5 mm) Stücke, da die kleinen Partikel eine grössere Oberfläche haben und mehr giftiges Material aufnehmen können. Zudem werden sie leichter als Lebensmittel wahrgenommen⁵⁰. Eine Übertragung giftiger Chemikalien vom Kunststoff auf ölige Membranen bei Meerestieren ist zu erwarten. Grund dafür ist, dass die Diffusion von Material von einem Ort (dem Kunststoff) zum anderen (der öligen Membran oder dem Fettgewebe) spontan von hoher chemischer

Aktivität (Konzentration) zu niedrigerer chemischer Aktivität erfolgt, wenn ein Weg verfügbar ist. Es wird erwartet, dass das Verschlucken der Plastikpartikel und der Kontakt im Darm der Fische oder anderen Organismen diesen notwendigen Weg ermöglicht. Da einige dieser organischen Schadstoffe für Lebewesen schädlich sind und sich bioakkumulieren können, sind weitere Arbeiten erforderlich, um das Potenzial für eine erhöhte Schädigung des Meereslebens aufgrund des Vorhandenseins der Kunststoffpartikel abzuschätzen. Das Vorhandensein von mikroskopisch kleinen Kunststoffpartikeln, die in dieser Studie entdeckt wurden, deutet darauf hin, dass noch kleinere Meeresbewohner diese Träger von toxischen Stoffen aufnehmen können.

In diesem Paper wird untersucht, ob Mikroplastik Träger von Schadstoffen ist. Da Schadstoffe gefunden wurden, wird darauf geschlossen, dass diese im Darm von Organismen aufgenommen werden können. Dies ist nur eine Annahme und wird nicht mit einem Modell oder einem Experiment gestützt. Dass eine Aufnahme erfolgen kann, wurde aber in anderen Papers gezeigt, jedoch ist sich die Wissenschaft nicht schlüssig, wie gross dieser Anteil ist.

19. The Complex Interaction between Marine Debris and Toxic Chemicals in the Ocean (2012)⁵¹, Review

Das Ziel dieses Review ist den aktuellen Wissensstand über Mikroplastik und dessen Wechselwirkung mit toxischen Substanzen zu überprüfen. Ein besseres Verständnis über das aktuelle Wissen soll einfacher zu Lösungen führen, um die Interaktion zu verhindern. Kunststoffabfälle können eine Senke für giftige Chemikalien im Meer sein, in dem sie diese absorbieren⁵². Tiere, die Kunststoff aufnehmen sind einem erhöhten Risiko für toxische Wirkungen ausgesetzt und können giftige Chemikalien in ihrem Körper ansammeln, soweit die Schadstoffe desorbieren oder aus dem Kunststoff auswaschen. Wenn sich giftige Chemikalien in marinen Arten ansammeln, können diese auch in die menschliche Nahrungskette gelangen. Derzeit ist es nicht möglich, genau zu berechnen, wie viel der vorhandenen toxischen Chemikalien in der menschlichen Nahrungskette auf diesen Mechanismus zurückzuführen ist. Bei weniger persistenten, bioakkumulierenden Substanzen ist nicht klar, wie viel in das Nahrungsnetz gelangt und ob sie sich auf die menschliche Gesundheit auswirken. Aufgrund der dispersen Natur von Giftstoffen und Kunststoffen im Meer sind Präventionsstrategien von entscheidender Bedeutung, um sowohl plastische Ablagerungen als auch Konzentrationen von toxischen Chemikalien zu reduzieren.

Die Autor/innen dieses Paper behaupten, dass noch nicht berechnet werden kann, wie viel Schadstoffe über Mikroplastik in einen Organismus gelangen können. Seit dem Erscheinen dieses Papers konnten jedoch Modelle erstellt werden, die mehrheitlich widerlegen, dass Schadstoffe vorwiegend über Mikroplastik in Organismen gelangen.

20. The chemical behaviors of Microplastic in marine environment: A review (2019)⁵³

In diesem Review werden die Wechselwirkungen von organischen Schadstoffen und Metallen mit Mikroplastik zusammengefasst. Er basiert auf Untersuchungen und Laborresultaten aus verschiedener Literatur. Die Schadstoffkonzentrationen auf Mikroplastik in Meeres- und Küstenregionen zeigen räumliche Unterschiede. Die Schadstoffkonzentrationen auf Mikroplastik aus abgelegenen Gebieten sind geringer als in Grossstädten. Die Konzentrationen von HCHs und DDTs auf Mikroplastik sind niedriger als die von PAKs und PCBs im globalen Umfeld. Darüber hinaus könnten die Arten und Eigenschaften von Mikroplastik, die Arten und Konzentrationen von Schadstoffen sowie die Umweltbedingungen (Salzgehalt und pH-Wert) das Sorptionsverhalten von Mikroplastik beeinflussen. Mikroplastik ist Witterungs- und Alterungsprozessen ausgesetzt, was zu dessen Zersetzung führt. Der Abbau verändert hauptsächlich die Farbe, die Oberflächenmorphologie, die Partikelgrösse, die Kristallinität und die Dichte von Mikroplastik. Die gealterten Mikropartikel haben eine höhere Absorptionsfähigkeit von Schadstoffen als die jüngeren. Weiter kann die Aufnahme von

Mikroplastik mit toxischen Substanzen dazu führen, dass die Schadstoffe in das Nahrungsnetz eingeführt werden und ein Risiko für Meeresorganismen darstellen.

In diesem Review wird erwähnt, dass älterer Mikroplastik eine erhöhte Adsorptionsfähigkeit hat. Die restlichen Informationen decken sich mit den Erkenntnissen anderer in diesem Literaturbericht vorgestellten Studien.

4. Conclusion

Aufgrund der unterschiedlichen Resultate hat sich unsere Gruppe entschlossen, nicht wie anfangs gedacht, vor dem Mikroplastik als Vektor zu warnen. Viel mehr soll gezeigt werden, dass Forschung nicht immer zu denselben Resultaten gelangt und es soll angeschnitten werden, was Gründe dafür sein könnten. Dies soll anhand des Beispiel Mikroplastik gezeigt werden.

5. Literaturverzeichnis

1. Wissenschaftler warnen: Zu viel Mikroplastik im Boden - ZDFmediathek. Available at: <https://www.zdf.de/nachrichten/heute/zu-viel-mikroplastik-im-boden-100.html>. (Accessed: 27th March 2019)
2. Anderson, A. *et al.* Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: Part two of a global assessment. IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint group of experts on the scientific aspects of marine environmental protection. Reports and studies. (2016).
3. Koelmans, B. *et al.* SAPEA Report on MICROPLASTICS. (2019). doi:10.26356/microplastics
4. Bakir, A., Rowland, S. J. & Thompson, R. C. Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions. *Environ. Pollut.* **185**, 16–23 (2014).
5. Gouin, T., Roche, N., Lohmann, R. & Hodges, G. A thermodynamic approach for assessing the environmental exposure of chemicals absorbed to microplastic. *Environ. Sci. Technol.* (2011). doi:10.1021/es1032025
6. Engler, R. E. The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean. *Environmental Science and Technology* (2012). doi:10.1021/es3027105
7. Bakir, A., O'Connor, I. A., Rowland, S. J., Hendriks, A. J. & Thompson, R. C. Relative importance of microplastics as a pathway for the transfer of hydrophobic organic chemicals to marine life. *Environ. Pollut.* **219**, 56–65 (2016).
8. Besseling, E., Foekema, E. M., van den Heuvel-Greve, M. J. & Koelmans, A. A. The Effect of Microplastic on the Uptake of Chemicals by the Lugworm *Arenicola marina* (L.) under Environmentally Relevant Exposure Conditions. *Environ. Sci. Technol.* **51**, 8795–8804 (2017).
9. Lee, H., Lee, H. J. & Kwon, J. H. Estimating microplastic-bound intake of hydrophobic organic chemicals by fish using measured desorption rates to artificial gut fluid. *Sci. Total Environ.* **651**, 162–170 (2018).
10. Jones, K. C. & de Voogt, P. Persistent organic pollutants (POPs): state of the science. *Environ. Pollut.* **100**, 209–221 (1999).
11. Anderson, D. W., Hickey, J. J., Risebrough, R. W., Hughes, D. F. & Christensen, R. E. Significance of chlorinated hydrocarbon residues to breeding pelicans and cormorants. *Can. Field-Naturalist* **83**, 91–112 (1969).
12. Reijnders, P. J. H. *et al.* Population development of harbour seals *Phoca vitulina* in the Wadden Sea after the 1988 virus epizootic. *J. Sea Res.* **38**, 161–168 (1997).
13. Béland, P. *et al.* Toxic Compounds and Health and Reproductive Effects in St. Lawrence Beluga Whales. *J. Great Lakes Res.* **19**, 766–775 (1993).

14. Safe, S. H. Polychlorinated Biphenyls (PCBs): Environmental Impact, Biochemical and Toxic Responses, and Implications for Risk Assessment. *Crit. Rev. Toxicol.* **24**, 87–149 (1994).
15. Scheringer, M. Persistence and Spatial Range as Endpoints of an Exposure-Based Assessment of Organic Chemicals. *Environ. Sci. Technol.* **30**, 1652–1659 (1996).
16. De, R. *et al.* Impairment of Immune Function in Harbor Seals (*Phoca vitulina*) Feeding on Fish from Polluted Waters. *Ambio* **23**, 155–159 (1994).
17. Rochman, C. M., Hoh, E., Kurobe, T. & Teh, S. J. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Sci. Rep.* **3**, 1–7 (2013).
18. Beyer, J. *et al.* Blue mussels (*Mytilus edulis* spp.) as sentinel organisms in coastal pollution monitoring: A review. *Mar. Environ. Res.* **130**, 338–365 (2017).
19. Dris, R. *et al.* A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environ. Pollut.* **221**, 453–458 (2017).
20. Wood, M., Station, E. & Ripton, A. Polychlorinated Biphenyls in Wild Birds in Britain and Their Avian Toxicity. 3–26 (1970).
21. Teuten, E. L., Rowland, S. J., Galloway, T. S. & Thompson, R. C. Potential for Plastics to Transport Hydrophobic Contaminants. *Environ. Sci. Technol.* **41**, 7759–7764 (2007).
22. Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris : a reviewfile. *Mar. Pollut. Bull.* **44**, 842–852 (2002).
23. Thompson, R. C. *et al.* Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *Science (80-.)*. **304**, 838 (2004).
24. Wurl, O. & Obbard, J. P. A review of pollutants in the sea-surface microlayer (SML): A unique habitat for marine organisms. *Mar. Pollut. Bull.* **48**, 1016–1030 (2004).
25. Ye, S. & Andrady, A. L. Fouling of floating plastic debris under Biscayne Bay exposure conditions. *Mar. Pollut. Bull.* **22**, 608–613 (1991).
26. Besseling, E., Wegner, A., Foekema, E. M., van den Heuvel-Greve, M. J. & Koelmans, A. A. Effects of microplastic on fitness and PCB bioaccumulation by the lugworm *Arenicola marina* (L.). *Env. Sci Technol* **47**, 593–600 (2013).
27. Paik, P. & Kar, K. K. Kinetics of thermal degradation and estimation of lifetime for polypropylene particles: Effects of particle size. *Polym. Degrad. Stab.* **93**, 24–35 (2008).
28. Koelmans, A. A., Besseling, E., Wegner, A. & Foekema, E. M. Plastic as a Carrier of POPs to Aquatic Organisms: A Model Analysis. *Environ. Sci. Technol.* **47**, 7812–7820 (2013).
29. Hirai, H. *et al.* Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches. *Mar. Pollut. Bull.* **62**, 1683–1692 (2011).
30. Batel, A., Linti, F., Scherer, M., Erdinger, L. & Braunbeck, T. Transfer of benzo[a]pyrene from microplastics to *Artemia* nauplii and further to zebrafish via a trophic food web experiment: CYP1A induction and visual tracking of persistent organic pollutants. *Env. Toxicol Chem* **35**, 1656–1666 (2016).
31. Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, G. A. & Janssen, C. R. Microplastic as a Vector for Chemicals in the Aquatic Environment: Critical Review and Model-Supported Reinterpretation of Empirical Studies. *Environ. Sci. Technol.* **50**, 3315–3326 (2016).
32. Carbery, M., O'Connor, W. & Palanisami, T. Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. *Environment International* (2018). doi:10.1016/j.envint.2018.03.007
33. Cedervall, T., Hansson, L. A., Lard, M., Frohm, B. & Linse, S. Food chain transport of nanoparticles affects behaviour and fat metabolism in fish. *PLoS One* (2012). doi:10.1371/journal.pone.0032254
34. Setälä, O., Fleming-Lehtinen, V. & Lehtiniemi, M. Ingestion and transfer of microplastics in the

- planktonic food web. *Environ. Pollut.* (2014). doi:10.1016/j.envpol.2013.10.013
35. Santana, M. F. M., Moreira, F. T. & Turra, A. Trophic transference of microplastics under a low exposure scenario: Insights on the likelihood of particle cascading along marine food-webs. *Mar. Pollut. Bull.* (2017). doi:10.1016/j.marpolbul.2017.05.061
36. Tosetto, L., Williamson, J. E. & Brown, C. Trophic transfer of microplastics does not affect fish personality. *Anim. Behav.* (2017). doi:10.1016/j.anbehav.2016.10.035
37. Wright, S. L. & Kelly, F. J. Plastic and Human Health: A Micro Issue? *Environ. Sci. Technol.* (2017). doi:10.1021/acs.est.7b00423
38. Ziccardi, L. M., Edgington, A., Hentz, K., Kulacki, K. J. & Kane Driscoll, S. Microplastics as vectors for bioaccumulation of hydrophobic organic chemicals in the marine environment: A state-of-the-science review. *Environ. Toxicol. Chem.* (2016). doi:10.1002/etc.3461
39. Lohmann, R. Microplastics are not important for the cycling and bioaccumulation of organic pollutants in the oceans—but should microplastics be considered POPs themselves? *Integrated Environmental Assessment and Management* (2017). doi:10.1002/ieam.1914
40. Rochman, C. M. *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in fish tissue may be an indicator of plastic contamination in marine habitats. *Sci. Total Environ.* **476–477**, 622–633 (2014).
41. Rummel, C. D., Adolfsson-Erici, M., Jahnke, A. & MacLeod, M. No measurable ‘cleaning’ of polychlorinated biphenyls from Rainbow Trout in a 9 week depuration study with dietary exposure to 40% polyethylene microspheres. *Environ. Sci. Process. Impacts* (2016). doi:10.1039/c6em00234j
42. Tanaka, K. *et al.* Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics. *Mar. Pollut. Bull.* (2013). doi:10.1016/j.marpolbul.2012.12.010
43. PlasticsEurope. *Plastics - the facts 2015. An analysis of European plastics production, demand and waste data. PlasticsEurope (the Association of plastics Manufacturers in Europe)* (2015). doi:10.1016/j.marpolbul.2013.01.015
44. Thornton, D. C. O. Primary production in the ocean. in *Advances in Photosynthesis-Fundamental Aspects* (Intech, 2012).
45. Wang, F., Wang, F. & Zeng, E. Y. Sorption of Toxic Chemicals on Microplastics. in *Microplastic Contamination in Aquatic Environments* (2018). doi:10.1016/b978-0-12-813747-5.00007-2
46. Thompson, R. C. *et al.* Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **364**, 2027–2045 (2009).
47. Rochman, C. M. *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in fish tissue may be an indicator of plastic contamination in marine habitats. *Sci Total Env.* **476–477**, 622–633 (2014).
48. Lee, H., Shim, W. & Kwon, J. Sorption capacity of plastic debris for hydrophobic organic chemicals. (Special Section: The persistent and toxic substances in Korea.). *Sci. Total Environ.* (2014).
49. Rios Mendoza, L. M. & Jones, P. R. Characterisation of microplastics and toxic chemicals extracted from microplastic samples from the North Pacific Gyre. *Environ. Chem.* (2015). doi:10.1071/en14236
50. Boerger, C. M., Lattin, G. L., Moore, S. L. & Moore, C. J. Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre. *Mar. Pollut. Bull.* **60**, 2275–2278 (2010).
51. Engler, R. E. The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean. *Environ. Sci. Technol.* **46**, 12302–12315 (2012).
52. Gouin, T., Roche, N., Lohmann, R. & Hodges, G. A Thermodynamic Approach for Assessing the Environmental Exposure of Chemicals Absorbed to Microplastic. *Environ. Sci. Technol.* **45**, 1466–1472 (2011).
53. Guo, X. & Wang, J. The chemical behaviors of microplastics in marine environment: A review. *Mar. Pollut. Bull.* **142**, 1–14 (2019).