

# Lösungsstrategien zur Verminderung von Einträgen von urbanem Plastik in limnische Systeme

Synthesebericht



## **Mitteilungen / Institut für Wasserwesen – Nr. 134**

Universität der Bundeswehr München - Institut für Wasserwesen  
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

### **Lösungsstrategien zur Verminderung von Einträgen von urbanem Plastik in limnische Systeme - PLASTRAT - Synthesebericht**

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schaum, Prof. Dr.-Ing. habil. Steffen Krause, Natalie Wick  
*Universität der Bundeswehr München – Institut für Wasserwesen  
Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik*

Prof. Dr. Jörg Oehlmann, Dr. Ulrike Schulte-Oehlmann, Kristina Klein  
*Goethe-Universität Frankfurt am Main – Abteilung Aquatische Ökotoxikologie*

Dr. Immanuel Stieß, Luca Raschewski, Georg Sunderer, Barbara Birzle-Harder  
*ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung*

Kristina Wencki, Peter Lévai, Dr.-Ing. Hans-Joachim Mälzer, Dr. Gerhard Schertzing, Helena Pannekens, Prof. Dr. agr. habil. Elke Dopp  
*IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH*

Prof. Dr. Thomas Ternes, Dr. Georg Dierkes, Dr. Peter Schweyen, Tim Lauschke  
*Bundesanstalt für Gewässerkunde*

Dr.-Ing. Tobias Günkel-Lange  
*aquadrat ingenieure GmbH*

Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek, Dr. Kaori Sakaguchi-Söder, Michael Gottschling  
*Technische Universität Darmstadt – Institut IWAR*

Christian Staaks  
*inge GmbH*

Dr. Dieter Fischer, Dr. Franziska Fischer  
*Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.*

Prof. Dr. Matthias Labrenz, Franziska Klaeger, Dr. Juliana Ivar do Sul  
*Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde*

*PLASTRAT, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt - Quellen, Senken, Lösungsansätze“  
Förderkennzeichen: 02WPL1446 A-J, Projektlaufzeit: 2017 – 2020/2021*

Copyright 2021



Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ CC BY- Lizenz 3.0 DE (Namensnennung 3.0 Deutschland) zugänglich, vgl. <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de/legalcode>.

**ISSN 2700-7332**

**ISBN 978-3-943207-52-1**

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	III
Tabellenverzeichnis .....	VII
(Mikro-)Plastik – Kleine Partikel mit großer Herausforderung? .....	IX
Danksagung .....	XI
1 Was wissen wir und was wissen wir nicht über Mikroplastik? .....	1
2 Von der Idee zum Projekt PLASTRAT .....	5
3 Eintrag in limnische Systeme: Von der Probenahme zur Technik .....	9
3.1 Herausforderungen bei Ermittlung der Mikroplastikeinträge .....	9
3.2 Warum ist es schwierig eine belastbare Datenbasis zu generieren? .....	11
3.3 Mikroplastik in der Siedlungswasserwirtschaft: Analysenergebnisse und Technologeansätze aus PLASTRAT .....	20
4 Wie verhält sich Plastik in der Umwelt? .....	33
4.1 Woraus besteht Mikroplastik und was ist drin? .....	33
4.2 Findet eine Schadstoffanreicherung an Plastik in der Kläranlage statt? .....	37
4.3 Was macht die toxikologische Wirkung von Plastik aus? .....	39
5 Guter und schlechter Kunststoff? Wege zum Gütesiegel? .....	43
5.1 Gibt es Gütesiegel für Mikroplastik zum Schutz von Gewässern? .....	43
5.2 Brauchen wir ein neues Gütesiegel? .....	44
5.3 Wie kann man Kunststoffe hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit für limnische Systeme umfassend bewerten? .....	46
6 Welche Handlungsspielräume gibt es für Verbraucher/-innen? .....	49
6.1 Wie bewerten Verbraucher/-innen die Gefährdung durch Mikroplastik? .....	49
6.2 Inwiefern sind Verbraucher/-innen bereit, einen Beitrag zur Verringerung des Eintrags von Mikroplastik in die Umwelt zu leisten? .....	50
6.3 Wen sehen Verbraucher/-innen in der Pflicht? .....	52
7 PLASTRAT - Was nun? .....	55
8 Literaturverzeichnis .....	61
9 Abschlussberichte und Publikationen von PLASTRAT .....	65
9.1 Abschlussberichte von PLASTRAT .....	65
9.2 Publikationen von PLASTRAT ( <i>Auswahl</i> ) .....	66



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektidee von PLASTRAT: Systemische Risikoanalyse in einem ganzheitlichen Ansatz von Produzenten, Verbrauchern (Gesellschaft), Technik, Einträgen und Effekten.....	5
Abbildung 2: Herkunft der zehn häufigsten Mikroplastikemissionen in Deutschland (Bertling et al., 2018).....	9
Abbildung 3: Ergebnisse internationaler Studien zur Mikroplastikkonzentration und zum Mikroplastikrückhalt in kommunalen Kläranlagen (verändert nach Hoos (2019), Abschlussbericht Universität der Bundeswehr München, 2021) ....	10
Abbildung 4: Ergebnisse internationaler Studien zur Mikroplastikkonzentration in Klärschlamm (verschiedene Schlämme, entwässert und nicht entwässert) (verändert nach Hoos (2019), Abschlussbericht Universität der Bundeswehr München, 2021).....	11
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Vorgehensweise von Probenahme bis Analyse der Mikroplastikkonzentration in Abwasser- und Klärschlammproben (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021).....	13
Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Abwasserbehandlungsanlage inklusive Kennzeichnung der verwendeten Probenahmestellen zur Ermittlung der Mikroplastikkonzentration im Abwasser (Backwash (UF) = Rückspülwasser der Ultrafiltrationsanlage) (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021).....	14
Abbildung 7: Zweistufige Probenahme bei Abwasserproben: Schritt 1: 24 Stunden-Probenahme in einen Edelstahltank, Schritt 2: Aufkonzentrierung der Partikel durch Filtration (Design: Ecologic Institut / Lena Aebli 2020, Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021) .....	16
Abbildung 8: Große Mikroplastikfraktion (> 500 µm) umgeben von überwiegend organischer Matrix. Foto: A. Tagg/IOW (Abschlussbericht des Leibniz-Instituts für Ostseeforschung Warnemünde, 2021) .....	17
Abbildung 9: GEPARD-basierte Analyse einer Probe. a) Partikel einer Umweltprobe, abgeschieden auf dem Silizium-Messsubstrat (Partikel weiß, Hintergrund schwarz). Die rechte Bildhälfte zeigt ein Falschfarbenbild, in dem jeder Partikel entsprechend des Materialtyps durch GEPARD eingefärbt ist. b, c) Ausschnitte aus dem Übersichtsbild, b) Falschfarbendarstellung: jeder Partikel ist entsprechend des Materialtyps eingefärbt, c) Optisches Bild. Das Markieren eines einzelnen Partikels öffnet ein Label mit allen Partikeleigenschaften (rote Box). (Abschlussbericht des Leibniz-Instituts für Polymerforschung Dresden e.V., 2021).....	20

Abbildung 10: Ergebnisse der Mikroplastikanalysen im Bereich Abwasser und Mischwasser inklusive eines Systemblindwertes, welcher den Einfluss des Probenahmeequipments und Handlings vor Ort repräsentiert, Mittelwert aus zwei Probenahmen (Mischwasserentlastung), bzw. drei Probenahmen (Kläranlagenzu- und -ablauf) (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021) .....	21
Abbildung 11: Zusammenhang von Mikroplastikkonzentration in verschiedenen Abwässern (Zu- und Ablauf zur Kläranlage und Mischwasser) und „klassischer“ Abwasserparameter, hier: Abfiltrierbare Stoffe (AFS) und Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021) .....	22
Abbildung 12: Ergebnisse der Mikroplastik-Analysen in den unterschiedlichen Klärschlämmen einer kommunalen Kläranlage (50.000 EW, PS = Primärschlamm, ÜSS = Überschussschlamm, FS = Faulschlamm) (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021) .....	23
Abbildung 13: Ergebnisse der Mikroplastik-Analysen im Zu- und Ablauf eines Tuchfilters als weiterführende Abwasseraufbereitung im Ablauf der Kläranlage, Feed entspricht Ablauf der Nachklärung (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021) .....	24
Abbildung 14: Schematische Darstellung eines möglichen Konzeptes zur Umsetzung einer Ultrafiltrationsanlage im Kläranlagenablauf (Abschlussbericht der aquadrat ingenieure GmbH, 2021) .....	26
Abbildung 15: Spezifische Jahreskosten (brutto) für eine Ultrafiltrationsanlage im Ablauf der Nachklärung pro Kubikmeter behandeltes Abwasser und pro Einwohner in Abhängigkeit der Ausbaugröße (Abschlussbericht der aquadrat ingenieure GmbH, 2021) .....	27
Abbildung 16: Ergebnisse der Mikroplastik-Analysen im Bereich Ultrafiltration als weiterführende Abwasseraufbereitung, Feed zur UF-Anlage entspricht Ablauf Nachklärung, Backwash = Rückspülwasser der UF-Anlage, Mittelwert aus drei Probenahmen (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021) .....	28
Abbildung 17: Ergebnisse der Untersuchungen des Rückhalts von Antibiotikaresistenzgenen durch die Ultrafiltrationsanlage. Logarithmische Darstellung der Ergebnisse, die Legende zeigt die untersuchten Antibiotikaresistenzgene und fakultativ-pathogenen Bakterien (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021) .....	29
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Risikoermittlung nach dem WSP (Water Safety Plan) der WHO (Abschlussbericht der IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, 2021) .....	31

---

Abbildung 19: Summe der detektierten MS-Intensitäten nach HPLC-MS im ESI-negativ- und ESI-positiv-Modus in Abhängigkeit der künstlichen Bewitterungsdauer des Kunststoffes PBS (oben); detektierte MS-Intensitäten des Oligomeres [BS] <sub>2</sub> B in wässrigen Leachaten in Abhängigkeit der künstlichen Bewitterungsdauer des Kunststoffes PBS (unten). (Abschlussbericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2021).....	36
Abbildung 20: Probenaufbau zur Exposition der ausgewählten Kunststoffe in einzelne Stufen des Klärprozesses. Die Kunststoffe sind in Gewebeschläuchen gesichert und in einem Gestell zur Fixierung an der gewünschten Stelle befestigt (Abschlussbericht der Technischen Universität Darmstadt, 2021) .....	37
Abbildung 21: Kläranlagenaufbau und Probenstandort zur Exposition unterschiedlicher Kunststoffe in unterschiedlichen Stufen des Klärprozesses (Abschlussbericht der Technischen Universität Darmstadt, 2021) .....	38
Abbildung 22: Bewitterte/unbewitterte Kunststoffe (Pr = procedure blank, beschreibt alle Probenreinigungs- und Aufbereitungsschritte ohne Kunststoff; Ex = extraction blank des originalen Plastiks, das nicht in die Kläranlage eingesetzt wurde; v = virgin, r = recycelt, p = Post Industrial) (Abschlussbericht der Technischen Universität Darmstadt, 2021) .....	39
Abbildung 23: Relative östrogene und anti-östrogene Wirkungen der untersuchten Polymere ohne (UV -) und mit UV-Strahlung (UV +). Kontrolle = kein Plastik, PET = Polyethylenterephthalat, PE = Polyethylen, PP = Polypropylen, PS = Polystyrol, PVC = Polyvinylchlorid und Bio = Bioabbaubarer Kunststoff (Abschlussbericht der Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2021).....	41
Abbildung 24: Kriterien zur Kategorisierung der Güte-, Material- und Prüfsiegel im Rahmen der Defizitanalyse (Abschlussbericht der IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, 2021) .	43
Abbildung 25: Diskussion bei einem PLASTRAT-Stakeholderworkshop am 24.09.2019 in Frankfurt am Main (Abschlussbericht des ISOE, 2021).....	45
Abbildung 26: In PLASTRAT erarbeitete Möglichkeit zur Klassifizierung von Kriterien zur Materialbewertung (Abschlussbericht der IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, 2021) .....	47
Abbildung 27: Kriterien zur Bewertung der Wirkung von Kunststoffmaterialien (mit besonderem Fokus auf Wirkungen auf limnische Systeme) (Abschlussbericht der IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, 2021) .....	48
Abbildung 28: Einstellungsmuster zu Umweltgefährdungen durch Mikroplastik (Stieß et al., 2021).....	49





**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1:	Ermittelter Flächenbedarf und Herstellungskosten einer Ultrafiltrationsanlage in Abhängigkeit der Einwohnerwerte (Abschlussbericht der aquadrat ingenieure GmbH, 2021).....	26
------------	---	----



## **(Mikro-)Plastik – Kleine Partikel mit großer Herausforderung?**

Der Einsatz von Plastik gehört zu den großen Errungenschaften unserer Zeit. Die Nutzung von Plastik in unseren verschiedenen Lebensbereichen ermöglicht uns heute Vieles. Dabei setzen wir Plastik oft ein, ohne dass uns dies bewusst ist. Wieviel „virtuelles Plastik“ war allein notwendig, um diesen Synthesebericht zu erstellen? Wieviel Plastik benötigen Sie gerade, um diesen Synthesebericht zu lesen?

Wie so oft, so hat auch der Einsatz von Plastik zwei Seiten: den positiven Errungenschaften stehen negative Auswirkungen gegenüber, vor allem nach der Nutzung von Plastik. Im Fokus stehen hierbei Fragestellungen der Toxikologie sowie der Abfallverwertung. Im Gegensatz zu vielen anderen Stoffen, mit denen wir täglich in Berührung sind, hat Plastik die Eigenschaft, dass sich kleinste Partikel bilden. So ist es nicht verwunderlich, dass sich mittlerweile in allen Umweltmedien Mikroplastikpartikel finden lassen.

Die Idee von PLASTRAT war es, in einem interdisziplinären Team Ansätze für die Verminderung von Einträgen von Plastik in Gewässer zu untersuchen. Dabei standen über den Ansatz der systemischen Risikoanalyse die unterschiedlichen Sektoren im Fokus, angefangen von der Erzeugung, über die Nutzung bis hin zu den Eintragspfaden und die toxikologische Bewertung. Der Synthesebericht fasst die Ergebnisse von PLASTRAT zusammen. Vor allem zeigt der Synthesebericht die großen Herausforderungen sowie Lösungsansätze zum Thema Mikroplastik auf. Dabei wird auch deutlich, dass wir bei vielen Fragestellungen zum Umgang mit Plastik erst am Anfang stehen.

Die ersten Ideen zu PLASTRAT entstanden 2016. In den vergangenen fünf Jahren stand das Thema Plastik im Fokus von Öffentlichkeit und Presse. In dieser Zeit gab es bereits wichtige Veränderungen beim Einsatz von Plastik bei diversen Produkten, beispielsweise durch die Substitution durch alternative Materialien. Dies zeigt deutlich, dass eine Bewusstseinsveränderung stattgefunden hat, die sich sicherlich in der Zukunft fortsetzen wird.

Die Arbeiten und Diskussionen im Projektteam von PLASTRAT waren spannend. In vielen Projektbesprechungen wurde an den Forschungsfragestellungen gearbeitet und nach Lösungen gesucht. Es gab einen intensiven persönlichen Austausch mit allen am Projekt beteiligten Personen, so dass uns die seit 2020 geltenden Einschränkungen durch die Corona-Pandemie nicht immer leichtgefallen sind.

Wir möchten uns bei allen bedanken, die bei PLASTRAT mitgewirkt haben. Allen Lesern des Syntheseberichts wünschen wir viele Freude beim Lesen und hoffen, dass wir Ihnen einen Impuls für den zukünftigen Umgang mit (Mikro-)Plastik geben können.

Neubiberg, im April 2021,

im Namen der Gesamtkoordination durch die Universität der Bundeswehr München

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schaum

Prof. Dr.-Ing. habil. Steffen Krause



## Danksagung

PLASTRAT - Lösungsstrategien zur Verminderung von Einträgen von urbanem Plastik in limnische Systeme wurde innerhalb des Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt - Quellen, Senken, Lösungsansätze“ gefördert. Dieser Forschungsschwerpunkt ist Teil der Leitinitiative Green Economy des BMBF-Rahmenprogramms „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (FONA<sup>3</sup>).

Alle Projekte der Fördermaßnahme wurden begleitet und vernetzt durch PlastikNet.



Die Arbeiten von PLASTRAT waren nur durch die Mitarbeit von zahlreichen assoziierten Partnern und weiteren Stakeholdern, vor allem im Rahmen von Workshops, bei der Durchführung von Probenahmen oder bei der Unterstützung von Analysen, möglich. Ganz besonders zu erwähnen sind dabei (in alphabetischer Reihenfolge):

- Abwasserverband Kempten
- Autobahndirektion Südbayern
- CARAT GmbH
- DWA Landesverband Bayern
- Entsorgungsbetriebe der Landeshauptstadt Wiesbaden
- Gemeindliche Einrichtungen und Abwasser Holzkirchen
- Große Kreisstadt Öhringen – Kläranlage
- Karlsruher Institut für Technologie – Institut für funktionelle Grenzflächen
- Kelheim Fibres GmbH
- Münchner Stadtentwässerung
- PlasticsEurope Deutschland e.V.
- Stadt Weißenburg in Bayern
- Stadt Weiterstadt – Eigenbetrieb Stadtwerke
- The Sustainable People GmbH
- TU München – Abteilung Analytische Chemie
- Universität der Bundeswehr München – Institut für Werkstoffe des Bauwesens

In den vergangenen drei Jahren haben zahlreiche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus Wissenschaft und Labor sowie Studierende an den Fragestellungen von PLASTRAT geforscht; diverse Ergebnisse sind bereits international und national publiziert; Doktorarbeiten sind in der Entstehung. Die an der Forschung beteiligten Personen finden sich in den jeweiligen Abschlussberichten der Teilprojekte wieder.



# 1 Was wissen wir und was wissen wir nicht über Mikroplastik?

## Mikroplastik – eine interdisziplinäre Aufgabenstellung

„Plastik“ stammt aus dem englischen Wort „Plastics“ für Kunststoffe. In der Literatur wird der Begriff „Plastik“ auch für Gummi, Elastomere, Textilfasern und technische Fasern verwendet. Es kann in folgende Größenklassen unterteilt werden (GESAMP, 2015; Imhof et al., 2012):

> 25 mm	Makroplastik
5 – 25 mm	Mesoplastik
1 – 5 mm	große Mikroplastikpartikel (LMPP)
< 1 mm	kleine Mikroplastikpartikel (SMPP)
< 1 µm	Nanoplastik

Das Thema Mikroplastik hat in den letzten Jahren große Aufmerksamkeit gewonnen. Hierbei wird in primäres und sekundäres Mikroplastik unterschieden. Während primäres Mikroplastik gezielt hergestellt und eingesetzt wird, beispielsweise in Peelings oder Reinigungsmitteln, entsteht sekundäres Mikroplastik aus größeren Plastikprodukten: Kunststoffmüll gelangt in die Umwelt (Jambeck et al., 2015) und fragmentiert dort zu Mikroplastik (Geyer et al., 2017), das in vielen Umweltkompartimenten nachweisbar ist (Duis et al., 2016, Horton et al., 2017). Weite Teile der Gesellschaft scheinen sich einig zu sein, dass Maßnahmen zur Reduzierung des Eintrags von Mikroplastik erforderlich sind. Beispiele hierfür können Substitutionen von Plastikprodukten, technische Lösungen zum Rückhalt der Partikel in verschiedenen Bereichen oder auch bewussterer Umgang mit Kunststoffprodukten sein.

Bei der Festlegung derartiger Maßnahmen sind vielfältige ökologische, technische, ökonomische und auch soziale Aspekte zu berücksichtigen, wenn die gewünschten Effekte zur Reduktion von Mikroplastik erzielt und unvermeidbare negative Auswirkungen in anderen Bereichen vermieden werden sollen. Offen ist auch die Frage, ob die Substitution synthetischer durch biobasierte bzw. bioabbaubare Polymere zu einem „Rebound-Effekt“, bedingt durch achloseren Umgang mit Plastikmaterialien durch Verbraucher/-innen, führen kann.

Dies erfordert eine ganzheitliche interdisziplinäre wissenschaftliche Betrachtung, an deren Anfang eine Bestandsaufnahme zum bereits vorhandenen Wissen aber auch zu bestehenden Informationsdefiziten stehen muss.

## Wirkung und Gefährdung durch Mikroplastik

Die überwiegende Zahl der bisherigen Studien zur Wirkung und Gefährdung durch Kunststoffe beschäftigt sich hauptsächlich mit ökotoxikologischen Auswirkungen von Makroplastik und mikroskopisch kleinen Plastikpartikeln (Burns et al., 2018). Dieser Fokus ist auch dem Umstand geschuldet, dass Studien zur Wirkung von Plastikpartikeln auf die Umwelt sowie zum Eintrag und Verbleib von Plastikmüll für die breite Öffentlichkeit wirksamer und greifbarer sind.

Eine nicht sichtbare Belastung, die ebenfalls von Kunststoffen ausgeht, stellt die chemische Gewässerverschmutzung über das Auslaugen von Chemikalien aus den Plastikkompositen

dar. Inwiefern plastikassoziierte Substanzen für die Umwelt oder den Menschen gefährlich sind, wurde noch nicht hinreichend untersucht. Eine ebenfalls noch offene Fragestellung ist die Bewertung der Schädlichkeit biobasierter und/oder bioabbaubarer und recycelter Kunststoffe (sog. Recyclate) im Vergleich zu konventionell hergestellten Materialien.

### **Abbaubarkeit/Degradation von Polymeren und Verhalten in der aquatischen Umwelt**

Das Abbauverhalten von Plastikrückständen unter umweltrelevanten Bedingungen ist derzeit weitgehend ungeklärt. Zur Wirkung von Mikroplastik in limnischen Systemen existiert aktuell nur wenig gesichertes Wissen. Negative Effekte für wasserlebende Organismen wurden vornehmlich für Makroplastik und im marinen Bereich beschrieben und beruhen vorrangig auf einer mechanischen Beeinflussung (z. B. Entanglement). Vergleichende Untersuchungen natürlicher, synthetischer und recycelter Plastikspezies fehlen vollständig. Ungeklärt ist zudem, ob potentielle ökotoxikologische Schadwirkungen eher auf die Partikeleigenschaften des Mikroplastiks oder auf auslaugende bzw. desorbierende Schadstoffe zurückzuführen sind.

Neben der zuvor beschriebenen Freisetzung von Substanzen aus Mikroplastik besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass derartige Partikel Stoffe aus dem umgebenden Medium adsorbieren. Derzeit sind das Sorptionsverhalten von Schadstoffen an Kunststoffpartikeln in Abwässern und eine mögliche Veränderung in den unterschiedlichen Reinigungsschritten in einer Kläranlage unbekannt. Auch jahreszeitliche Einflüsse im Anreicherungsprozess von Schadstoffen an Kunststoffpartikeln könnten eine Rolle spielen. Über die Affinität von Schadstoffen zu unterschiedlichen Kunststoffarten und -zuständen (fabrikneu, wiederverwertet, bewittert und unbewittert) in einer Kläranlage sind nur wenige Informationen vorhanden, da der Fokus bisheriger Untersuchungen vorwiegend auf marinen Ökosystemen lag.

### **Mikroplastik im urbanen Wasserkreislauf**

Zu den Haupteintragspfaden von Kunststoffpartikeln in das limnische System werden unter anderem Plastikverwehungen, Ableitungen aus der Siedlungswasserwirtschaft (Mischwasserentlastungen und Kläranlagenabläufe) und, bedingt durch die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlämmen und Gärresten, Einträge aus landwirtschaftlichen Abschwemmungen gezählt. Ungeklärt ist, welchen Anteil die einzelnen Emissionsquellen haben (Talvitie, 2018; Lassen et al., 2015).

In den letzten Jahren wurden vermehrt Studien zu Mikroplastik in limnischen Systemen durchgeführt, ebenso zum Rückhalt von Mikroplastik durch die Abwasserbehandlung. Die berichteten Rückhalteraten unterscheiden sich jedoch erheblich. Sie reichen von 40 - 99,9 %. Dabei wurden die unterschiedlichsten Verfahren für Probenahmen, Aufreinigung der Proben und Analysen angewandt. Somit lassen sich der Stellenwert der Aussage und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in Frage stellen. Es fehlt ein normiertes Verfahren für die Analyse, welches schon bei der repräsentativen Probenahme ansetzt (Schaum et al., 2020; Wick et al., 2020).



## **Datengrundlage und Analyse von Mikroplastik**

Eine ausreichende Datengrundlage, in welchen Proben/Umweltkompartimenten wieviel und welche Arten von Kunststoffen vorkommen, ist nicht vorhanden. Ebenfalls fehlt eine ausreichende Datengrundlage zur Identifizierung von Quellen und Senken von Plastikeinträgen. Die erforderliche Vergleichbarkeit der quantitativ arbeitenden Studien ist durch unterschiedliche Methoden in der Probenahme, Aufarbeitung und Analyse nur bedingt gegeben, da je nach Anforderung der Forschungsfrage oder Probenmatrix (z. B. Wasser, Klärschlamm, Boden) verschiedene Techniken und Gerätschaften (Lenz et al., 2018, Imhof et al., 2012) und Methoden (Löder et al., 2017, Enders et al., 2020) entwickelt wurden. Dies gilt insbesondere für Klärschlamm.

Zudem können Proben entweder partikel- oder massebasiert analysiert werden (Käppler et al., 2018). Für ein Monitoring ist die Entwicklung neuer Methoden nötig, um einen größeren Probendurchsatz in der Analyse zu ermöglichen.

### **Zwischenfazit**

Über die Wirkung und Gefährdung von Mikroplastik ist wenig bekannt.

Es gibt keine vergleichenden Untersuchungen zum Wirkverhalten natürlicher, synthetischer und recycelter Plastikspezies, ebenso zu Effekten durch Kunststoffadditive oder anhaftende Schadstoffe.

Um Plastikeinträge in limnische Systeme unter anderem aus dem Bereich der Siedlungswasserwirtschaft quantifizieren zu können, fehlen einheitliche Verfahren für Probenahme, Probenaufbereitung und Analyse der verschiedenen Matrices.



## 2 Von der Idee zum Projekt PLASTRAT

### Idee und Projektteam von PLASTRAT

Das Forschungsprojekt PLASTRAT - Lösungsstrategien zur Verminderung von Einträgen von urbanem Plastik in limnische Systeme wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt - Quellen, Senken, Lösungsansätze“ gefördert. Dieser Forschungsschwerpunkt war Teil der Leitinitiative Green Economy des BMBF-Rahmenprogramms „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (FONA<sup>3</sup>), Förderkennzeichen: 02WPL1446 A-J.

Gesamtziel des Projekts war die Entwicklung unterschiedlicher Lösungsstrategien aus den Bereichen Technik, Green Economy und sozial-ökologischer Forschung, die zur Minderung von Plastikeinträgen in das limnische Milieu urbaner Siedlungsräume beitragen. Zu Hilfe genommen wurde das Konzept der systemischen Risiken. Bewertungsparameter zur Kategorisierung umweltfreundlicher Kunststoffspezies wurden abgeleitet und definierte Maßnahmen zur Risikominimierung von Plastikrückständen in limnischen Systemen bewertet und charakterisiert, vgl. Abbildung 1.

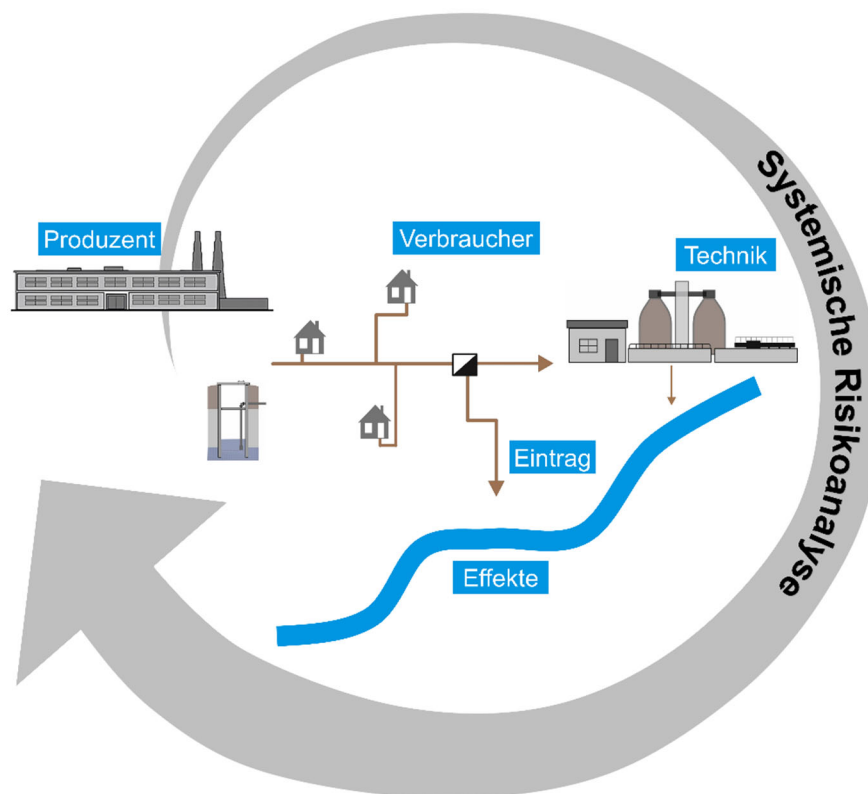


Abbildung 1: Projektidee von PLASTRAT: Systemische Risikoanalyse in einem ganzheitlichen Ansatz von Produzenten, Verbrauchern (Gesellschaft), Technik, Einträgen und Effekten

Bearbeitet wurde das Projekt in einem interdisziplinären Team, bestehend aus zehn Verbundpartnern aus Universitäten, Forschungsinstituten sowie Industrie:

Universität der Bundeswehr München, aquadrat ingenieure GmbH, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Goethe-Universität Frankfurt am Main, inge GmbH, ISOE - Institut für sozial-ökologische Forschung, IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, Leibniz-Institut für Ostseeforschung, Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. und Technische Universität Darmstadt.

Das Projektteam wurde ergänzt durch assoziierte Partner aus der Praxis: Autobahndirektion Südbayern, CARAT GmbH, DWA Landesverband Bayern, Entsorgungsbetriebe der Landeshauptstadt Wiesbaden, Gemeindliche Einrichtungen und Abwasser Holzkirchen, Kelheim Fibres GmbH, Münchner Stadtentwässerung, PlasticsEurope Deutschland e.V., Stadt Weißenburg in Bayern und Stadt Weiterstadt - Eigenbetrieb Stadtwerke sowie zwei Unterauftragnehmer (The Sustainable People GmbH, Technische Universität München - Analytische Chemie).

Begonnen hat das Projekt mit ersten Ideen im Jahr 2016, die in eine gemeinsame Antrags-skizze überführt wurden. Mit der Bewilligung des Projektantrags konnte im September 2017 das dreijährige Forschungsprojekt starten.

### **Gesellschaftlicher Umgang mit Plastikprodukten**

Umweltgefährdungen durch Mikroplastik werden in der Öffentlichkeit diskutiert. Aber wie verbreitet ist das Wissen über diese Umweltgefährdungen in der Bevölkerung wirklich? Und wie wird der Zusammenhang von durch Mikroplastik verursachten Umweltbelastungen mit den eigenen Konsumpraktiken bewertet?

Im Fokus der sozial-ökologischen Untersuchungen standen Konsum- und Entsorgungspraktiken von Verbraucher/-innen, durch die Mikroplastik in Gewässer eingetragen wird. Am Beispiel ausgewählter Produktgruppen aus den Bereichen Kosmetik, Hygiene, Textilien und Verpackung wurde mit Hilfe von Fokusgruppen und einer standardisierten Befragung ermittelt, wie diese Produkte genutzt und entsorgt werden und welches Problembewusstsein über die daraus resultierenden Umweltbelastungen besteht. Außerdem wurde untersucht, welche Akteure aus Sicht der Verbraucher/-innen für die Minderung dieser Umweltbelastungen verantwortlich sind, welche Bereitschaft zu einer Veränderung der eigenen Nutzungs- und Entsorgungspraktiken besteht und welche Rolle informatorische Instrumente, wie Gütesiegel oder Label, in diesem Zusammenhang spielen können.

### **Eintrag von Plastik in limnische Systeme: Von der Probenahme zur Technik**

Durch Ableitungen aus der Siedlungswasserwirtschaft wird Mikroplastik in limnische Systeme eingetragen. Ziel war die Identifizierung, Quantifizierung und Bewertung dieser Einträge. Da eine zwischen verschiedenen Forschungsgruppen vergleichbare Quantifizierung aufgrund fehlender Vereinheitlichung der verwendeten Verfahren nicht möglich ist, liegt ein Schwerpunkt der Forschung derzeit auf der Entwicklung von standardisierten Methoden zur Quantifizierung von Mikroplastik. Doch die Problematik beginnt schon früher: Bevor Mikroplastikpartikel analysiert werden können, müssen sie aus unterschiedlichen Umweltmatrizes gewonnen werden. Daher gilt es, standardisierte Verfahren für die Probenahme in den

verschiedenen Umweltmatrizes zu entwickeln, die jeweils geeigneten Aufbereitungsverfahren für die unterschiedlichen Proben zu etablieren und die separierten Partikel im Anschluss zu analysieren sowie die gewonnenen Daten zu verarbeiten.

Untersucht wurden die Eintragspfade Abwasser und Klärschlamm sowie Proben aus Mischwasserentlastungen nach Regenereignissen. Anhand der Untersuchungen wurde bestimmt, wie hoch die tägliche Mikroplastikfracht ist, welche in die Kläranlage gelangt und wie hoch der Partikelrückhalt und dementsprechend der Eintrag ins Gewässer ist. Als zusätzliche Maßnahme zur Verringerung des Eintrags von Mikroplastikpartikeln in Gewässer wurde eine Ultrafiltrationspilotanlage im Ablauf der Nachklärung betrieben und deren Rückhalt untersucht, ebenso wie der Rückhalt durch einen Tuchfilter im Ablauf der Nachklärung.

### **(Öko-)Toxikologische Effekte von Plastik**

Die Wirkung von plastikassoziierten Substanzen aus Plastikpellets, die unter Laborbedingungen bewittert wurden, wurde untersucht. Es handelte sich dabei um synthetisch erzeugte Rohmaterialien, die vor der eigentlichen Fertigung zu einem Kunststoffprodukt stehen. Das Ziel der Untersuchung war es zu testen, ob schädliche Chemikalien bereits aus solchen Materialien in das Umgebungswasser auslaugen.

Da Plastik in der Umwelt kontinuierlichen Degradationsprozessen durch UV-Strahlung und mechanischem Abrieb unterliegt, stellt sich die Frage, inwiefern solche Faktoren zum Auslaugen plastikassoziierten Chemikalien beitragen oder zur Bildung von toxikologisch relevanten Degradations- und Transformationsprodukten führen. Daher wurden Pellets von sechs unterschiedlichen Polymertypen (Polyethylenterephthalat (PET), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS), Polyethylen (PE), Polyvinylchlorid (PVC) sowie biobasierte und/oder bioabbaubare Kunststoffe) mit UV-Strahlung behandelt und die auslaugbaren Chemikalien in einer wässrigen Phase aufgefangen. Als Referenz diente eine Kontrollbehandlung ohne UV-Strahlung. Das Wasser mit den ausgelaugten Chemikalien wurde aufbereitet und mithilfe von suborganismischen Tests (Bakterien, Hefen und humanen Zelllinien) untersucht. Damit wurden unterschiedliche Wirkungen gemessen, wie zum Beispiel die Basistoxizität, oxidativer Stress, hormonelle (östrogene und anti-östrogene) Aktivitäten und gentoxisches Potential.

**Kurzsteckbrief PLASTRAT**

Lösungsstrategien zur Verminderung von Einträgen  
von urbanem Plastik in limnische Systeme

Laufzeit: 01.09.2017 – 31.08.2020 (28.02.2021)

Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Fördersumme: rd. 3 Mio. €

Homepage: [www.plastrat.de](http://www.plastrat.de)

Projektpartner: Universität der Bundeswehr München  
Goethe-Universität Frankfurt am Main  
ISOE - Institut für sozial-ökologische Forschung  
IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung  
gemeinnützige GmbH  
Bundesanstalt für Gewässerkunde  
aquadrat ingenieure GmbH  
Technische Universität Darmstadt  
inge GmbH  
Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.  
Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde

### 3 Eintrag in limnische Systeme: Von der Probenahme zur Technik

#### 3.1 Herausforderungen bei Ermittlung der Mikroplastikeinträge

In den urbanen Wasserkreislauf kann Mikroplastik unter anderem durch Ableitungen aus der Siedlungswasserwirtschaft gelangen. Beispielsweise werden Mikroplastikpartikel durch das Waschen von Kleidungsstücken aus synthetischen Fasern in das Abwasser eingeleitet, vgl. Abbildung 2. Durch unsachgemäße Entsorgung von Hygieneartikeln im Haushalt gelangen ebenfalls Kunststoffe in Kanalisation und Kläranlage. Eine der größten Eintragsquellen für Mikroplastik ist jedoch Abrieb von Reifen, welcher durch Abschwemmungen bei Regenereignissen in die Kanalisation gespült werden (Talvitie et al.; 2014, Bertling et al., 2018).

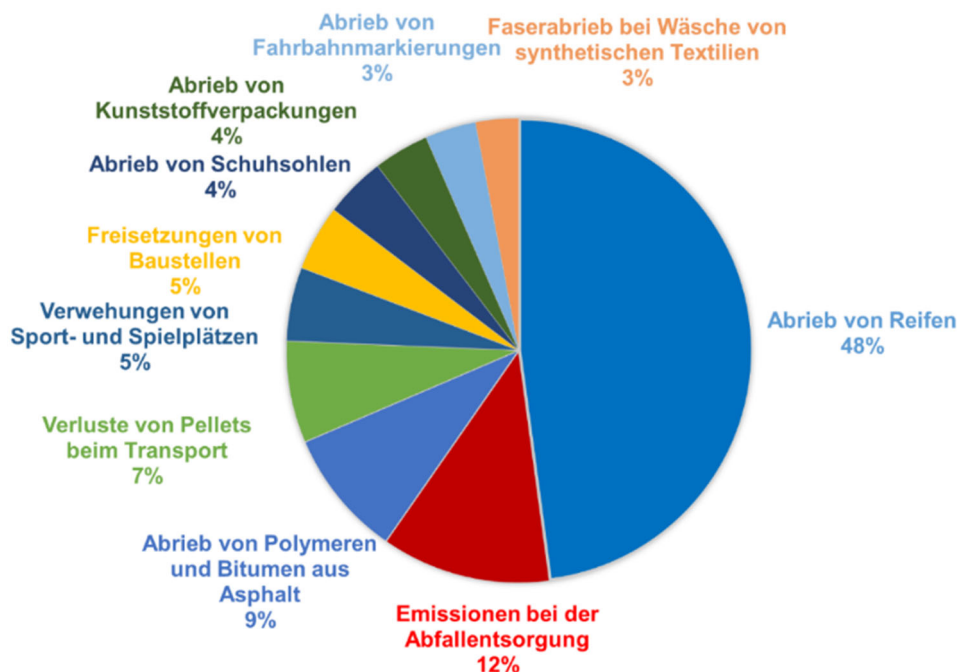


Abbildung 2: Herkunft der zehn häufigsten Mikroplastikemissionen in Deutschland (Daten: Bertling et al., 2018)

Über die Kanalisation erreicht Mikroplastik die Kläranlage. Wird es bei der Abwasserbehandlung unvollständig zurückgehalten, wird es in Oberflächengewässer emittiert. Vor allem bei Mischwasserkanalisationen, welche Schmutz- und Regenwasser gemeinsam in einem Kanal ableiten, kann es bei Regen zu Entlastungsereignissen kommen, was eine Ableitung von meist unbehandeltem Abwasser in das Gewässer bedeutet.

Um diese Einträge zu quantifizieren, wurden Kläranlagenzulauf, -ablauf, Mischwasserentlastungen sowie Klärschlamm beprobt. Mit Hilfe der Ergebnisse konnten der Rückhalt von Mikroplastik durch die Abwasserbehandlung sowie der Verbleib der Partikel im Klärschlamm bestimmt werden. Auch wurde ein zusätzlicher Rückhalt von Mikroplastikpartikeln im Ablauf der Kläranlage durch eine weitergehende Behandlung mittels Ultrafiltration und Tuchfilter analysiert.

Einzelne Untersuchungen in der Literatur zeigen, dass bis zu 99,9 % der im Zulauf zur Kläranlage enthaltenen Mikroplastikpartikel zurückgehalten werden können und sich im Klärschlamm anreichern (Bertling et al., 2018).

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die Variabilität der Ergebnisse einiger Studien zum Mikroplastikrückhalt durch Kläranlagen in den vergangenen Jahren. Hier wird deutlich, dass diese Daten einer großen Streuung unterliegen, sowohl hinsichtlich der Mikroplastikpartikelkonzentration im Abwasser als auch im Klärschlamm. Ursache hierfür sind die unterschiedlichen angewandten Verfahren für Probenahme, Aufbereitung und Analytik, sodass die Ergebnisse nur bedingt miteinander vergleichbar sind (Schaum et al., 2020; Wick et al., 2020).

Somit war die Entwicklung geeigneter Methoden für Probenahme bis zur Analyse von Mikroplastik aus Proben der Siedlungswasserwirtschaft ein wichtiges Ziel von PLASTRAT.

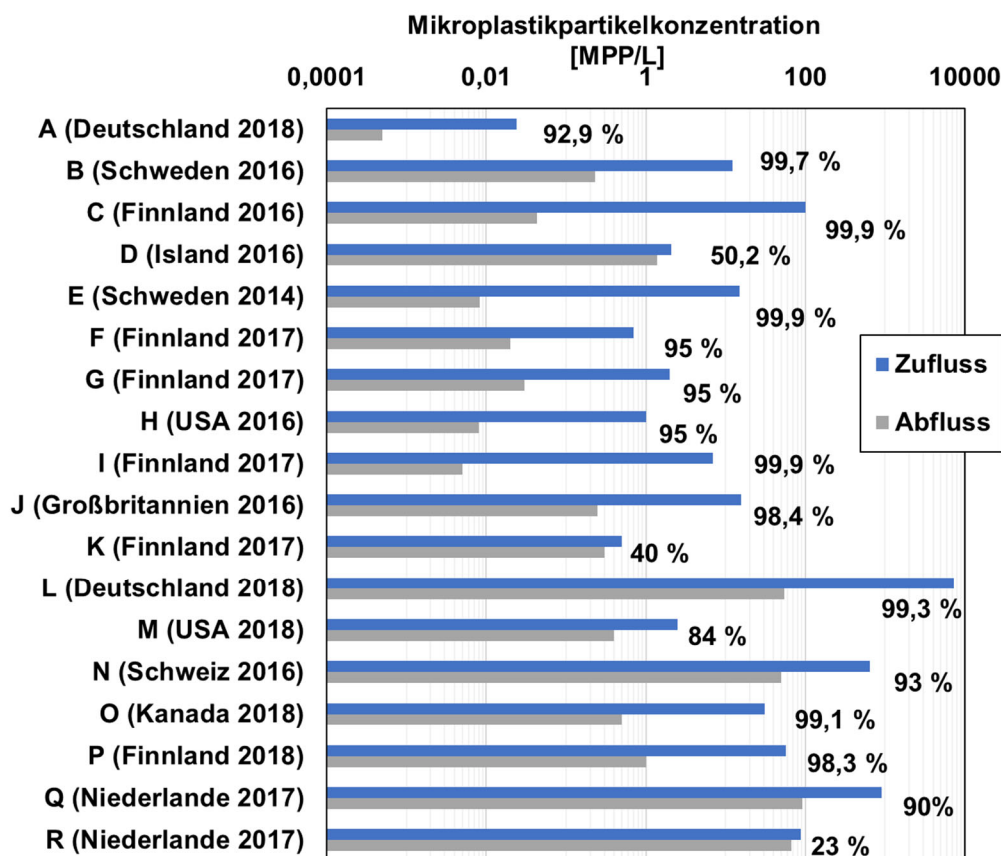


Abbildung 3: Ergebnisse internationaler Studien zur Mikroplastikkonzentration und zum Mikroplastikrückhalt in kommunalen Kläranlagen (verändert nach Hoos (2019), Abschlussbericht Universität der Bundeswehr München, 2021)



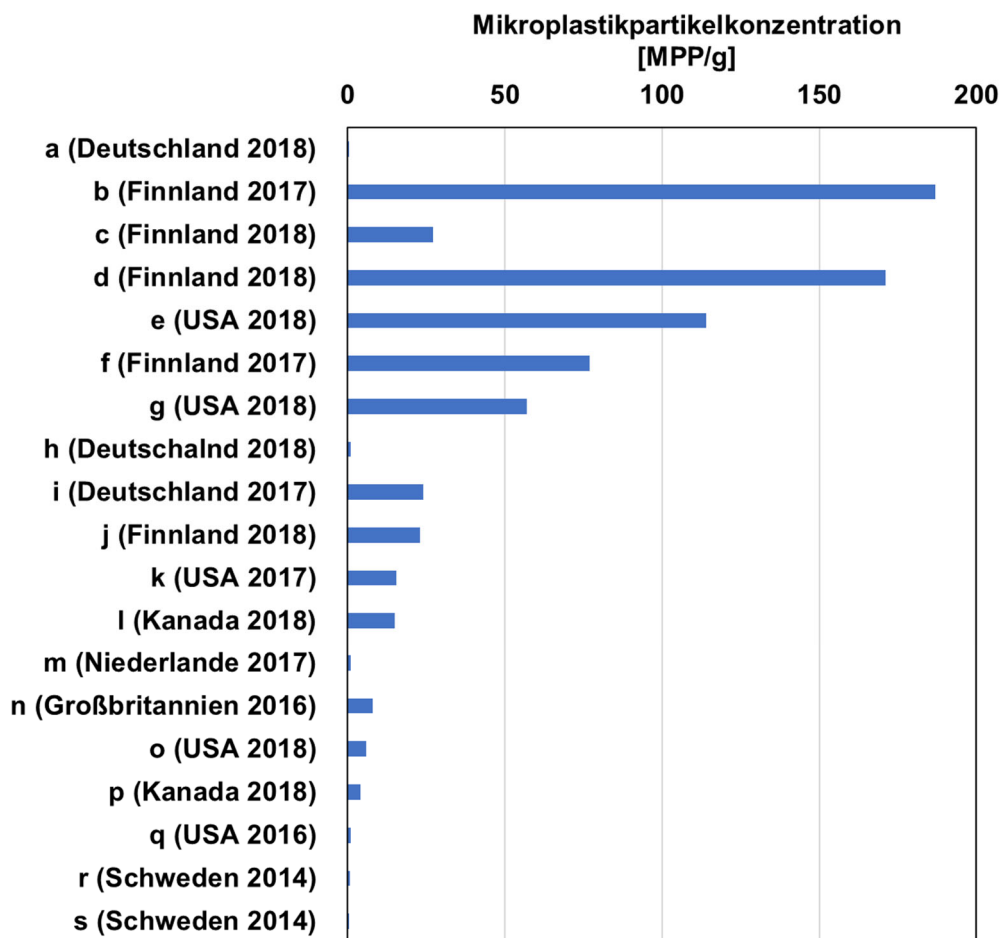


Abbildung 4: Ergebnisse internationaler Studien zur Mikroplastikkonzentration in Klärschlamm (verschiedene Schlämme, entwässert und nicht entwässert) (verändert nach Hoos (2019), Abschlussbericht Universität der Bundeswehr München, 2021)

### 3.2 Warum ist es schwierig eine belastbare Datenbasis zu generieren?

#### Herausforderung der Analytik und Lösungsansatz von PLASTRAT

Für die Extraktion von Mikroplastik aus Umweltproben wie Wasser (Frias et al., 2019), Sediment (Frias et al., 2018) oder Biota (Bessa et al., 2019) gibt es erste Handlungsempfehlungen. Als Identifizierungsmethoden haben sich Raman-Spektroskopie (Käppler et al., 2016, Imhof et al., 2016) und FTIR-Spektroskopie (Löder et al., 2015, Pimpke et al., 2017) für die Ermittlung von Partikelzahlen und -formen sowie Pyrolyse GC/-MS (Fischer & Scholz-Böttcher, 2017; Dierkes et al., 2019) oder TED-GC/MS (Dümichen et al., 2017) für die Ermittlung von Massen als geeignet erwiesen. Mit einer weitgehend automatisierten Kombination von optischer Partikelanalyse, FTIR- und Raman-Mikroskopie und spektraler Datenbanksuche können Partikelgrößen, Partikelgrößenverteilungen und die Art des Polymers, einschließlich Farbpartikel, ermittelt werden.

Die Zusammenführung und gemeinsame Interpretation von Befunden, die in den Umweltkompartimenten Abwasser, Oberflächengewässer, Boden und Meere erhoben wurden, ist angesichts der Methodenvielfalt aktuell kaum möglich. Eine Harmonisierung und Standardisierung von Aufarbeitung und Analyse steht bisher noch aus, wird aber allgemein angestrebt (Braun et al., 2018).

Bisherige Methoden zur Aufarbeitung von Mikroplastik sind (zeit-)aufwändig, sodass nur eine begrenzte Anzahl Proben in einem annehmbaren Zeitrahmen analysierbar ist. Besondere Herausforderungen stellen dabei die unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Kunststoffarten (Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyethylenterephthalat (PET), etc.) und die unterschiedlichen Morphologien (Partikel, Fasern, Folien, etc.) dar. Zudem erschweren die geringe Größe und der gegenüber Partikeln natürlichen Ursprungs oft verhältnismäßig geringe Anteil an Plastikpartikeln den Umgang mit Umweltproben. In allen Schritten, von der Probenahme über die Aufarbeitung bis zur Analyse, muss dies berücksichtigt werden. Hierbei sind besondere Maßnahmen und Prozeduren konsequent anzuwenden, um sicherzugehen, keine Partikel zu verlieren oder die Probe mit zusätzlichen Plastikpartikeln zu kontaminieren.

Die Aufarbeitungsmethoden werden darauf abgestimmt, ob sich eine partikelbasierte oder eine massebasierte Analysenmethode anschließt. Massebasierte Methoden haben den Vorteil, dass sie eine weniger aufwändige Probenaufarbeitung erfordern und schneller ein Ergebnis liefern. Allerdings ermöglichen sie keine Aussagen über die Eigenschaften der Partikel in der Probe (z. B. Anzahl pro Kunststoff, Farbe, Form), die für die Zuordnung der Herkunft und die Abschätzung der Toxizität notwendig sein können. Beide Methoden sind je nach Fragestellung für die Analyse auf Mikroplastik geeignet. Dass ihre Ergebnisse nicht direkt vergleichbar sind, erschwert jedoch die Interpretation unterschiedlicher Datensätze und Studien.

### **Von der Probenahme zur Analyse von Mikroplastik**

Im Folgenden werden das in PLASTRAT entwickelte Vorgehen von der Probenahme bis zur Analyse sowie die aufgetretenen Herausforderungen beschrieben (Wick et al., 2021.), vgl. Abbildung 5.

In PLASTRAT wurden Proben aus dem Zu- und Ablauf von Klärwerken, Mischwasserproben von Entlastungsereignissen sowie Klärschlämme (Primär-, Sekundär- und Faulschlamm) untersucht. Die Analyse erfolgte partikelbasiert mit einer Kombination aus optischer Partikeldetektion zur Erfassung der Partikeleigenschaften (Größe, Form, Farbe) und einem spektroskopischen Verfahren (Raman-Mikroskopie) zur Identifizierung der Kunststoffpartikel einschließlich der jeweiligen Kunststoffart.

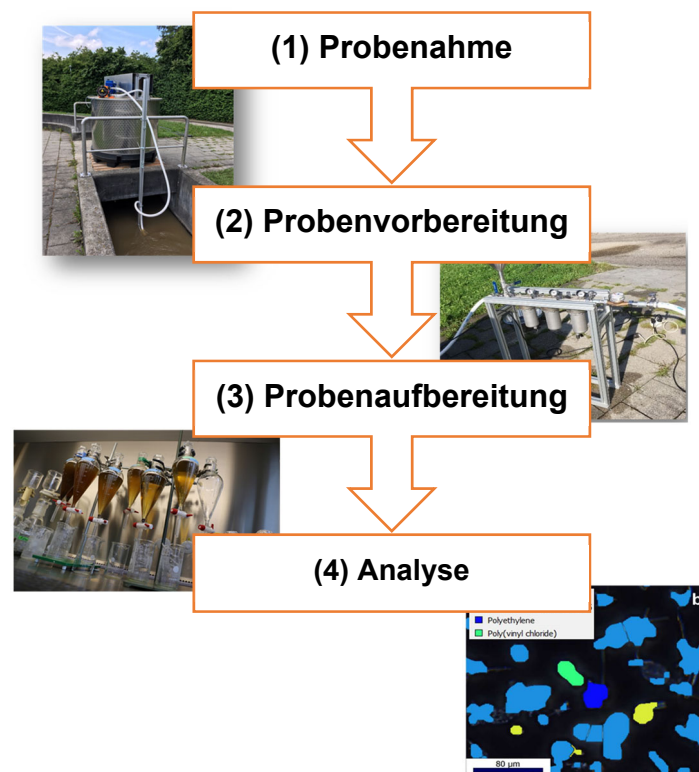


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Vorgehensweise von Probenahme bis Analyse der Mikroplastikkonzentration in Abwasser- und Klärschlammproben (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021)

### (1) Probenahme von Abwasser- und Klärschlammproben

Bereits bei der Probenahme darf kein Plastik mit der Probe in Berührung kommen. Vorrangegangene Untersuchungen zeigten, dass sich durch Reibung kleinste Partikel jeglicher Plastikteile ablösen können und so zu einer Kontamination der Probe führen. Soweit möglich, werden Probenahmeapparaturen und -gefäße aus Glas oder Edelstahl eingesetzt. Besonders in Dichtungen lassen sich bestimmte Plastikarten, wie z. B. Teflon, aber nicht vermeiden. Verwendete Plastikarten müssen dann in der Auswertung ausgeschlossen werden. Je geringer die Teilchengröße ist, die mit den Untersuchungen noch erfasst werden soll, umso wichtiger ist die Vermeidung von Kontaminationen.

#### 1a) Probenahmestellen

Abbildung 6 zeigt die untersuchten Probenahmestellen im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft. Untersucht wurden Abwasser (Zu- und Ablauf der Kläranlage), Mischwasserentlastung, Filtrat einer Ultrafiltrationsanlage und eines Tuchfilters als weitergehende Abwasserbehandlungen sowie die verschiedenen Klärschlämme (Primär-, Sekundär- und Faulschlamm).

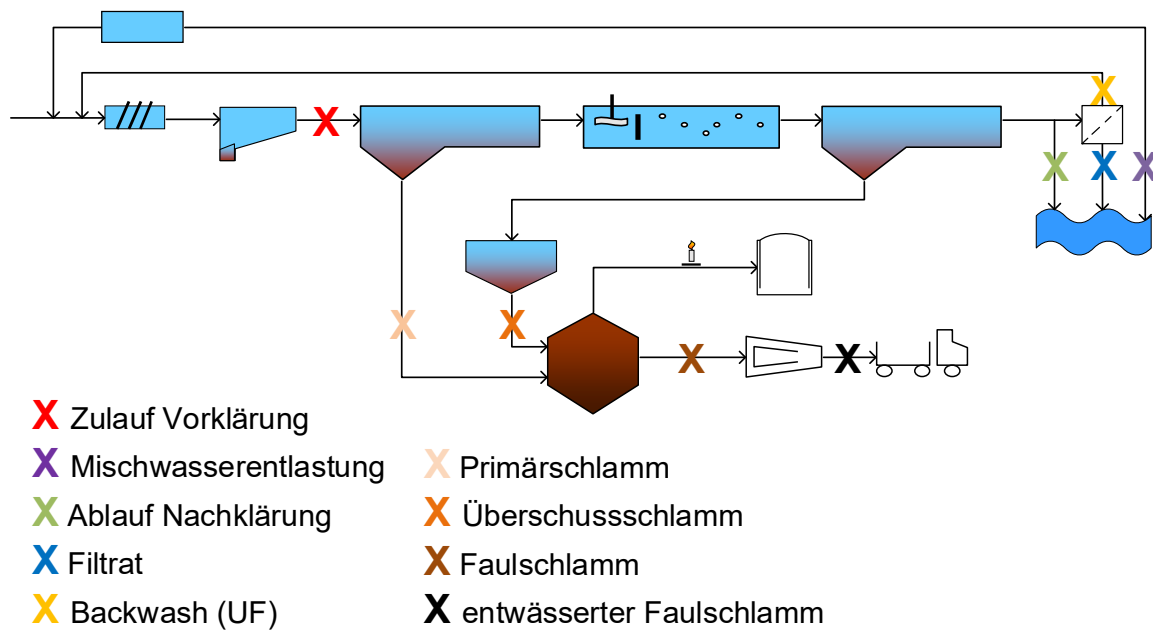


Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Abwasserbehandlungsanlage inklusive Kennzeichnung der verwendeten Probenahmestellen zur Ermittlung der Mikroplastikkonzentration im Abwasser (Backwash (UF) = Rückspülwasser der Ultrafiltrationsanlage) (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021)

### 1b) Art der Probenahme

Aufgrund der sich ändernden Abwasserzusammensetzung und -menge wurden die Probenahmen im Kläranlagenzu- und -ablauf als 24-Stunden-Mischproben durchgeführt. Die Probenentnahme erfolgte kontinuierlich in einen Edelstahl-Tank mit Rührer.

Bei Mischwasserentlastungsereignissen erfolgte die Probenahme volumenproportional zur Abschlagsmenge.

Im Gegensatz zur Probenahme von Abwasser ist für die Beprobung von Klärschlämmen nach DIN EN ISO 5667-13 (2011) eine Standardmethode zur Probenahme von Schlämmen vorhanden. Die Entnahme von Stichproben ist hier meist ausreichend, jedoch ist zu beachten, dass sich die Schlammbeschaffenheit durch Änderung der hydraulischen Bedingungen (Abpumpen, Absaugen) unterscheiden kann. Dies kann auch Einfluss auf die Partikelkonzentration haben.

### 1c) Probenahmenvolumen

Um statistisch relevante Mikroplastik-Mengen auswerten zu können, muss auf ein ausreichendes Probenvolumen geachtet werden. Generell gilt, je weniger Mikroplastik erwartet wird, desto größer müssen Probenvolumen oder Probenmasse sein. Je nach erwarteter Partikelkonzentration müssen wenige Liter (Zulauf zur Kläranlage, Mischwasserentlastung) bis hin zu mehreren Kubikmetern (Ablauf der Kläranlage) untersucht werden (Braun et al., 2018).

In PLASTRAT wurden bis zu 4.000 L am Ablauf der Kläranlage beprobt. Im Zulauf der Kläranlage wurden mehr Partikel erwartet, sodass die Untersuchung von 30 L ausreichte. Bei den verschiedenen Klärschlämmen enthielten Proben von etwa 50 g Nassgewicht bereits genügend Kunststoffpartikel.

#### **1d) Begleitparameter**

Zur Charakterisierung der Probe wurde zusätzlich bei jeder Probenahme eine Begleitanalytik der wichtigsten Abwasserparameter durchgeführt. Untersucht wurden unter anderem Abfiltrierbare Stoffe (AFS) (vgl. Broß et al., 2020), der Chemische Sauerstoffbedarf (CSB), die Trübung und der Phosphorgehalt ( $P_{ges}$ ). Für Klärschlämme wurden Trockenrückstand (TR) und CSB gemessen.

#### **1e) Systemblindwert**

Um eine mögliche Kontamination der Proben durch das Probenahmesystem oder Handling vor Ort beurteilen zu können, wurde ein sogenannter Systemblindwert ermittelt. Hierbei wurde die Probenahme inkl. sämtlicher Schritte mit vorfiltriertem Leitungswasser (5  $\mu$ m Filterporendurchmesser) durchgeführt. Der Blindwert für Klärschlämme wurde ermittelt, indem die jeweilige Menge an Chemikalien zur Behandlung einer Probe wie eine gewöhnliche Probe behandelt und analysiert wurde.

### **(2) Probenvorbereitung**

#### **2a) Konzentrierung von wässrigen Proben mittels Filtersystem**

Im Anschluss an die Probenahme von Abwasserproben mussten die in der Probe enthaltenen Mikroplastikpartikel für die Analyse aufkonzentriert werden. Um das erforderliche Probenvolumen im Kläranlagenzulauf zu erreichen, wurde die Aufkonzentrierung mittels Filterkaskade umgesetzt (Porenweiten: 500, 100, 50  $\mu$ m). Im Ablauf der Kläranlage sind deutlich weniger und vergleichsweise kleinere Partikel enthalten. Aufgrund des zunehmenden Druckverlusts im Verlauf der Filtration durch Verblocken der Filterkerzen hat sich eine Parallelschaltung von zwei Filterkerzen mit einer Porenweite von 50  $\mu$ m bewährt, um das benötigte Probenvolumen filtrieren zu können (vgl. Abbildung 7). Saugseitig wurde eine Kreiselpumpe an das System angeschlossen, um eine Kontamination durch die Pumpe zu vermeiden.



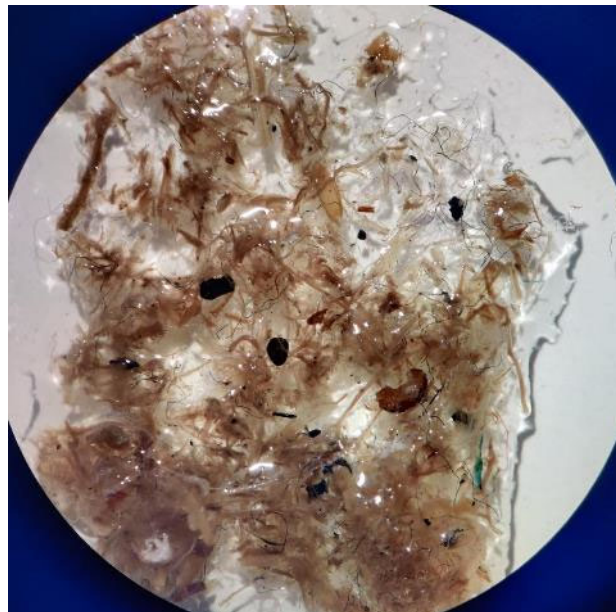


Bei der Aufbereitung von Klärschlämmen erfolgte im Rahmen der Untersuchungen von PLASTRAT die Reduzierung der organischen Substanz durch die Fenton-Reaktion (vgl. Mundani et al., 2018). Die Fenton-Reaktion ist ein chemisches Verfahren, das durch die katalytische Wirkung des gelösten Eisens und die Zugabe von Wasserstoffperoxid Hydroxylradikale bildet, die eine hohe oxidative Wirkung besitzen, um sehr schnell und effektiv die organischen Verbindungen zu oxidieren.

Zur Beurteilung, ob mit der Fenton-Reaktion gleichzeitig die erforderliche Hygienisierung erreicht werden kann, erfolgten entsprechende Analysen. Analog zur EU-Verordnung Nr. 142/2011 wurden Enterokokken und fäkalcoliforme Bakterien als bakteriologische Indikatororganismen zur Risikoabschätzung der Klärschlammproben herangezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Erreger durch die Fenton-Reaktion weitgehend inaktiviert werden können. Die Werte lagen ausnahmslos unter dem Detektionslimit von 3 KBE/ g Klärschlamm.

### (3) Probenaufbereitung: Reinigung der Mikroplastikpartikel

Bevor eine Probe spektroskopisch untersucht werden kann, muss das Plastik möglichst schonend von den natürlichen Substanzen getrennt werden. Je gründlicher die Aufreinigung gelingt, desto weniger natürliche Partikel verbleiben auf dem Filter und stören dort die spektroskopische Analyse.



*Abbildung 8: Große Mikroplastikfraktion (> 500 µm) umgeben von überwiegend organischer Matrix. Foto: A. Tagg/IOW (Abschlussbericht des Leibniz-Instituts für Ostseeforschung Warnemünde, 2021)*

Die natürlichen Partikel lassen sich in organische Materialien und anorganische Materialien einteilen. Im Projekt PLASTRAT wurde die Entfernung der Anorganik über eine Dichtentrennung mit Zugabe von Natriumpolywolframatlösung durchgeführt. Eingestellt auf eine Dichte von  $1,8 \text{ g/cm}^3$  sinken die schweren Sedimente in dieser Lösung ab, während das Plastik (der überwiegende Teil der synthetischen Polymere hat eine Dichte  $< 1,8 \text{ g/cm}^3$ ) und die

leichten organischen Verbindungen im Scheidetrichter aufschwimmen. Anschließend wird die Organik und Plastik enthaltende Fraktion mit verschiedenen Chemikalien über mehrere Tage behandelt, um den Großteil der Organik aufzulösen. Dieser Prozess kann bei feinkörnigen, partikelreichen Proben bis zu zwei Wochen dauern.

Um Kontaminationen auszuschließen, erfordern Mikroplastik-Untersuchungen auch nach der Probenahme einen weitgehend plastikfreien Umgang. In PLASTRAT lagen die unteren Bestimmungsgrenzen bei 10 µm bzw. 50 µm. In dieser Größenordnung ist keine optische Überwachung von Kontaminationen mehr möglich. Kunststoffe sind in unserem Alltag, aber eben auch im Labor, allgegenwärtig und können über die Luft transportiert werden (Chen et al., 2020). Die Vermeidung von Kontamination nimmt daher viel Zeit und Aufwand in Anspruch, weshalb Proben nicht mit hohem Durchsatz bearbeitet werden können. Das Vermeiden von Plastikbehältnissen und Ersetzen durch Alternativen wie Glas oder Metall ist aufwändig, kostspielig und störanfällig (Glasbruch). Alle Chemikalien, die oft nur in Kunststoffgebinden bezogen werden können, müssen vor der Nutzung in mikroplastikfreie Gefäße filtriert werden. Arbeiten an der offenen Probe werden nur in partikelarmer Umgebung (Laminar-Flowbox mit Luftfilter) durchgeführt. Zur Überwachung der Kontamination sind regelmäßige Blindproben für alle Schritte nötig.

Die hydrophobe Oberfläche von Kunststoffen kann zu einer Anhaftung der Mikroplastikpartikel an Laborbehältnissen und damit wiederum zu einem Verlust von Mikroplastikpartikeln führen. Die Gefäße mit den Mikroplastik-Proben werden daher mit mikroplastikfreiem Wasser ausgiebig unter Verwendung milder Seifenlösungen gespült.

Eine Möglichkeit, den Verlust von Mikroplastikpartikeln zu überwachen, ist die Zugabe interner Standardpartikel in die Probe. Wiederfindungsraten geben Auskunft über mögliche Verluste bei der Aufreinigung. Hierbei ist zu beachten, dass die zugegebenen Partikel zwar aus Plastik bestehen aber meist neuwertig, nicht bewachsen oder verwittert sind. Somit unterscheiden sich die Oberflächen von sich in der Umwelt befindenden Partikeln und weisen ggf. ein anderes Verhalten auf. Die Standardpartikel dürfen ihrerseits keine Kontamination einbringen und repräsentieren nur einen kleinen Teil der Mikroplastikpartikel in der Umweltprobe (in Typ, Größe, Form).

Die tatsächliche Anzahl an Mikroplastik kann durch das Zerfallen einzelner Partikel erhöht werden, da aus einem Partikel zwei oder mehrere werden. Zerfall führt aber auch zu niedrigeren, detektierten Anzahlen, wenn die kleineren Fragmente durch die untere Grenze der Maschenweite eines Siebes fallen und damit verloren gehen oder vom spektroskopischen Detektionsverfahren nicht mehr erfasst werden. Der Verlust von Mikroplastik in einer Probe spielt besonders bei der Abtrennung der Organik vom Plastik eine Rolle. Die Lösungen für die Aufreinigung müssen aggressiv genug sein, um Organik zu entfernen, dürfen dabei aber nicht das Plastik selbst angreifen (Lenz et al., 2021).

Nach erfolgreicher Aufarbeitung befinden sich oft immer noch tausende Partikel in der Probe. Diese müssen über spektroskopische Verfahren analysiert werden, um sie als Plastik identifizieren zu können und dann Aussagen über die Partikelform, Farbe und Größe zu erhalten.



#### **(4) Analyse von Mikroplastik**

Die partikelbasierte Analyse der aufbereiteten Klärschlamm- oder Wasserproben zielt darauf ab, die Eigenschaften jedes Partikels oder einer statistisch aussagekräftigen Anzahl zu erfassen. Eine Probe enthielt oftmals mehr als 100.000 Partikel, wobei der Mikroplastikanteil trotz Aufarbeitung häufig unter 1 % lag. Um ein statistisch aussagekräftiges Resultat zu erzeugen, mussten daher alle Partikel zeitaufwändig vermessen und spektroskopisch analysiert werden.

Um diese hohe Partikelzahl überhaupt untersuchen zu können, musste die Analyse weitgehend automatisiert werden. Da es dafür zu Projektbeginn keine geeignete kommerzielle Lösung gab, wurde eigens eine Software entwickelt. Die Software GEPARD (Brandt et al., 2020) (Gepard-Enabled PARTicle Detection, open source verfügbar unter: <https://gitlab.ipfdd.de/GEPARD/gepard>) verknüpft alle Schritte von der Bildaufnahme mit einem optischen Mikroskop (Abbildung 9a), der vollautomatischen Partikelerkennung über das Steuern der spektroskopischen Messung bis zur Identifizierung der Partikel anhand der Messdaten sowie der Ausgabe der gesammelten Analysedaten (Abbildung 9b,c) und gewährleistet so einen hohen Grad an Automatisierung. Die Partikelerkennung beispielsweise ersetzte das zuvor praktizierte manuelle Auswählen der zu messenden Partikel. Hier musste bislang etwa eine Stunde investiert werden, um 1.000 Partikel auszuwählen. Von 100.000 Partikeln hätte auf diese Weise nur ein Bruchteil mit einem vertretbaren Zeitaufwand bearbeitet werden können. Im Anschluss ermöglicht GEPARD das Messen von bis zu 1.000 Partikeln pro Stunde ohne menschliches Eingreifen. Für 100.000 Partikel sind so jedoch noch immer um die 100 Stunden reine Messzeit nötig, zu der sich die Zeit für die Datenanalyse addiert. Auch dafür konnte mit GEPARD ein höherer Automatisierungsgrad erreicht werden. Manuelle Nacharbeit blieb aber notwendig, da kein Auswertungsalgorithmus die Kunststoffe anhand der Spektren ausreichend korrekt erkannte. Eine weitere Schwierigkeit resultiert aus sich überlagernden Partikeln in den optischen Bildern. Während die Partikelerkennung die Partikel gut vor dem Hintergrund erkennt, trennt sie diese Partikel nicht immer richtig voneinander ab. Auch Fasern werden zerteilt. Diese Fehler zu korrigieren, ist ein weiterer Teil der manuellen Nacharbeit. Diese weiter zu reduzieren ist nach wie vor Gegenstand der Forschung.

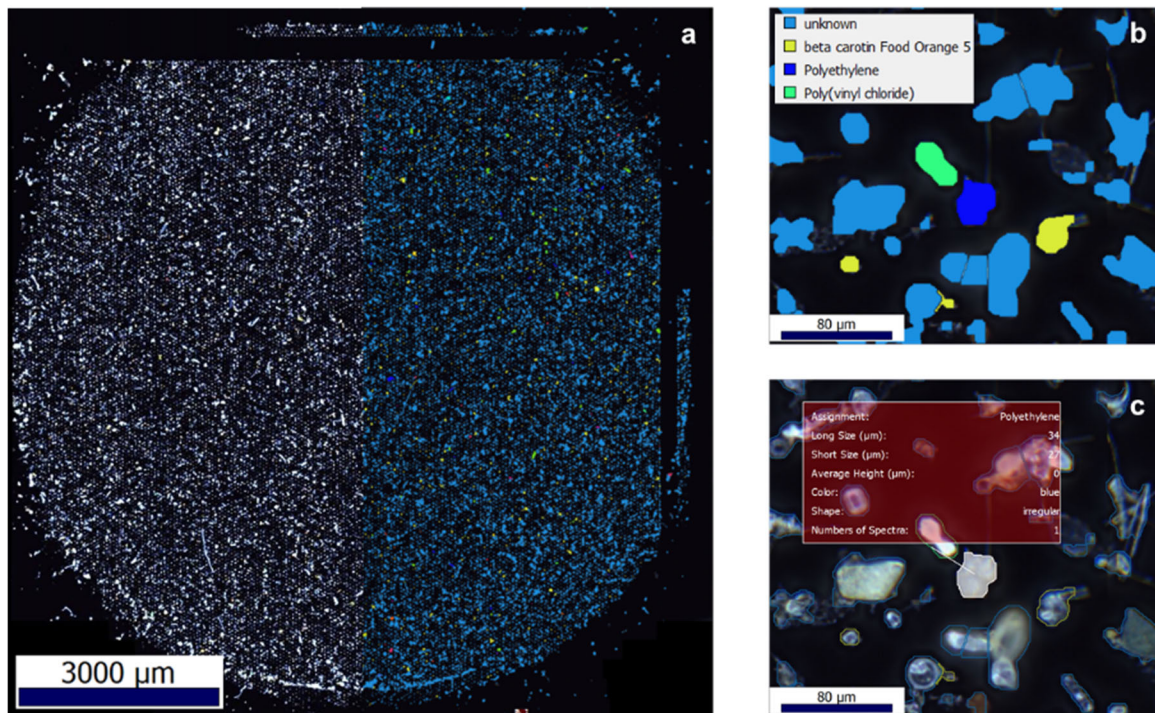


Abbildung 9: GEPARD-basierte Analyse einer Probe. a) Partikel einer Umweltprobe, abgeschieden auf dem Silizium-Messsubstrat (Partikel weiß, Hintergrund schwarz). Die rechte Bildhälfte zeigt ein Falschfarbenbild, in dem jeder Partikel entsprechend des Materialtyps durch GEPARD eingefärbt ist. b, c) Ausschnitte aus dem Übersichtsbild, b) Falschfarbendarstellung: jeder Partikel ist entsprechend des Materialtyps eingefärbt, c) Optisches Bild. Das Markieren eines einzelnen Partikels öffnet ein Label mit allen Partikeleigenschaften (rote Box). (Abschlussbericht des Leibniz-Instituts für Polymerforschung Dresden e.V., 2021)

### 3.3 Mikroplastik in der Siedlungswasserwirtschaft: Analysenergebnisse und Technologieansätze aus PLASTRAT

#### Mikroplastik-Rückhalt in Kläranlagen

Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der Beprobung einer kommunalen Kläranlage mit einer Ausbaugröße von 50.000 Einwohnerwerten (EW) sowie einer Mischwasserentlastung auf einer kommunalen Kläranlage mit einer Ausbaugröße von 40.000 EW.

Die am häufigsten erfassten Polymerarten waren in allen untersuchten Proben PET, PE und PP. Die ermittelten Partikelzahlen liegen in ähnlichen Größenordnungen wie in anderen Mikroplastik-Studien (vgl. Bertling et al., 2018).

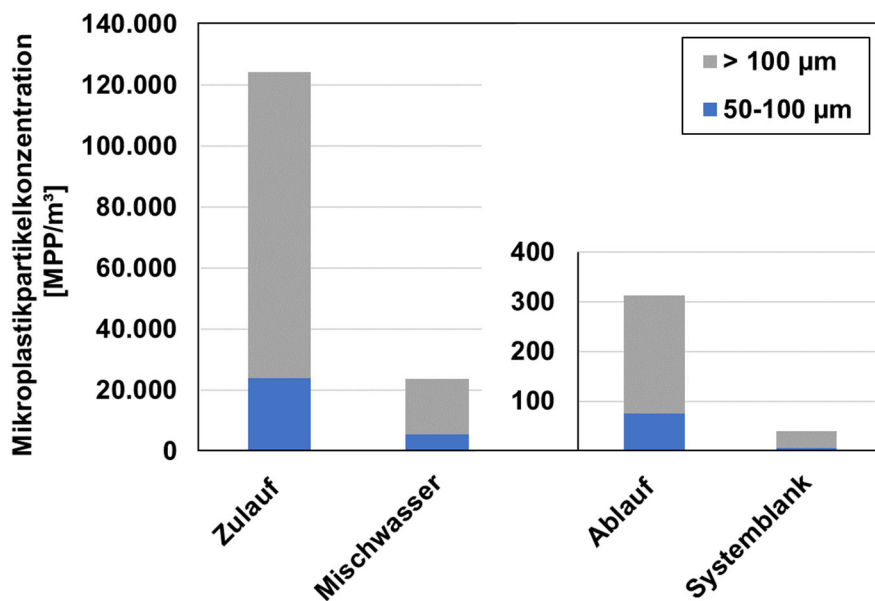


Abbildung 10: Ergebnisse der Mikroplastikanalysen im Bereich Abwasser und Mischwasser inklusive eines Systemblindwertes, welcher den Einfluss des Probenahmeequipments und Handlings vor Ort repräsentiert, Mittelwert aus zwei Probenahmen (Mischwasserentlastung), bzw. drei Probenahmen (Kläranlagenzu- und -ablauf) (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021)

### Mikroplastik im Kläranlagenzu- und -ablauf

Die Ergebnisse zeigen, dass im Zulauf der Vorklärung der kommunalen Kläranlage insgesamt zwischen 70.000 und 180.000 Mikroplastikpartikel pro Kubikmeter Abwasser (MPP/m<sup>3</sup>) nachweisbar sind, vgl. Abbildung 10. Im Kläranlagenablauf waren noch zwischen 100 und 500 MPP/m<sup>3</sup> messbar. Dies entspricht einem Mikroplastikrückhalt von > 99 %.

Der Systemblindwert lag bei 40 MPP/m<sup>3</sup>. Dieser Blindwert repräsentiert den Einfluss des Probenahmeequipments (Probenahmesystem und Filtrationseinheit) sowie des Vor-Ort-Handlings.

Zur Charakterisierung der Abwasserproben wurden klassische Abwasserparameter wie AFS, CSB,  $P_{ges}$  und die Trübung analysiert. Abbildung 11 zeigt den Zusammenhang zwischen Mikroplastikkonzentration in der Probe und den Parametern AFS und CSB. Sowohl bei der Betrachtung der AFS und Mikroplastikkonzentration als auch beim CSB ist jeweils eine Korrelation erkennbar. Je höher die AFS- oder CSB-Konzentration in der Probe war, desto höher war auch die zu erwartende Mikroplastikkonzentration.

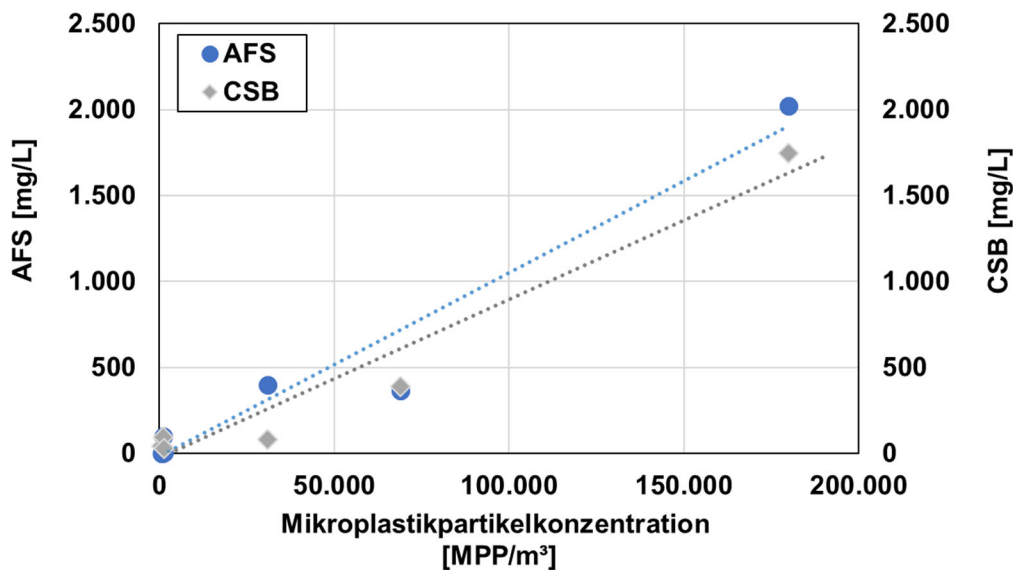


Abbildung 11: Zusammenhang von Mikroplastikkonzentration in verschiedenen Abwässern (Zu- und Ablauf zur Kläranlage und Mischwasser) und „klassischer“ Abwasserparameter, hier: Abfiltrierbare Stoffe (AFS) und Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021)

### Mikroplastikemission bei einem Mischwasserentlastungsereignis

Im Rahmen eines Abschlagsereignisses eines Entlastungsbauwerks waren zwischen 9.000 und 40.000 Mikroplastikpartikel pro Kubikmeter im Mischwasser messbar. Dies entspricht der Konzentration an Mikroplastikpartikeln, welche aufgrund von erhöhter Zulaufwassermenge, beispielsweise bei Starkregen, durch ein Abschlagereignis unbehandelt in Oberflächengewässer gelangen.

Mutmaßlich machen Reifenpartikel einen Großteil der Partikel aus, welche durch Straßenabläufe in die Kanalisation gelangen. Sie können jedoch aufgrund ihres großen Kohlenstoffgehalts nicht bzw. kaum mittels spektroskopischer Methoden erfasst werden. Die Analysen in PLASTRAT wurden jedoch mit Raman-Mikroskopie durchgeführt, um Polymerarten und Partikelgrößenverteilung genauer untersuchen zu können.

### Mikroplastik in Klärschlamm

Im Primärschlamm wurden insgesamt ca. 60 Mikroplastikpartikel pro g Trockenrückstand (MPP/g TR) nachgewiesen. Im Sekundärschlamm, der dem Überschussschlamm im Belebungsbecken entspricht, wurden nur etwa 30 Mikroplastikpartikel nachgewiesen. Im Faulschlamm wurden etwa 400 MPP/g TR gemessen.

Der Faulschlamm stellt in der Kläranlage die Senke für die Mikroplastikpartikel dar. Die im Klärprozess zurückgehaltenen Partikel akkumulieren im Faulschlamm. Sofern dieser entsprechend entsorgt wird, werden über 99 % der in die untersuchte Kläranlage

eingetragenen Partikel aus dem System entfernt und gelangen nicht in limnische Systeme bzw. die Umwelt.

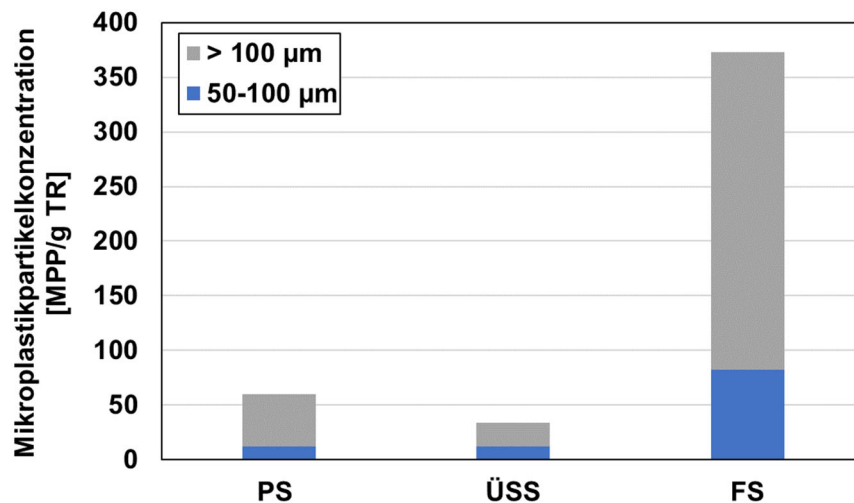


Abbildung 12: Ergebnisse der Mikroplastik-Analysen in den unterschiedlichen Klärschlammern einer kommunalen Kläranlage (50.000 EW, PS = Primärschlamm, ÜSS = Überschussschlamm, FS = Faulschlamm) (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021)

In Deutschland werden zzt. noch 16 % des produzierten Klärschlammes landwirtschaftlich verwertet (DESTATIS, 2020). Dadurch kann auch das im Klärschlamm angereicherte Mikroplastik in die Umwelt gelangen. Die Düngemittelverordnung (DüMV 2019) wirkt dem dadurch entgegen, dass Düngemittel – dazu gehören unter anderem Klärschlamm, aber auch Kompost – weniger als 0,4 Gew.-% harte und 0,1 Gew.-% verformbare Plastikpartikel > 1 mm enthalten dürfen.

Im Rahmen von PLASTRAT wurden sechs Kläranlagen hinsichtlich ihrer Mikroplastikkonzentration (1 - 5 mm) im entwässertem Klärschlamm untersucht (Schwinghammer et al., 2020). Die Mikroplastikpartikelanzahl lag zwischen 0 und 326 Mikroplastikpartikel pro kg TR. Dies ist vergleichbar mit Befunden aus der Untersuchung von Kompost (Weithmann et al., 2018). Alle Proben konnten auch die Anforderungen der Düngemittelverordnung einhalten.

## Tuchfilter als weitergehender Partikelrückhalt

Um einen erhöhten Partikelrückhalt im Ablauf der Nachklärung zu erzielen, besteht die Möglichkeit, einen Tuchfilter einzusetzen. In PLASTRAT wurde eine Probenahme an einer solchen Pilotanlage im Kläranlagenablauf durchgeführt und der Mikroplastikrückhalt durch diesen Tuchfilter ermittelt (vgl. Abbildung 13).

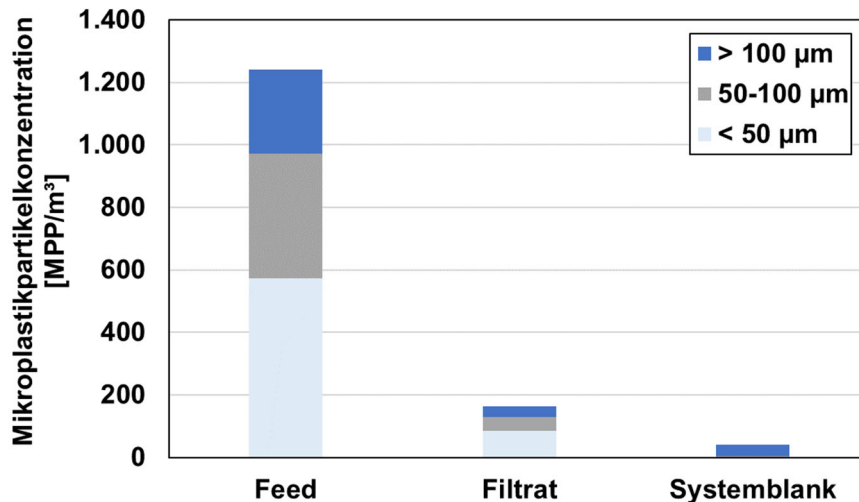


Abbildung 13: Ergebnisse der Mikroplastik-Analysen im Zu- und Ablauf eines Tuchfilters als weiterführende Abwasseraufbereitung im Ablauf der Kläranlage, Feed entspricht Ablauf der Nachklärung (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021)

Im Ablauf der Kläranlage (entspricht Zulauf zum Tuchfilter/Feed) wurden im Größenbereich zwischen 10 und 500 µm insgesamt 1.240 MPP/m<sup>3</sup> gemessen. Im Filtrat waren es noch 163 MPP/m<sup>3</sup>. Somit beträgt die zusätzliche Mikroplastikreduktion durch den Tuchfilter 87 %.

## Leistungsfähigkeit und Mehrfachnutzen einer Ultrafiltrationsanlage

### Ultrafiltrationstechnologie

Membranverfahren wie die Ultrafiltration sind physikalische Trennverfahren, die in Abhängigkeit ihrer nominalen Porengröße eine absolute Barriere gegenüber Partikeln darstellen. Die in PLASTRAT eingesetzten Ultrafiltrationsmembranen der Inge GmbH haben eine Porengröße von 20 nm, womit 99,99 % an Viren (bezogen auf sphärische MS2 Phagen mit ca. 20 nm Durchmesser) und 99,9999 % der Bakterien zurückgehalten werden können. Zusätzlich können Protozoen und deren Sporen die Membran nicht passieren.

Die Ultrafiltration bietet somit einen weitergehenden Mehrfachnutzen nicht nur durch den wie oben beschrieben Rückhalt von Pathogenen, sondern zusätzlich durch die Reduzierung von Nährstoffen und den Rückhalt von Partikeln, wie zum Beispiel Kunststoff. Neben einer höheren Qualität des Kläranlagenablaufs zur Einleitung in Oberflächengewässer könnte das Abwasser insbesondere in Regionen, welche von Trockenperioden geplagt sind, zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen gemäß der EU Richtlinie (EU 2020/741) zu



Mindestanforderungen an die Wasserqualität für die landwirtschaftliche Bewässerung genutzt werden, ohne dabei Mikroplastik und mikrobiologisch relevante Einzeller und Keime in der Umwelt zu verbreiten. Im Rahmen eines Risikomanagements ist dabei jedoch zu prüfen, welche weiteren Maßnahmen zum Rückhalt gelöster Wasserinhaltsstoffe erforderlich sind.

Bei der Aufbereitung von Kläranlagenablauf mittels Ultrafiltration wird dieser auf Grund der organischen (Rest-)Frachten eine Dosierung von Flockungsmittel vorgeschaltet, um Membranfouling zu vermeiden und so einen stabilen Betrieb zu gewährleisten. Als positiver Nebeneffekt kann der Eintrag von Phosphaten in die Gewässer reduziert werden. Allerdings stellen Flockungsmittel einen Haupttreiber für die jährlichen Betriebskosten einer Ultrafiltrationsanlage dar. In Versuchen wurde der Flockungsmittelleinsatz durch veränderte Dosierintervalle optimiert. Klassischerweise wird der Flockungsmittelleinsatz auf die anspruchsvollste Wasserqualität ausgelegt. Als Alternative wurde in den Versuchen eine Intervalldosierung erprobt, wobei die ursprüngliche Konzentration für eine kürzere Zeit dosiert wurde. Entscheidend ist jedoch, dass die Betriebsstabilität der Membran nicht gefährdet ist. Am Foulingverhalten der Membran, in anderen Worten der Reversibilität der zurückgehaltenen Stoffe durch einen physikalischen Reinigungsschritt, lässt sich die Betriebsstabilität erkennen. Mit Hilfe des Hydraulically Irreversible Fouling Index (HIFI) kann die Zunahme des hydraulisch nicht reversiblen Foulings bewertet werden. Bei Werten des HIFI  $< 0,1 \text{ m}^2/\text{L}$  kann der Betrieb als stabil bewertet werden. Bei verringertem Flockungsmittelleinsatz konnte ein geringfügiger Anstieg der Foulingrate festgestellt werden. Ein Betrieb ohne Flockungsmittel war jedoch nicht möglich.

#### *Konzept zur großtechnischen Umsetzung einer Ultrafiltrationsanlage*

Im Rahmen von PLASTRAT wurde ein mögliches Konzept der zusätzlichen Verfahrenstechnik zum weitestgehenden Rückhalt von Partikeln, einschließlich Mikroplastik untersucht. An den Ablauf der Bestandsanlage (Ablauf Nachklärung) wird zur Vorfiltration eine Mikrosiebung angebunden und daran anschließend ein Pumpwerk zur Beschickung der Ultrafiltration. Die Ultrafiltration erfordert neben der Vorfiltration des Abwassers und der Dosierung von Flockungsmittel Aggregate für die Rückspülung und die chemische Reinigung.

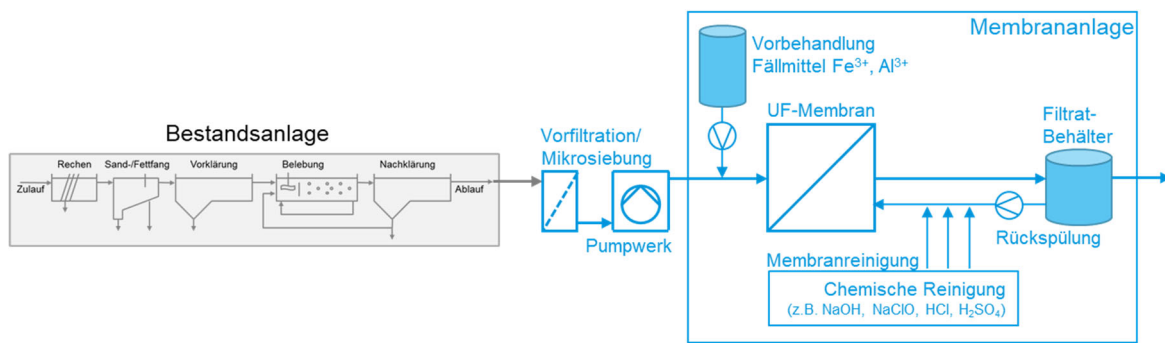


Abbildung 14: Schematische Darstellung eines möglichen Konzeptes zur Umsetzung einer Ultrafiltrationsanlage im Kläranlagenablauf (Abschlussbericht der aquadrat ingenieure GmbH, 2021)

Die Betrachtung dieses Konzeptes erfolgte beispielhaft für vier unterschiedliche Kläranlagengrößen mit einer Ausbaugröße von 50.000 EW, 100.000 EW, 500.000 EW und 1.000.000 EW. Zur Auslegung der jeweiligen Anlagengröße wurde die zu behandelnde Wassermenge mit 80 % der Jahresabwassermenge angenommen.

Für die Anlagenkonzeption wurden folgende Annahmen getroffen: Die Vorfiltration (Mikrosiebung) wird an den vorhandenen Ablauf der Bestandsanlage angeschlossen und im freien Gefälle durchflossen. Daran anschließend wird ein Tauchmotorpumpwerk zur Beschickung der Membrananlage errichtet. Die gleichmäßige Aufteilung auf die einzelnen Membranstraßen erfolgt über MID-Regelstrecken. Die Membrananlage wird mit allen Nebenaggregaten (Vorbehandlung, Filtratspeicher, Rückspülung, chemische Reinigung) in einer neu herzustellenden Halle (nicht unterkellert) aufgestellt.

Tabelle 1: Ermittelter Flächenbedarf und Herstellungskosten einer Ultrafiltrationsanlage in Abhängigkeit der Einwohnerwerte (Abschlussbericht der aquadrat ingenieure GmbH, 2021)

Einwohnerwerte	Flächenbedarf (Berechnung)	Flächenbedarf	Herstellungskosten (inkl. Baunebenkosten und MwSt.)
[E]	[m x m]	[m <sup>2</sup> ]	[Mio. €]
50.000	25 x 40	1.000	8,2
100.000	25 x 40	1.000	10,6
500.000	40 x 50	2.000	28,5
1.000.000	50 x 60	3.000	48,5

Die Anlagen wurden überschlägig dimensioniert und der Flächenbedarf abgeschätzt, die Investitions- und Betriebskosten wurden auf Basis einer Grobkostenschätzung angesetzt und daraus die Jahreskosten ermittelt. Die Herstellungskosten (brutto, inkl. Baunebenkosten) liegen zwischen 8,2 Mio. € und 48,5 Mio. €. Die spezifischen Jahreskosten (jährliche



Kapitalkosten und jährliche Betriebskosten) sind in Abbildung 15 dargestellt, bezogen auf die zu behandelnde Abwassermenge und bezogen auf die Einwohnerwerte.

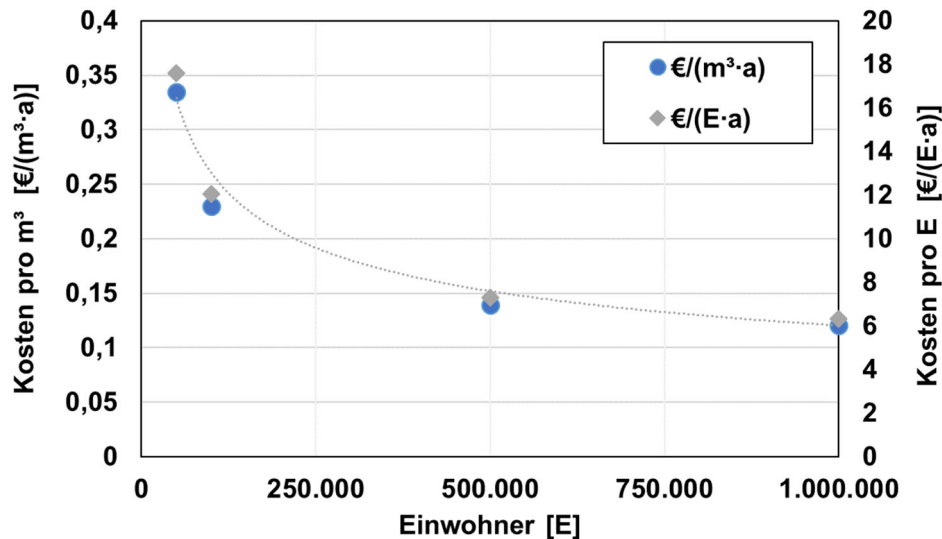


Abbildung 15: Spezifische Jahreskosten (brutto) für eine Ultrafiltrationsanlage im Ablauf der Nachklärung pro Kubikmeter behandeltes Abwasser und pro Einwohner in Abhängigkeit der Ausbaugröße (Abschlussbericht der aquadrat ingenieure GmbH, 2021)

Der reduzierte Einsatz von Flockungsmitteln ist in den oben gezeigten Kosten berücksichtigt. Insgesamt konnte somit eine Kostenreduzierung der spezifischen Jahreskosten für die jeweiligen Auslegungsfälle um 21 %, 29 %, 43 % und 49 % erzielt werden. Im Vergleich zu den durchschnittlichen Jahreskosten pro Einwohner von ca. 137 €/(E·a), würden sich für eine mikrobiologisch verbesserte Wasserqualität die Abwassergebühren zwischen 13 % und 5 % erhöhen (Abschlussbericht der inge GmbH, 2021).

#### Mikroplastikrückhalt durch die Ultrafiltration

Bei den Mikroplastikanalysen im Bereich der Ultrafiltration (vgl. Abbildung 16) wurden zusätzlich zu den Partikelgrößenklassen > 100 µm und 50-100 µm die Partikelgrößenklasse < 50 µm analysiert. Die untere Messgrenze lag hier bei 10 µm.

In der Partikelgrößenklasse > 50 µm lag der gemessene Rückhalt bei 79 %. Im Bereich zwischen 10 und 50 µm lag der gemessene Rückhalt zwischen 88 – 99,5 %. Die geringere Rückhaltquote besonders im Bereich > 50 µm lässt sich auf Verunreinigungen bzw. Grenzen des Probenahmesystems (vgl. Abbildung 7 „Aufkonzentrierung“) und der Quantifizierungsmethode zurückführen, da der Systemblank mit 40 MPP/m³ teilweise höher lag als die Analysenwerte der Filtrat-Probe selbst. Somit liegt der tatsächliche Rückhalt der Ultrafiltration bei den Partikelgrößen 10 – 500 µm zwischen 88 % und 100 %. Weiterhin konnte eine deutliche Aufkonzentrierung der Partikel im Rückspülwasser festgestellt werden.

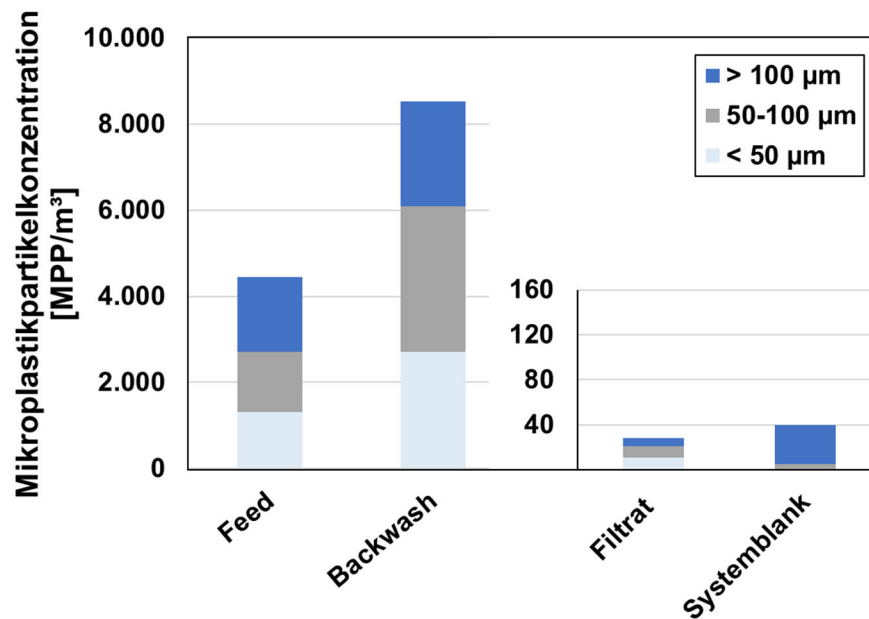


Abbildung 16: Ergebnisse der Mikroplastik-Analysen im Bereich Ultrafiltration als weiterführende Abwasseraufbereitung, Feed zur UF-Anlage entspricht Ablauf Nachklärung, Backwash = Rückspülwasser der UF-Anlage, Mittelwert aus drei Probenahmen (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021)

#### Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen

Ebenfalls betrachtet wurde der Aspekt des Mehrfachnutzens durch eine Ultrafiltration hinsichtlich der Entfernung von pathogenen Keimen. Als zusätzlicher Parameter zu Mikroplastik wurde der Rückhalt von antibiotikaresistenten Keimen und fakultativ-pathogenen Bakterien untersucht, vgl. Abbildung 17. Der Rückhalt von Antibiotikaresistenzgenen lag bei 99,9 - 99,999 %. Dies entspricht einer Reduzierung um 3-5 Log-Stufen. Im Filtrat waren außerdem keine fakultativ pathogenen Bakterien mehr nachweisbar.

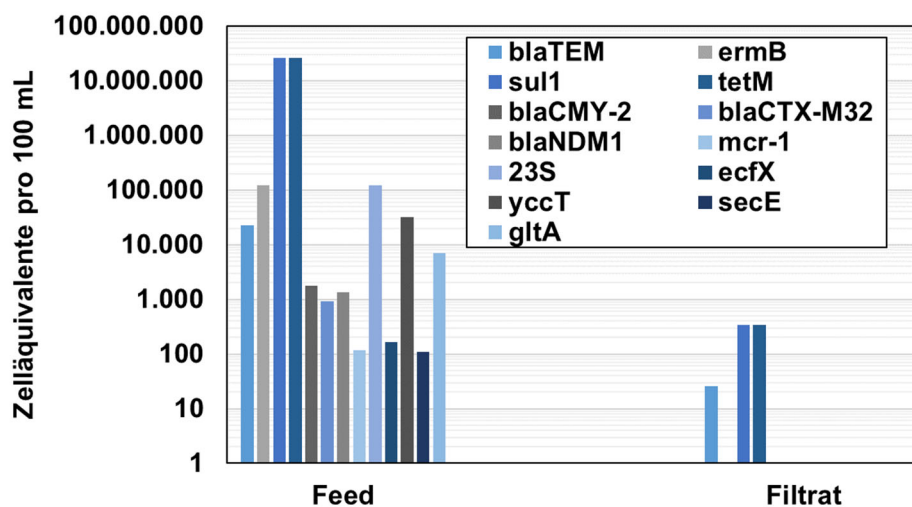


Abbildung 17: Ergebnisse der Untersuchungen des Rückhalts von Antibiotikaresistenzgenen durch die Ultrafiltrationsanlage. Logarithmische Darstellung der Ergebnisse, die Legende zeigt die untersuchten Antibiotikaresistenzgene und fakultativ-pathogenen Bakterien (Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München, 2021)

### Zwischenfazit

Für die Analyse von Mikroplastikpartikeln, vor allem für den Vergleich der Ergebnisse, ist eine standardisierte (vergleichbare) Methodik unverzichtbar; dies gilt von der Probenahme über die Probenaufbereitung bis zur Analyse. Die im Rahmen von PLASTRAT entwickelten Empfehlungen sollten hierbei berücksichtigt werden.

In allen Abwasser-, Kläranlagenablauf- und Klärschlammproben konnten Mikroplastikpartikel nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine konventionelle kommunale Kläranlage bis zu 99 % der im Zulauf zur Kläranlage enthaltenen Mikroplastikpartikel zurück gehalten werden (Messung von Partikeln > 50 µm). Die Mikroplastikpartikel werden dabei über den Klärschlamm separiert.

Durch die betrieblichen Bedingungen der Abwasserbehandlung sind der Partikelabtrennung jedoch Grenzen gesetzt. Durch zusätzliche Verfahrenstechnik auf der Kläranlage, wie z. B. einer Ultrafiltrationsanlage oder einem Tuchfilter, lassen sich Einträge weiter reduzieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass durch deren Einsatz weitere Effekte je nach Verfahrensauswahl erzielt werden können, beispielsweise Reduktion von Phosphor oder der Elimination von Pathogenen.

### **Besteht ein Risiko für die Trinkwasseraufbereitung durch Mikroplastik?**

Mikroplastik sowie aus Kunststoffen herauslösbare Stoffe gelangen hauptsächlich aus Oberflächenabflüssen, kommunalen und industriellen Abwassereinleitungen, aber auch aus Mischwasserentlastungen und atmosphärischer Deposition in die Umwelt. Davon sind im Wesentlichen Oberflächengewässer betroffen. Im Rahmen von PLASTRAT wurde eine konzeptionelle Vorgehensweise für die Ermittlung des Risikos erstellt, das von Mikroplastik in Oberflächengewässern für die Trinkwasserqualität ausgeht.

Grundlage für die Risikoermittlung ist das Water-Safety-Plan(WSP)-Konzept der WHO (WHO, 2014). Ziel des Konzeptes ist es, Gefährdungen für die Trinkwasserqualität rechtzeitig zu erkennen und Maßnahmen zu ergreifen, um deren Eintritt und/oder deren Auswirkungen zu verringern oder vollständig zu vermeiden.

Das Risiko, das von Mikroplastik sowie von gelösten Stoffen aus Kunststoffen im Trinkwasser ausgeht, wird gemäß dem WSP-Konzept aus der Kombination von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß ermittelt. Dazu muss zunächst die Belastung der Oberflächengewässer für jede betrachtete Trinkwasseraufbereitungsanlage und jeden Stoff bzw. jede Stoffgruppe in Abhängigkeit vom Abfluss des Gewässers ermittelt werden.

Zur Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit wird die Dauerlinie des Abflusses des Gewässers herangezogen und gemäß der Häufigkeit der Abflussmengen Klassen gebildet. Nach Klassenbildung und Bewertung des Rückhaltes bei Gewinnung und Aufbereitung stehen für jeden Abfluss eines Gewässers die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß (erwartete Konzentration im Trinkwasser und deren toxikologische Bewertung) zur Verfügung. Diese werden in einer Risikomatrix miteinander kombiniert und daraus das Risiko ermittelt, das bei einem gegebenen Gewässerabfluss für die Trinkwasserqualität besteht. Für die Klassenbildung bei der Eintrittswahrscheinlichkeit und bei der Bewertung des Schadensausmaßes existieren derzeit jedoch noch keine festgelegten Regeln.

Bei der Bewertung der Wirksamkeit vorhandener Barrieren (Partikelentfernung bei Uferfiltration, Schnell- und Membranfiltration, Adsorption, Oxidation) gegenüber Mikroplastik und von ihm abgegebene Substanzen, können gegebenenfalls Erfahrungen beim Rückhalt von anderen Spurenstoffen und Mikroorganismen übertragen werden. Derzeit besteht jedoch ein signifikantes Informationsdefizit bezüglich des Eintrags von Mikroplastik in die Oberflächengewässer und die in diesen vorherrschenden Belastungen. Zur abschließenden Beantwortung der Frage sind weiterführende Untersuchungen im Bereich der toxikologischen Bewertung von Additiven und zum Agglomerations- und Adsorptionsverhalten von Mikroplastikpartikeln zwingend erforderlich.

Soweit die Methode mit der entsprechenden Datenbasis und Bewertungsgrundlage angewandt werden kann, können gegebenenfalls erforderliche Maßnahmen im Bereich der Wassergewinnung und der Aufbereitung abgeleitet werden. Diese können von der temporären Reduzierung der Oberflächenwassernutzung und Steigerung der Nutzung von unbelastetem Grundwasser bis hin zu Anpassungen in der Trinkwasseraufbereitung reichen.

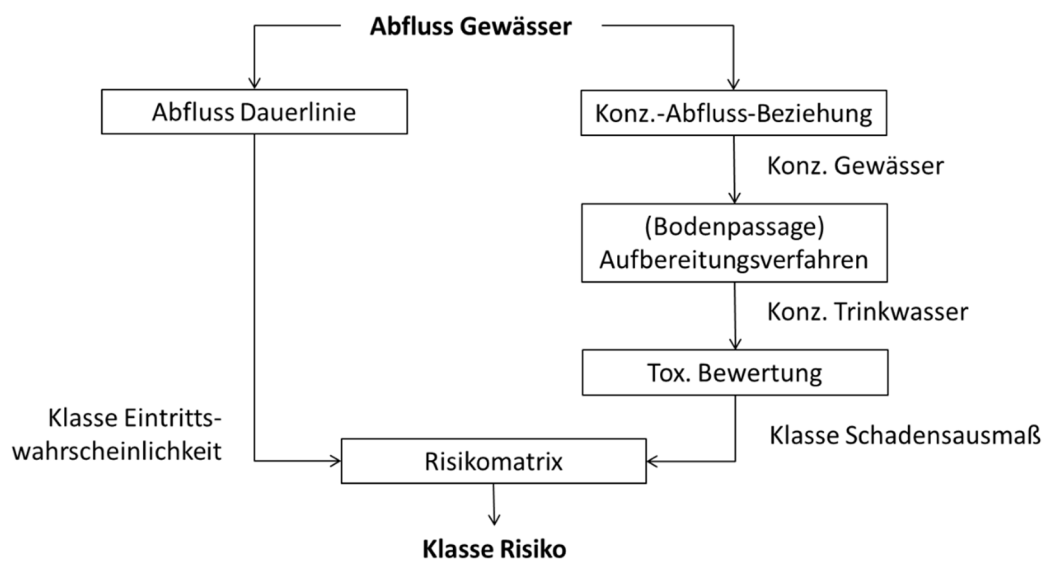


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Risikoermittlung nach dem WSP (Water Safety Plan) der WHO (Abschlussbericht der IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, 2021)

### Zwischenfazit

Das Risiko, das von Mikroplastik in Oberflächengewässern für die Trinkwasserqualität ausgeht, kann grundsätzlich unter Anwendung des Water-Safety-Plan-Konzepts der WHO abgeschätzt werden.

Die derzeitige Informations- und Datenbasis bezüglich des Eintrags von Mikroplastik in die Oberflächengewässer und die in diesen vorherrschenden Belastungen ist zur abschließenden Beantwortung der übergeordneten Fragestellung jedoch noch nicht ausreichend.

Weiterführende Messungen an Oberflächengewässern, begleitet von Untersuchungen im Bereich der toxikologischen Bewertung von Additiven und zum Agglomerations- und Adsorptionsverhalten von Mikroplastikpartikeln sind zwingend erforderlich.



## 4 Wie verhält sich Plastik in der Umwelt?

### 4.1 Woraus besteht Mikroplastik und was ist drin?

Kunststoffe sind in der Umwelt omnipräsent, ob als Vermüllung in Gewässern und anderen Umweltkompartimenten oder im Rahmen ihrer Nutzung in beispielsweise Bauwerken, Automobilen oder anderen Gütern. Die konventionellen, thermoplastischen, polyolefinischen Kunststoffe sind die am häufigsten eingesetzten Vertreter, und deren Persistenz in der Natur als Makro- oder Mikroplastik ist äußerst hoch.

Die Einflüsse der Umwelt auf die Kunststoffe sind vielfältig und damit verbunden auch die unterschiedlichen Mechanismen der Verwitterung. Einflussfaktoren auf die Degradation in der Umwelt können folgende sein:

- Sonneneinstrahlung,
- Temperatur,
- Druck,
- Sauerstoff,
- Wasser,
- Salzgehalt,
- mechanische Belastungen,
- Einflüsse durch Stickoxide,
- Ozon,
- Redoxpotentiale,
- ionisierende Strahlung,
- biologische Aktivitäten durch Mikroorganismen, von Pilzen oder anderen lebenden Organismen und
- wechselnde dynamische Einflüsse.

Die Degradationspfade der Kunststoffe nach Exposition gegenüber den oben genannten Einflüssen sind so zum einen unterschiedlich schnell und führen zum anderen auch zu unterschiedlichen Degradationsprodukten.

Eine große Schwierigkeit in der Untersuchung und Bewertung der toxikologischen Unbedenklichkeit und Umweltverträglichkeit von Kunststoffen ist die mangelnde Deklarationspflicht von Kunststoffprodukten. Die Identität des Basispolymers kann in vielen Fällen lediglich für eine geringe Zahl an Polymeren am Recyclingcode festgemacht werden. Die Identifizierung des Basispolymers kann beispielsweise mittels IR-spektroskopischer Untersuchungen relativ gut charakterisiert werden. Wesentlich schwieriger und analytisch äußerst aufwendig ist dagegen die Identifizierung und Quantifizierung von Inhaltsstoffen/Additiven, von denen jedoch das wesentliche Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt ausgeht. Ein handelsüblicher Kunststoff beinhaltet neben dem deklarierten Basispolymer eine Vielzahl von unterschiedlichen Additiven in relevanten Anteilen vom Promille-Bereich bis 50-Massenprozent und mehr. Verwendete Additivklassen sind beispielsweise Weichmacher, Antioxidantien, Lichtschutzmittel, thermische Stabilisatoren, Säurefänger, Flammschutzmittel, Füllstoffe, Phasenvermittler, Treibmittel, Gleitmittel, Antistatika, Pigmente und viele

weitere. Jede dieser Klassen beinhaltet jeweils eine große Anzahl an unterschiedlichen chemischen Verbindungsklassen, Substanzen und Substanzgemischen. Diese haben zum einen Einfluss auf das Degradationsverhalten des Polymers und zum anderen können diese aus der Kunststoffmatrix freigesetzt werden und/oder selbst transformiert und dann freigesetzt werden, sodass diese Verbindungen eine hohe Relevanz in der Human- und ökotoxikologischen Betrachtung von Kunststoffen innerhalb der Funktion und darüber hinaus haben können.

Die zumeist eingesetzten, konventionellen, thermoplastischen Kunststoffe basieren auf Polymeren, welche reine Kohlenwasserstoffe sind, wie beispielsweise PP, HDPE (High Density Polyethylen), LDPE (Low Density Polyethylen), LLDPE (Linear Low Density Polyethylen) oder PS. Aufgrund der Stabilität, der Abwesenheit von Heteroatomen und der Hydrophobie sind die Materialien in der aquatischen Umwelt weitestgehend inert, woraus in der Konsequenz eine extrem hohe Persistenz resultiert. Nichtsdestotrotz lassen Umwelteinflüsse wie energiereiche UV-Strahlung oder beispielsweise redoxaktive Substanzen Kunststoffe altern und verwittern. Deshalb sind zum Schutz der Kunststoffe während der Verarbeitung und während des geplanten Lebenszyklus sowie zur Einstellung der gewünschten Eigenschaften eine Fülle an unterschiedlichen Additivklassen zugesetzt, z. B. Weichmacher, Stabilisatoren, Flammschutzmittel, Farbstoffe oder Füllstoffe. Zudem können Neben-/Abbauprodukte sowie Verunreinigungen unbeabsichtigt in den Kunststoff gelangen. Darüber hinaus bewirken Umwelteinflüsse, wie ultraviolette (UV) Strahlung, die Bildung von Abbau- und Transformationsprodukten. Bei all diesen Chemikalien handelt es sich um Stoffe, die in der Regel nicht dauerhaft in die Plastikmatrix eingebunden sind. Daher können sie sich aus dem Plastikverbund lösen und in Umweltkompartimente wie Luft, Wasser oder Boden migrieren (Groh et al., 2019). In Abhängigkeit der Umwelt- und Freisetzungsbedingungen migrieren Restmonomere, Abbauprodukte des Polymers und der Additive oder die Additive selbst aus der Kunststoffmatrix in die Wasserphase oder das biologische Medium und können daher einen negativen Einfluss auf die Umwelt haben.

Weitestgehend unklar ist gegenwärtig, wie die Degradationsprozesse und die Verwitterung der Kunststoffe und Additive auf molekularer Ebene ablaufen und welche Verbindungen dabei entstehen und vor allem freigesetzt werden. Diese Fragestellung wurde innerhalb von PLASTRAT genauer betrachtet. Hierzu wurde eine Auswahl von unterschiedlichen konventionellen Polymeren (LDPE, LLDPE, PET, PVC, PESU (Polyethersulfon)) in unterschiedlichen Qualitäten und bioabbaubaren Polymeren (Stärke/PBAT/PLA 50/46/4, PBS) untersucht. Um die Alterung von Kunststoffen in der Umwelt abzubilden, wurden die Materialien innerhalb dieser Untersuchung künstlich mittels einer Taglichtbewitterungskammer nach DIN EN ISO 4892-2 bewittert. Anschließend wurden Polymeralterung und Freisetzungsverhalten der Kunststoffe untersucht. Hierzu wurden unter anderem Leachingstudien mit Wasser für 7 Tage bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Lösungen wurden unter anderem mittels HPLC-MS/MS vermessen und nach modernen non-target-Ansätzen analysiert.

Polymerabhängig wurde eine große Anzahl bislang unbekannter Verbindungen detektiert. Je nach Kunststoffformulierung konnten einige Prozesschemikalien wie Lösungsmittel, Additive wie Antioxidantien, Weichmacher, UV-Stabilisatoren, Stabilisatoren, Gleitmittel und Oligomere identifiziert werden. Der Großteil der detektierten Verbindungen, die aus den



„alternden“ Kunststoffen migrierten, konnte noch nicht identifiziert werden. Ein Grundstein für Degradations- und Freisetzungsstudien von Kunststoffen konnte gelegt werden. Um das Verständnis der molekularen Degradationsprozesse gänzlich zu verstehen, sind jedoch weitere polymerspezifische Arbeiten erforderlich.

Generell nahm in den Leachaten in Abhängigkeit des Degradationsgrades nach künstlicher, beschleunigter Bewitterung die Anzahl der detektierten Verbindungen und deren Intensitäten zu. Stellvertretend ist hierzu in Abbildung 19 die Summe der detektierten MS-Intensitäten nach HPLC-MS im positiv und negativ-Modus in Abhängigkeit des Degradationsgrades der wässrigen Leachate des Polyesters Polybutylensuccinat PBS aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist, dass die Intensitäten mit zunehmender Alterung des Kunststoffes zunehmen. Ferner konnte in diesen Leachaten neben einer Vielzahl von unbekanntem Verbindungen erstmals mehrere Serien an Esteroligomeren auf Basis der Monomere 1,4-Butandiol und Bernsteinsäure detektiert und identifiziert werden. Die Gegenwart von niedermolekularen Oligomeren in Polymermatrizen von Polykondensaten wie Polyestern sind aufgrund der Stufenwachstumspolymerisation plausibel und deren Freisetzungen sind zu erwarten. Exemplarisch ist in Abbildung 19 der relative Intensitätsverlauf des linearen Oligomers  $[BS]_2B$ , welches eine lineare Esterverbindung aus drei 1,4-Butandiol- und zwei Bernsteinsäure-Einheiten ist, in Abhängigkeit der künstlichen Bewitterungsdauer des Kunststoffes aufgetragen. Die Intensität dieses Analyten nimmt mit anhaltender künstlicher Bewitterung signifikant zu. Dies ist ein starkes Indiz dafür, dass die Freisetzung dieses Oligomers nicht ausschließlich auf die synthesebedingte Gegenwart des Oligomers in der Polymermatrix zurückzuführen ist, sondern dass während der Bewitterung eine Hydrolyse der Esterfunktionen innerhalb der Polymerkette eintritt und unter anderem diese und weitere niedermolekulare Oligomere gebildet werden.

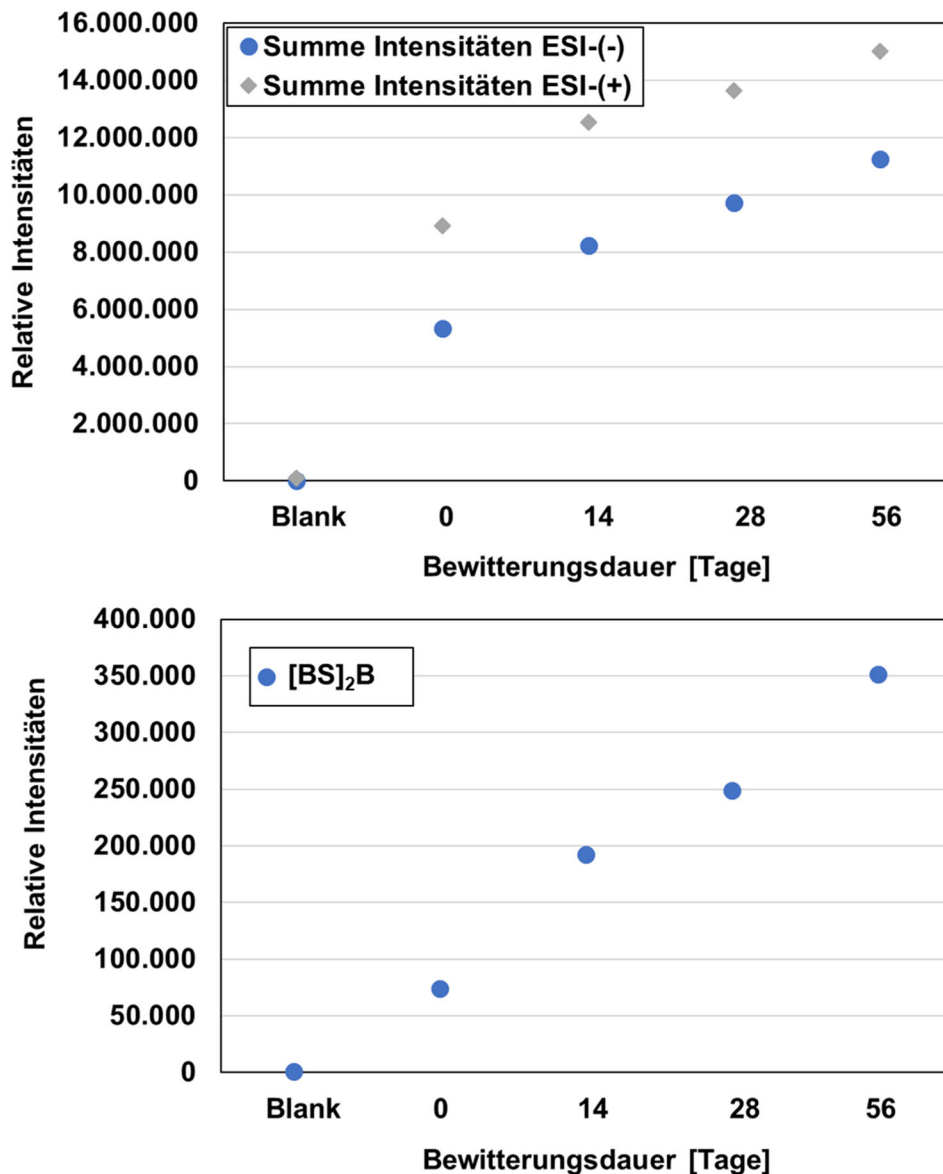


Abbildung 19: Summe der detektierten MS-Intensitäten nach HPLC-MS im ESI-negativ- und ESI-positiv-Modus in Abhängigkeit der künstlichen Bewitterungsdauer des Kunststoffes PBS (oben); detektierte MS-Intensitäten des Oligomeres [BS]<sub>2</sub>B in wässrigen Leachaten in Abhängigkeit der künstlichen Bewitterungsdauer des Kunststoffes PBS (unten). (Abschlussbericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2021)

Dass die Veränderung der Kunststoffpartikel nicht ausschließlich an der Oberfläche stattfindet, wurde mittels thermoanalytischer Verfahren wie TGA (thermogravimetrische Analyse) und DSC (dynamische Differenzkalorimetrie, differential scanning calorimetry) nachgewiesen. Je nach Bewitterungsdauer und Material wurde eine Verschiebung der Glasübergangstemperatur und der Rekristallisationstemperatur beobachtet. Die human- und ökotoxikologische Relevanz der in Abhängigkeit der Bewitterung freigesetzten Verbindungen wurde ebenfalls intensiv untersucht, vgl. Kapitel 4.3.

## 4.2 Findet eine Schadstoffanreicherung an Plastik in der Kläranlage statt?

In Kläranlagen und den ihnen vorgelagerten Kanalnetzen treffen Mikroplastik und verschiedene hydrophobe Schadstoffe aufeinander. Aufgrund der chemisch-physikalischen Eigenschaften solcher Schadstoffe können sie sich an Mikroplastik anreichern. Mit dem Ablauf der Kläranlagen gelangt somit unter Umständen nicht nur Mikroplastik in das limnische Ökosystem, sondern auch schadstoffbeladenes Mikroplastik.

Im Rahmen von PLASTRAT wurde untersucht, welche Schadstoffmassen in den einzelnen Reinigungsschritten einer Kläranlage und dem vorgelagerten Kanalnetz an Partikel < 5 mm sorbieren, welchen Einfluss saisonale Schwankungen und das Plastikalter auf den Anreicherungsprozess von hydrophoben Schadstoffen an Mikroplastik haben und ob Mikroplastikpartikel in einer Kläranlage weiter mit Schadstoffen beladen wird oder sogar Schadstoffe durch Desorption freisetzt. Zudem wurden Einflüsse von Industrieabwässern bei den Untersuchungen berücksichtigt. Untersucht wurden die am häufigsten verwendeten und in Abwasser detektierten Arten von Kunststoff, jeweils in unterschiedlichen Zuständen: Originalware (neu, virgin), recyceltes Plastik und künstlich gealtertes Mikroplastik sowie bioabbaubare Kunststoffe in unterschiedlichen Stufen des Behandlungsprozesses der Kläranlage.



*Abbildung 20: Probenaufbau zur Exposition der ausgewählten Kunststoffe in einzelne Stufen des Klärprozesses. Die Kunststoffe sind in Gewebesläuchen gesichert und in einem Gestell zur Fixierung an der gewünschten Stelle befestigt (Abschlussbericht der Technischen Universität Darmstadt, 2021)*

Künstlich gealterte Kunststoffe wurden verwendet, um das reale Verhalten von Kunststoffen in der Umwelt sowie die lange Abbauphase der Kunststoffe widerzuspiegeln.

Repräsentativ für Schadstoffe wurden polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) untersucht. PAK entstehen z. B. bei unvollständigen Verbrennungsprozessen oder durch Reifenabrieb und können aufgrund ihrer hydrophoben Eigenschaften in Biota akkumulieren. Die Untersuchungen erfolgten an unterschiedlichen Stufen der Kläranlage (vgl. Abbildung 21).

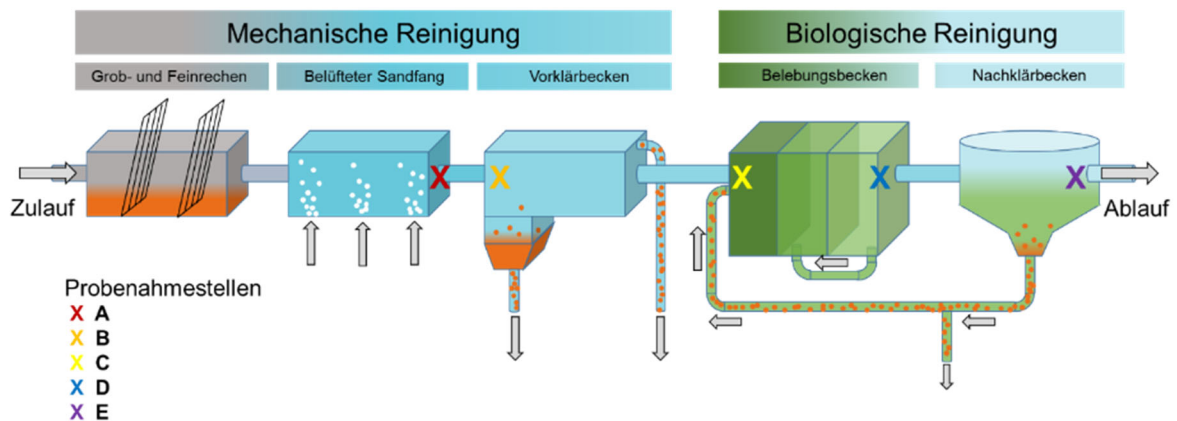


Abbildung 21: Kläranlagenaufbau und Probenstandort zur Exposition unterschiedlicher Kunststoffe in unterschiedlichen Stufen des Klärprozesses (Abschlussbericht der Technischen Universität Darmstadt, 2021)

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass in allen Jahreszeiten und Reinigungsstufen die Schadstoffanreicherung der ausgebrachten Mikroplastikpartikeln über den analysierten Schadstoffmengen der originalen Referenzpartikel lag. Spezielle, im Labor hergestellte, schadstoffbeladene Referenzpartikel wurden in die Kläranlage eingesetzt, um eine mögliche Desorption der Schadstoffe festzustellen. In den Kläranlagen sowie in allen Reinigungsstufen konnte die gleiche Schadstoffbeladung wie vor dem Einsetzen festgestellt werden. Eine Desorption hat demnach nicht stattgefunden.

In Partikeln aus Kläranlagen mit großem Einzugsgebiet sowie einem großen Anteil an Gewerbe und Industrie (Industrieabwasser) ist eine höhere Schadstoffanreicherung festgestellt worden. Diese höhere Beladung mit Schadstoffen war insbesondere bei einer erhöhten Belastung des Abwassers mit diesen Schadstoffen nachweisbar. Die Schadstoffanreicherung an Mikroplastik erfolgt vorrangig in den Stufen der mechanischen Reinigung (Probenstandort A und B) zu Beginn des Abwasserreinigungsprozesses. Die geringen Fließgeschwindigkeiten in diesen Stufen begünstigen die Adsorption der Schadstoffe an die Partikel.

Die PAK-Anreicherung an den getesteten Kunststoffarten nimmt von PBAT (Polybutylenadipaterephthalat) >> LDPE > PBS (Polybutylensuccinat) > PVC > PET immer weiter ab. Recycelte Kunststoffe tendieren dazu, PAK stärker zu adsorbieren als neuwertige Kunststoffe. Darüber hinaus neigen künstlich gealterte Kunststoffe zu einer geringeren PAK-Beladung verglichen mit unbewitterten Kunststoffen. Die Exposition der bewitterten Kunststoffe wurde an Probenstandort A (Ablauf belüfter Sandfang, vgl. Abbildung 21) durchgeführt. Hierbei wurde untersucht, ob der Alterungsprozess der Kunststoffe eine Veränderung der Schadstoffanreicherung an den Partikeln bedingt. Dabei wurde festgestellt, dass der Alterungsprozess die Oberflächenstruktur der Kunststoffe verändert. Diese wird durch Oxidationsprozesse hydrophiler, die Beladung mit hydrophoben Schadstoffen ist im Vergleich zu den unbewitterten Kunststoffen geringer (vgl. Abbildung 22).

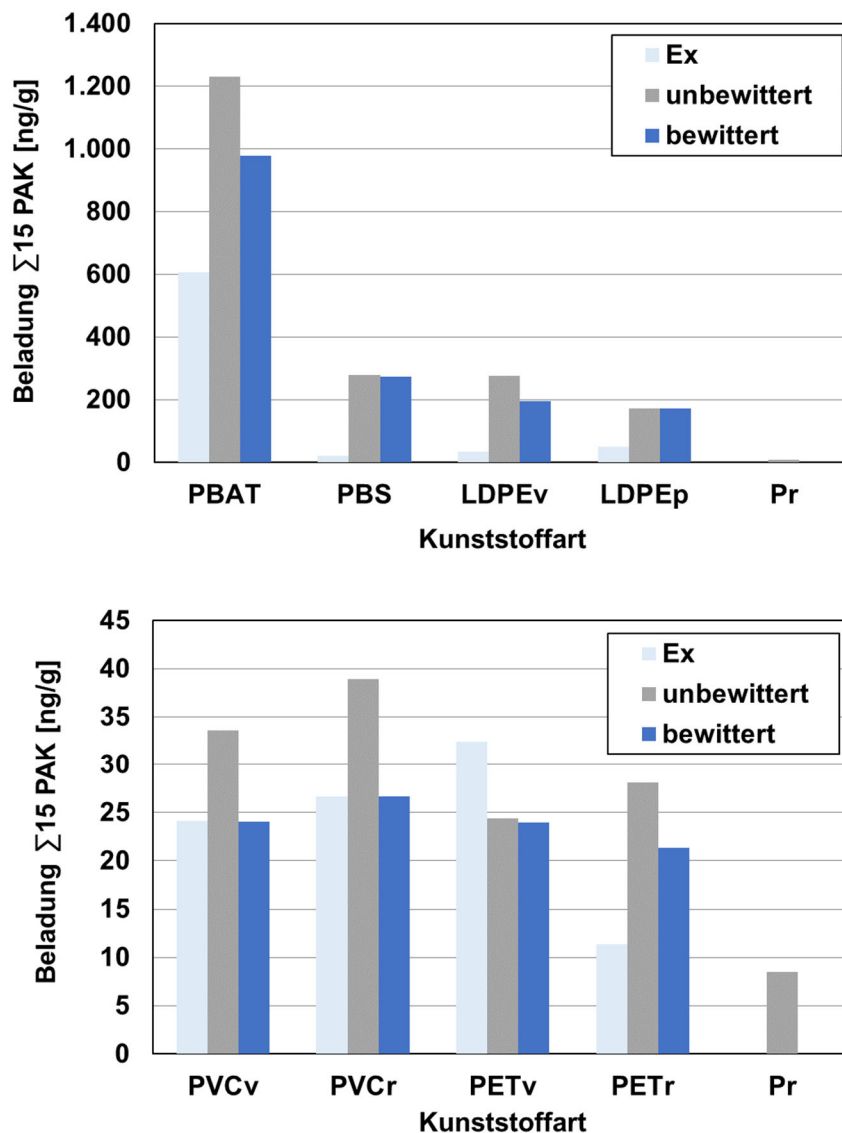


Abbildung 22: Bewitterte/unbewitterte Kunststoffe (Pr = procedure blank, beschreibt alle Probenreinigungs- und Aufbereitungsschritte ohne Kunststoff; Ex = extraction blank des originalen Plastiks, das nicht in die Kläranlage eingesetzt wurde; v = virgin, r = recycelt, p = Post Industrial) (Abschlussbericht der Technischen Universität Darmstadt, 2021)

### 4.3 Was macht die toxikologische Wirkung von Plastik aus?

Durch die vielfältigen Zusammensetzungsmöglichkeiten jedes Kunststoffes und das Auslaugen der einzelnen Substanzen während des Degradationsprozesses sind ebenfalls vielfältige Wirkmechanismen durch die Kunststoffe und die auslaugenden Substanzen möglich, davon untersucht wurden in PLASTRAT die aquatische und humane Toxizität. Auch die Morphologie von Mikroplastikpartikeln, wie beispielsweise eine scharfkantige Oberfläche, kann zu Schädigungen eines Organismus beitragen. Weiterhin kann durch erhöhte Mikroplastikaufnahme die Aufnahme von Nährstoffen vermindert werden, wodurch

es zum Hungern und Verhungern oder zu Mangelerscheinungen im Organismus kommen kann.

### **Plastikassoziierte Chemikalien verursachen toxikologische Wirkungen**

Am Beispiel der hormonellen Wirkungen werden exemplarisch die Befunde für die untersuchten Kunststoffe vorgestellt, vgl. Abbildung 23. Einige Polymertypen erwiesen sich in der Untersuchungsreihe immer wieder als hormonell aktiv (PVC und bioabbaubare Kunststoffe). Andere Polymere wie PET, PP oder PS, zeigten hingegen geringe bis keine hormonellen Wirkungen. Diese Unterschiede sind vermutlich dem jeweiligen Einsatzgebiet der Polymere und den daraus resultierenden gesetzlichen Vorgaben für zulässige Inhaltsstoffe geschuldet. Die weniger auffälligen Polymertypen werden vorwiegend als Verpackungsmaterialien eingesetzt und unterliegen daher stärkeren gesetzlichen Bestimmungen.

Die Befunde lassen sich jedoch nicht in dem Sinne verallgemeinern, dass ein Kunststoff auf Basis eines bestimmten Polymertyps toxikologisch auffällig oder auch unbedenklich ist. Das beobachtete Wirkspektrum differiert vielmehr innerhalb eines Polymertyps der Rohmaterialien erheblich (z. B. bei PE) und hängt von der chemischen Komposition eines jeden einzelnen Kunststoffes ab, also z. B. von den verwendeten Additiven, Verarbeitungshilfsmitteln und den bei der Produktion unbeabsichtigt eingebrachten Substanzen wie beispielsweise Gleitmittel.

Durch die simulierten Verwitterungsversuche konnte gezeigt werden, dass nach einer UV-Bestrahlung der Plastikpellets die Stärke der hormonellen Wirkungen in der Regel zunahm. Bereits zuvor auffällige Polymere zeigten höhere Wirkpotentiale (PVC 1, PE 2 und bioabbaubare Kunststoffe), auch Polymere, die anfänglich als toxikologisch unbedenklich eingestuft wurden, wiesen nach der UV-Bestrahlung hormonelle Effekte auf (vgl. PP 2 und PE 2 in Abbildung 23).

Entgegen der häufigen Annahme, Plastikmaterialien seien chemisch inert, erwies eine chemische Analyse der wässrigen Auslaugproben, dass eine große Anzahl an chemischen Komponenten aus den verschiedenen Plastiksorten auslaugte. Zudem wurde analytisch ebenfalls nachgewiesen, dass Chemikalien vermehrt aus dem Plastikverbund herausgelöst wurden, sobald das Plastik direktem Licht ausgesetzt war. Dies zeigt, dass Plastik bereits in Form von Pellets und damit vor der Fertigung der späteren Verbraucherprodukte Chemikalien beinhaltet, die Auslaugen können. Im weiteren Verlauf des Produktionsprozesses wird durch die Zugabe weiterer Substanzen die chemische Komposition der Plastikprodukte zunehmend komplexer, sodass sich die Zahl von Substanzen, die aus den Produkten auslaugen, noch weiter erhöht. Gelangen solche Materialien in die Umwelt, trägt UV-Strahlung also dazu bei, dass sich Substanzen vermehrt aus dem Plastik lösen und auch bislang unbekannte Verbindungen (Transformationsprodukte) entstehen.

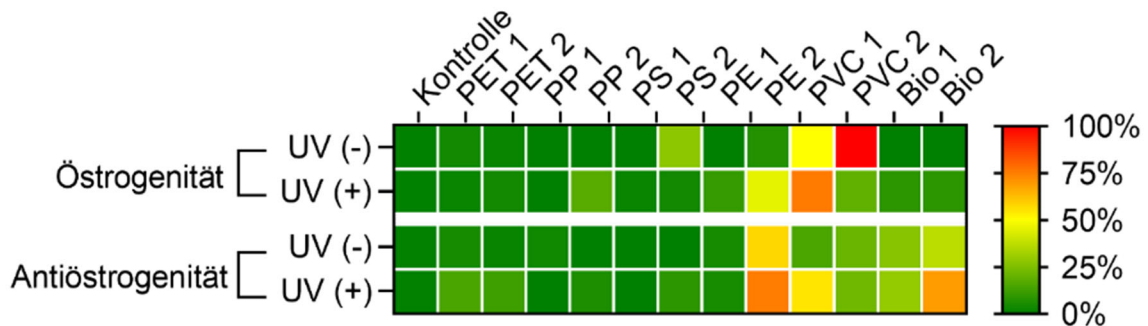


Abbildung 23: Relative östrogene und anti-östrogene Wirkungen der untersuchten Polymere ohne (UV -) und mit UV-Strahlung (UV +). Kontrolle = kein Plastik, PET = Polyethylenterephthalat, PE = Polyethylen, PP = Polypropylen, PS = Polystyrol, PVC = Polyvinylchlorid und Bio = Bioabbaubarer Kunststoff (Abschlussbericht der Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2021)

### Wie kann in Zukunft eine toxikologische Bewertung von Plastik aussehen?

Die chemische Analyse zeigte, dass aus den Pellets bis zu mehrere tausend Substanzen pro Polymertyp auslaugen. Für eine umfassende toxikologische Bewertung der einzelnen Kunststoffspezies müsste eine Stoffbewertung jeder einzelnen Komponente vorliegen. Zusätzlich können die Wechselwirkungen der einzelnen Stoffe vielfältig sein. Durch die Fülle an Chemikalien ist eine Aufklärung und Identifizierung der für die beobachteten Effekte verantwortlichen Substanzen jedoch nur näherungsweise möglich.

Als erste Annäherung wurden unterschiedliche Additive wie Antioxidantien, Stabilisatoren und UV-Absorber sowie auffällige Degradations- und Transformationsprodukte in reiner Form mit der gleichen toxikologischen Testbatterie untersucht. Diese Einzelsubstanztestungen ergaben zum Teil hormonähnliche und/oder gentoxische Wirkungen. Ob die entsprechenden Wirkungen bei der Untersuchung der oben erwähnten Kunststoffe von diesen Einzelsubstanzen oder dem ausgelaugten „Chemikaliencocktail“ ausgingen, bleibt jedoch unklar. Es wird davon ausgegangen, dass die beobachteten Wirkungen den Substanzmischungen zuzuschreiben sind (Silva et al., 2002).

Suborganismische Testungen können als anfängliches Screening-Tool zur Evaluierung von Kunststoffmaterialien eingesetzt werden. Problematische Stoffe müssen jedoch grundsätzlich identifiziert werden, damit ihre Konzentrationen in Gewässersystemen routinemäßig analysiert werden können und ein Zusammenhang zum Plastikverbrauch hergestellt werden kann.

Eine vielversprechende Methode zur Identifizierung von verantwortlichen Substanzen für bestimmte Effekte in komplexen Cocktails ist die Effekt-dirigierte Analytik (EDA) (Muncke et al., 2020). Bei diesem Ansatz erfolgt eine Verringerung der Probenkomplexität. Die Probe wird dabei in einzelne Fraktionen mit vergleichsweise wenigen Substanzen aufgeteilt und anschließend werden die Fraktionen toxikologisch untersucht. Wird ein Effekt in einer Fraktion ermittelt, so können die darin enthaltenen Stoffe mittels einer chemischen Analyse detektiert und identifiziert werden. Diese Herangehensweise hat den Vorteil, bereits bekannte



sowie neuartige Verbindungen zu entdecken. Im Anschluss können die Stoffe isoliert und überprüft werden, ob diese tatsächlich für den Effekt verantwortlich sind. Mit diesem Wissen könnten Plastikprodukte nachhaltiger produziert werden, da problematische Stoffe entweder aus dem Herstellungsprozess eliminiert oder durch Alternativen ersetzt werden könnten.

Die in PLASTRAT ermittelten toxikologischen Befunde für plastikassoziierte Substanzen tragen zu der Entwicklung eines Bewertungssystems für Plastik bei, um Verbrauchern/Verbraucherinnen einen gesundheitlich unbedenklichen Gebrauch und nachhaltigeren Umgang mit Plastik zu ermöglichen.

### **Zwischenfazit**

Die Degradation von Plastik in der Umwelt ist abhängig von den einwirkenden Einflüssen wie UV-Strahlung, Temperatur und mechanischen Einwirkungen. Weiterhin können andere Stoffe (beispielsweise Schadstoffe) an der Oberfläche von Kunststoffen adsorbieren und wieder desorbieren.

Die Wirkung von Mikroplastik auf die Umwelt ist unter anderem stark abhängig von den darin enthaltenen Additiven, Hilfsmitteln und anderen Substanzen. In PLASTRAT konnte bei Biopolymeren, Recyclaten und Baumaterialien aus Kunststoffen starke toxikologische Effekte nachgewiesen werden. Aufgrund der vielfältigen Zusammensetzung jedes einzelnen Kunststoffes konnte dessen Toxizität nicht pauschal ermittelt werden. Hierfür ist die Erfassung der Toxizitäten der Einzelsubstanzen und der jeweiligen Zusammensetzung des Kunststoffs notwendig.

Die Anzahl an Additiven, Hilfsstoffen und sonstigen Substanzen, die den Basispolymeren zugesetzt werden, ist kaum überschaubar und für Verbraucher/-innen wie auch Hersteller in nachgelagerten Wertschöpfungsstufen häufig nicht transparent.



## 5 Guter und schlechter Kunststoff? Wege zum Gütesiegel?

### 5.1 Gibt es Gütesiegel für Mikroplastik zum Schutz von Gewässern?

Im Rahmen einer Defizitanalyse wurde eine Übersicht über bereits bestehende Güte-, Material- und/oder Prüfsiegel erstellt, um diese im Hinblick auf die dahinterstehenden Kriterien und Zertifizierungsprozesse zu untersuchen.

Insgesamt konnten über 80 relevante Siegel identifiziert werden, welche einen Bezug zu Plastik und/oder zu den drei in PLASTRAT betrachteten Produktgruppen (Hundekotbeutel, Fleece-Jacken, Hygieneprodukte) aufweisen. Beim Großteil der untersuchten Siegel handelte es sich um Produktsiegel, welche auf die Kommunikation zwischen Hersteller und Konsument („Business to Customer“, kurz: „B2C“) ausgerichtet sind. Material- und Prüfsiegel sowie Prüfverfahren an sich, welche primär den Herstellerbereich („Business to Business“, kurz: „B2B“) adressieren, waren demgegenüber in der Minderheit.

Die Hauptzielgruppen der untersuchten Siegel waren Endverbraucher/-innen; Hersteller und verarbeitende Betriebe stellen weitere potentielle Zielgruppen dar. Die untersuchten Siegel wiesen allgemein sehr starke Unterschiede auf und wurden im Hinblick sechs Kriterien kategorisiert, vgl. Abbildung 24.

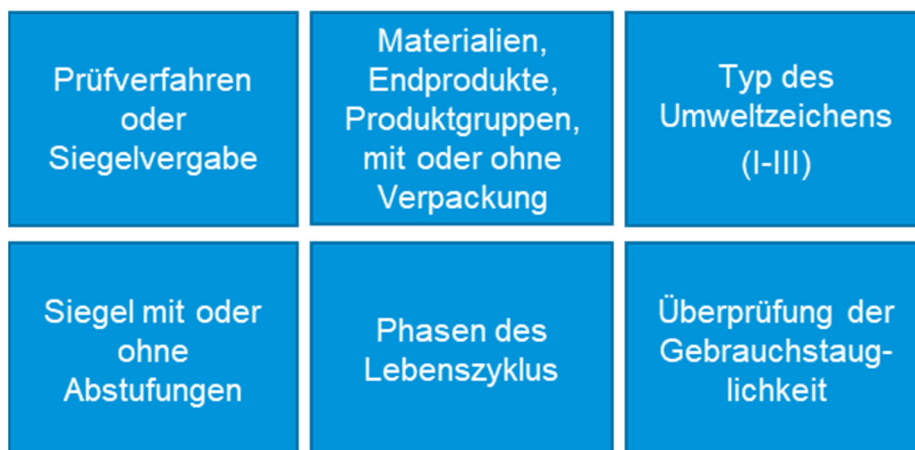


Abbildung 24: Kriterien zur Kategorisierung der Güte-, Material- und Prüfsiegel im Rahmen der Defizitanalyse (Abschlussbericht der IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, 2021)

Die Defizitanalyse zeigte, dass es bisher kein Siegel gibt, das sich explizit mit den Auswirkungen von Plastik auf limnische Systeme auseinandersetzt. Um die Auswirkungen von Mikroplastik auf die Umwelt darzustellen, ist jedoch die Betrachtung des kompletten Lebenszyklus unbedingt notwendig. Da nur drei der untersuchten Siegel den kompletten Lebenszyklus betrachten, scheint an dieser Stelle ein expliziter Handlungsbedarf zu bestehen. Auch darüber hinaus ließen sich bei genauerer Betrachtung der bestehenden Siegel, Zertifikate und Prüfungen vielfältige Anknüpfungspunkte für ein mögliches Gütesiegel zur Beurteilung der Wirkung von Kunststoffmaterialien und -produkten auf limnische System identifizieren.

## 5.2 Brauchen wir ein neues Gütesiegel?

Bevor man sich jedoch daran macht, ein Siegel mit dieser Zielsetzung zu entwickeln, gilt es zunächst zu prüfen, ob ein solches Siegel überhaupt benötigt wird, wer der Adressat (Verbraucher/-innen oder Kunststoff-/Produkthersteller) und wer Herausgeber (Politik/Verwaltung oder NGOs) eines solchen Siegels wären und welche Kriterien enthalten sein müssen, um die schädlichen Auswirkungen eines Eintrags von Mikroplastik zu reduzieren.

Ergebnisse der Defizitanalyse wurden im erweiterten Kreis der Projektpartner und Stakeholder von PLASTRAT diskutiert. Zentrale Themen der Diskussion bestanden vor allem in den Bereichen Bioabbaubarkeit, der Notwendigkeit einer Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus, der potentielle Zielgruppe(n) eines Gütesiegels und zu adressierenden Produktgruppen.

Die Diskussion unterstrich, dass sich die öffentliche Diskussion, um die Effekte von Mikroplastik auf limnische Systeme im Wesentlichen in zwei Teilaspekte gliedern lässt: (i) auf Einträge von Makroplastik und (ii) die Degradation zu sekundärem Mikroplastik. Gerade im Hinblick auf den zweiten Teilaspekt stellt das Kriterium der „Bioabbaubarkeit in Wasser“ ein elementares Bewertungskriterium dar, welches es im Rahmen eines Gütesiegels für Endprodukte oder zur Kunststoffkennzeichnung in jedem Fall zu berücksichtigen gilt. Nach Meinung der Stakeholder birgt eine alleinige Fokussierung der Bioabbaubarkeit jedoch auch das Risiko eines vermehrten Litterings und einer mangelhaften Berücksichtigung der ökotoxikologischen Effekte eines Austrags der darin eingeschlossenen Substanzen auf aquatische Systeme insgesamt. Eine Gesamtbetrachtung des Produktlebenszyklus ist hierzu zwingend erforderlich. Das europäische Konzept des „Product Environmental Footprint“ bietet hierfür gute Anknüpfungspunkte.

Da toxikologisch unerwünschte Wirkungen von Mikroplastikpartikeln zumeist erst durch die Zugabe von Additiven verursacht werden, sollte ein Aspekt auf der Betrachtung von Additiven liegen. Dass die Anzahl bzw. der Einsatz von Additiven in Polymeren allerdings von Polymer zu Polymer unterschiedlich und auch nicht von Herstellerseite anzugeben ist (Betriebsgeheimnis), erweist sich jedoch als primär zu überwindendes Hemmnis. Bedarf für ein B2B-Siegel zur gezielten Steuerung der Beschaffungsprozesse entlang der Produktwertschöpfungskette wurde von Vertretern der chemischen (Grundstoff-)Industrie jedoch nicht gesehen, da die Informationswege innerhalb der Wertschöpfungsketten bereits heute ein hohes Maß an Transparenz aufweisen. So verfügen Hersteller der chemischen Industrie vielfältig über unternehmensspezifisch erarbeitete Fragebögen, in denen Einkäufer bestimmte Fragen zu Materialeigenschaften an die Vorlieferanten stellen. Die Information erfolgt somit nicht über Siegel, sondern über individuelle Kriterien, die auch in der Regel nicht nach außen getragen werden. Allerdings wird über die Fragebögen zum Teil ein Nachweis über Prüfsiegel und die Bereitstellung weiterführender Informationen explizit eingefordert. Dennoch bleibt das Problem des unzureichenden Informationsflusses zwischen Produktherstellern und Verbrauchern/Verbraucherinnen bestehen (vgl. Kapitel 6.3).

Ein Ausschluss einzelner, besonders schädlicher Additive kann nur durch äußerst aufwendige Kontrollen erfolgen und ist demnach für ein Siegel aller Voraussicht nach nicht umsetzungsfähig, wenngleich aus Sicht der Branchenexpertinnen und -experten ein

Verzicht auf nicht nutzungseinschränkende Additive (z. B. Farbstoff in blauen Wasserflaschen) durchaus möglich und sinnvoll erscheint. Um eine Siegelvergabe aufgrund der Additive bzw. Zusammensetzung der Polymere zu erreichen ohne Betriebsgeheimnisse zu verraten, wäre eine Anlehnung an die Deklarationspflicht der Lebensmittelrichtlinie denkbar. Dies würde ermöglichen, die einzelnen Bestandteile, aber nicht die genaue Zusammensetzung darzustellen und basierend darauf ein Siegel zu vergeben, das gewisse Additive ausschließt oder die Anzahl an Additiven begrenzt. Die Ausschlusskriterien für einzelne Additive sollten dabei idealerweise derart gestaltet sein, dass auf Additive mit hohem ökotoxikologischen Belastungspotenzial ein besonderer Fokus gelenkt wird.

Aufgrund der hohen Komplexität der Additivthematik wurde von den Stakeholdern eine produkt(gruppen)spezifische Betrachtung bei der Umsetzung eines Gütesiegels als zwingend notwendig erachtet. Hierbei sollte in erster Linie an die bereits vielfältigen, bestehenden Güte-, Material- und Prüfsiegel angeknüpft und diese um weitere themenrelevante Kriterien ergänzt werden. Der Bedarf für ein neues Gütesiegel zur Klassifizierung von Endprodukten oder Kunststoffmaterialien im Hinblick auf deren Wirkung auf limnische Systeme wurde nicht gesehen.



*Abbildung 25: Diskussion bei einem PLASTRAT-Stakeholderworkshop am 24.09.2019 in Frankfurt am Main (Abschlussbericht des ISOE, 2021)*

Für die breite Produktgruppe „Textilien“ wurde diese Diskussion deshalb einmal exemplarisch mit Stakeholdern aus dieser Branche fortgeführt. Dabei wurde deutlich, dass Mikroplastik für fast alle der anwesenden Stakeholder aus dem Textilsektor ein relevantes Thema ist, für die meisten jedoch kein vordringliches Problem darstellt. Vielmehr sehen die chemische Industrie, Verbraucherorganisationen und Hausgerätehersteller andere Themen (Makroplastik, Lebensmittelverpackung, Kosmetikprodukte) als dringlicher an. Allgemein bestand jedoch Konsens darüber, dass branchenspezifische Problemstellungen, wie z. B. eine mangelnde, durchgängige Informationsbasis bzw. Transparenz über den Produktionsprozess vom Ausgangsrohstoff bis zum Endprodukt, dringend angegangen werden sollten. Darüber hinaus äußerten sich die Stakeholder positiv gegenüber der Idee eines europäischen Standards für ein Gütesiegel, wenngleich zu erwarten ist, dass die gemeinsame Definition von Kriterien ein schwieriger Prozess ist. Als ein mögliches Kriterium wurde der Faserverlust beim Gebrauch der Textilien in die Diskussion gebracht. Allerdings fehlten

bislang geeignete Standards und Testverfahren. Eine zeitnahe Einführung eines solchen Siegels oder auch regulatorischer Maßnahmen wurde aufgrund der Erfahrungen in anderen Standardisierungsprozessen daher nicht für realistisch gehalten.

### **5.3 Wie kann man Kunststoffe hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit für limnische Systeme umfassend bewerten?**

Um die Frage nach den Möglichkeiten zur Unterscheidung „guter“ von „schlechten“ Kunststoffen zu beantworten und somit auch mögliche Kriterien zur Ergänzung bestehender Güte-, Material- und Prüfsiegel ableiten zu können, bedarf es zunächst der Beantwortung der Frage, was im Hinblick auf den Eintrag limnischer Systeme überhaupt einen „guten“ von einem „schlechten“ Kunststoff unterscheidet. Auf Basis der Projektergebnisse von PLASTRAT, lässt sich zusammenfassend festhalten, dass sich diese Frage im Wesentlichen anhand der folgenden Faktoren beantworten lässt:

- Mengenmäßiger Eintrag über die verschiedenen Eintragspfade
- Degradation und stoffliche Dynamik
- (Technische) Möglichkeiten zur Elimination aus dem Wasserkreislauf
- Human- und ökotoxikologische Effekte
- Sonstige Umwelteffekte

Eine reine Fokussierung der Bewertung auf diese potentiell negativen Effekte von (Mikro-) Plastik auf limnische Systeme und die weiteren Umweltkompartimente birgt allerdings die Gefahr, dass die nutzenstiftenden Aspekte der Kunststoffnutzung sowie auch die negativen Effekte, welche die Nutzung alternativer Rohstoffe mit sich bringen würden, schlichtweg vernachlässigt werden. Für die Kriterienentwicklung wurden deshalb vier weitere Bewertungsdimensionen hinzugezogen, um diese identifizierte Lücke für eine ganzheitliche Betrachtung zu schließen:

- (Praktischer) Nutzen für Verbraucher/-innen und Gesellschaft
- Nutzungs- und Entsorgungspraktiken
- Kosten der Materialherstellung
- Entsorgung und Elimination

Der Fokus bei der Zusammenstellung möglicher Bewertungskriterien zu jeder der neun Bewertungsdimensionen sowie korrespondierender Parameter und Indikatoren zur Messung zielte in erster Linie auf die Identifikation von Kriterien ab, die eine (i) Beurteilung von Kunststoffmaterialien bezüglich ihrer Umweltverträglichkeit für das limnische System, (ii) eine Identifikation von anwendungsbezogenen Vor- und Nachteilen der einzelnen Kunststoffmaterialien und (iii) eine vergleichenden Betrachtung verschiedener Kunststoffmaterialien ermöglichen, ab. Hierbei zeigte sich jedoch, dass bestimmte Kriterien(gruppen) grundsätzlich weniger materialspezifisch sind als vielmehr von Kontextfaktoren der späteren Nutzung abhängen und somit eher produktspezifisch anzusehen sind. Wiederum andere Kriterien weisen eine starke Abhängigkeit von der

quantitativen Nutzung auf und können somit als eher mengen- und größenorientiert bzw. materialunabhängig deklariert werden (vgl. Abbildung 26).

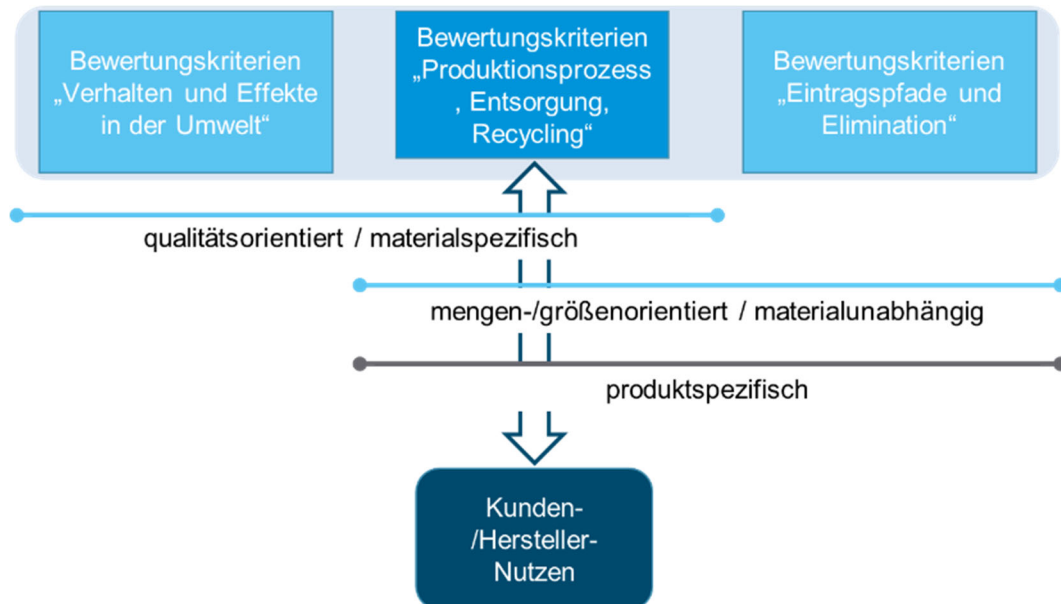


Abbildung 26: In PLASTRAT erarbeitete Möglichkeit zur Klassifizierung von Kriterien zur Materialbewertung (Abschlussbericht der IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, 2021)

Im Ergebnis ergab sich hieraus auf Basis einer Literaturrecherche eine umfassende Kriterienliste mit insgesamt 67 Kriterien, welche im Rahmen eines Workshops erneut mit Experten verschiedener Fachgebiete diskutiert und auf die Kriterien in Abbildung 27 kondensiert wurde.

Ein Vergleich unterschiedlicher Materialien kann auf Basis dieser Kriterien ausschließlich im paarweisen Vergleich erfolgen. Die Kriterien sollten hierzu idealerweise auf eine einheitliche funktionale Einheit, wie den Produktnutzen oder aber die Produkt- oder Materiallebensdauer bezogen werden.



Abbildung 27: Kriterien zur Bewertung der Wirkung von Kunststoffmaterialien (mit besonderem Fokus auf Wirkungen auf limnische Systeme) (Abschlussbericht der IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, 2021)

### Zwischenfazit

Wenngleich bereits eine Vielzahl an Güte-, Material- und Prüfsiegeln für Kunststoffmaterialien, -produkte oder -produktgruppen existiert, gibt es bisher kein Siegel, das sich explizit mit den Auswirkungen von Plastik auf limnische Systeme auseinandersetzt.

Die Umweltverträglichkeit von Kunststoffen lässt sich nur durch eine integrierte Betrachtung verschiedener Kriterien bewerten. Hierzu zählen der mengenmäßige Eintrag über die verschiedenen Eintragspfade, das Degradationsverhalten und die stoffliche Dynamik, die (technischen) Möglichkeiten zur Elimination aus dem Wasserkreislauf sowie die human- und ökotoxikologischen Effekte.

Komplementär sollten aber auch sozioökonomische Aspekte, wie der (praktische) Gebrauchswert für Verbraucher/-innen und Gesellschaft, Nutzungs- und Entsorgungspraktiken sowie die Kosten der Materialherstellung berücksichtigt werden.

Für ein neues Gütesiegel zur Klassifizierung von Endprodukten oder Kunststoffmaterialien im Hinblick auf deren Wirkung auf limnische Systeme wird allerdings allgemein kein Bedarf gesehen. Vielmehr sollte eine Gütesiegelvergabe auf Basis der Zusammensetzung der Polymere oder im Hinblick auf den Ausschluss besonders umwelt- und gesundheitsschädigender Additive erfolgen.



## 6 Welche Handlungsspielräume gibt es für Verbraucher/-innen?

### 6.1 Wie bewerten Verbraucher/-innen die Gefährdung durch Mikroplastik?

Generell gibt es in der Bevölkerung ein breites Problembewusstsein über die Umweltwirkungen von Mikroplastik. Auch das Thema Mikroplastik in Gewässern ist in der Bevölkerung sehr präsent. In einer repräsentativen Erhebung wurden 2.000 Verbraucher/-innen befragt. Knapp 90 % der Interviewten äußerten, schon einmal etwas von diesem Thema gehört zu haben. Viele sind davon überzeugt, dass Mikroplastik die Umwelt erheblich schädigen kann: Etwa 90 % der Befragten geben an, dass Mikroplastik eine große oder sehr große Wirkung auf die Umwelt hat. Lediglich acht Prozent schätzen die Wirkung als gering bis nicht vorhanden ein (Stieß et al., 2021).

Trotz dieser hohen Zustimmung zeigen sich sehr unterschiedliche Einstellungsmuster, mit denen die Problematik von Mikroplastik in Gewässern wahrgenommen wird, vgl. Abbildung 28.

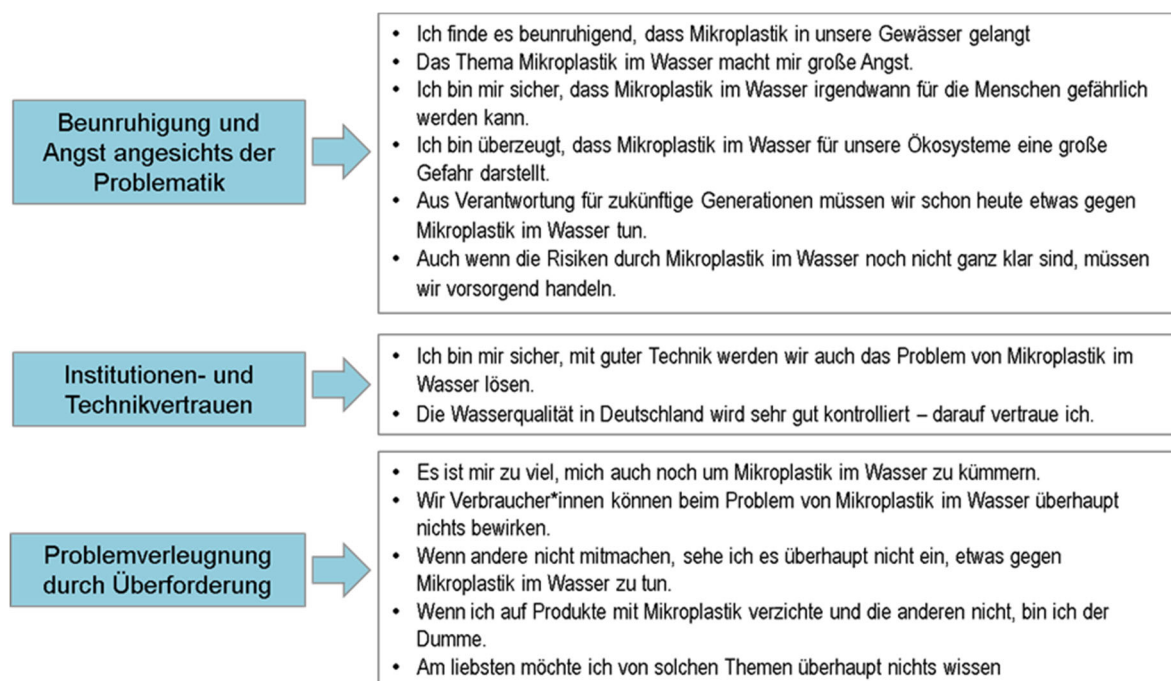


Abbildung 28: Einstellungsmuster zu Umweltgefährdungen durch Mikroplastik (Stieß et al., 2021)

Eine überwiegende Mehrheit zeigt ein ausgeprägtes Problembewusstsein: Um die 50 % der Befragten sind voll und ganz und weitere 40 % eher der Überzeugung, dass Mikroplastik im Wasser eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellt. Ähnlich stark ausgeprägt ist die emotionale Betroffenheit, die mit dieser Überzeugung einhergeht: Viele sind durch die Gefährdungen durch Mikroplastik beunruhigt. Eine vorsorgeorientierte Haltung, dass etwas gegen Mikroplastik im Wasser getan werden muss, auch wenn die Gefahren jetzt noch nicht ganz klar sind, erfährt eine hohe Zustimmung.

Neben diesem verbreiteten Problembewusstsein lassen sich aber auch zwei Einstellungsmuster beobachten, bei denen die Dringlichkeit des Problems eher relativiert bzw. zurückgewiesen wird. So gibt es eine relativ starke Tendenz, die Gefährdung durch Mikroplastik auf Grundlage von Institutionen- und Technikvertrauen zu relativieren. Dies kommt beispielsweise in der Zuversicht zum Ausdruck, dass die durch Mikroplastik verursachten Probleme durch Technik gelöst werden können oder dass die hohen Standards für die Überwachung der Trinkwasserqualität in Deutschland Gesundheitsgefährdungen durch Mikroplastik verhindern. Knapp 20 % stimmen diesen Ansichten voll und ganz und jeweils um die 50 % eher zu.

Ein weiteres Reaktionsmuster, sich mit der Mikroplastik-Problematik auseinanderzusetzen, kann am besten als „Problemverleugnung durch Überforderung“ bezeichnet werden. Etwa 5 % der Befragten stimmen voll und ganz zu (und weitere 20 % eher zu), dass sie sich vom Thema Mikroplastik in Gewässern überfordert fühlen oder sind der Ansicht, als Verbraucher/-innen nichts zur Lösung dieser Problematik beitragen zu können. Etwa ebenso viele erklären, dass sie nur dann bereit sind etwas zu tun, wenn auch andere (Hersteller, Politik) etwas unternehmen. Etwa 15 % sind der Ansicht, dass Mikroplastik im Wasser keine Gefährdung darstellt.

## **6.2 Inwiefern sind Verbraucher/-innen bereit, einen Beitrag zur Verringerung des Eintrags von Mikroplastik in die Umwelt zu leisten?**

Konsumpraktiken können auf unterschiedliche Weise zum Eintrag von Mikroplastik in die Umwelt beitragen. Der Eintrag kann direkt durch Produkte erfolgen, die Mikroplastik enthalten, oder Mikroplastik entsteht im Zusammenhang mit der Nutzung von Produkten oder durch den Abbau von Makroplastik bei deren Entsorgung. Je nachdem, auf welche Art und Weise der Eintrag erfolgt, unterscheiden sich die Handlungsmöglichkeiten und die Bereitschaft der Verbraucher/-innen ihre Konsumpraktiken zu ändern. Dies wurde am Beispiel ausgewählter Produktgruppen mit Hilfe sozialempririscher Befragungen untersucht.

### **Kosmetikprodukte**

Kosmetikprodukte werden häufig als Quelle für den Eintrag von Mikroplastik genannt. Mikroplastik kann dabei als Partikel oder auch in gelöster Form in den Produkten enthalten sein (Bertling et al., 2018). Kosmetikhersteller haben auf die anhaltende Kritik mit einer freiwilligen Selbstverpflichtung zur Reduzierung von Mikroplastik in Kosmetik reagiert. Demnach sollte bis zum Jahr 2020 kein partikelförmiges Mikroplastik mehr in Kosmetika verwendet werden. Allerdings sind Mikroplastik, das keine Peeling-Funktion hat, Leave-on-Kosmetikprodukte sowie gelöste, gelartige oder wachsartige Polymere bisher von der Verpflichtung ausgenommen.

Gut ein Drittel der Bevölkerung verwendet zumindest gelegentlich Peelings. Dass Peeling-Produkte Mikroplastik enthalten können, ist einer Mehrheit der Befragten, die Peelings nutzen, bekannt. Knapp 60 % haben davon bereits gehört.



Entscheidende Kriterien beim Kauf von Peelings sind Gesundheitsaspekte: Die Hautverträglichkeit des Peelings bewerten 70 % als sehr wichtig. An zweiter Stelle rangieren die Kriterien „Inhaltsstoffe“ und „frei von Mikroplastik“ (jeweils 47 % sehr wichtig). Auffällig ist jedoch, dass eine hohe Unsicherheit besteht, ob das eigene Peeling diesen Ansprüchen genügt. Ein gutes Drittel der Befragten ist sich sicher, dass ihr Peeling kein Mikroplastik enthält, während über die Hälfte angibt, dies nicht genau zu wissen.

Um zu verhindern, dass Mikroplastik durch Peelings ins Wasser gelangt, ist es für knapp zwei Drittel der Nutzer/-innen eine offensichtlich einfache und naheliegende Lösung, keine Peelings zu verwenden, die Mikroplastik enthalten. Auf Peelings ganz zu verzichten, kommt jedoch nur für sehr wenige in Frage. Weitaus häufiger genannt wird die Möglichkeit, ein Peeling selber herzustellen. Dies kommt für 32 % ganz sicher in Frage. Die Möglichkeit, seltener Peelings zu verwenden, ist dagegen weniger attraktiv und kommt nur für 17 % ganz sicher in Betracht.

### **Feuchtes Toilettenpapier**

Die Nutzung von feuchtem Toilettenpapier hat in den vergangenen Jahren erheblich an Attraktivität gewonnen. Gut 40 % der Befragten geben an, diese Produktgruppe zumindest gelegentlich zu nutzen. Bei der Entsorgung von feuchtem Toilettenpapier kann es zu Verstopfungen von Pumpen und Verzopfungen von Rührwerken kommen. Dass dabei auch Mikroplastik freigesetzt werden kann, ist nur wenigen bekannt. Fast zwei Drittel der Nutzer/-innen von feuchtem Toilettenpapier haben von dieser Problematik noch nichts gehört. Fast drei Viertel gehen davon aus, dass sich feuchtes Toilettenpapier in der Kanalisation auflöst. Knapp die Hälfte hält das Problem für eher vernachlässigbar.

Zentrale Anforderung an feuchtes Toilettenpapier ist dessen Hautverträglichkeit, die nahezu allen Befragten wichtig oder sehr wichtig ist. Daneben wird großer Wert auf die Reißfestigkeit, aber auch an ein günstiges Preisniveau gelegt. Auch Umweltfreundlichkeit spielt eine wichtige Rolle, wobei insbesondere das Kriterium, dass das Produkt biologisch abbaubar sein soll, von Bedeutung ist: Etwa 30 % finden dies sehr wichtig und weitere knapp 50 % sehen dies als wichtig an.

Entsorgt wird feuchtes Toilettenpapier in der Regel über die Toilette. Ein nicht unerheblicher Teil der Nutzer/-innen (38 %) entsorgt die Tücher zumindest gelegentlich im Restmüll. Diese Entsorgungsroutinen sind offensichtlich fest im Alltag verankert. Lediglich ein Viertel der Befragten wäre bereit, feuchtes Toilettenpapier konsequent über den Restmüll zu entsorgen. Informationskampagnen für eine Veränderung von Entsorgungspraktiken dürften daher nur wenig Erfolg haben.

### **Fleece-Bekleidung**

Schätzungen gehen davon aus, dass etwa zwei Prozent der Freisetzung von Mikroplastik auf den Abrieb von Fasern bei der Wäsche zurückgeht. Der größte Anteil entfällt auf das Waschen von Wäsche in privaten Haushalten (Bertling et al., 2018).

Fleece-Bekleidung ist weit verbreitet und ein Beispiel für synthetische Textilien, die beim Waschen Fasern freisetzen. Über die Hälfte der Befragten besitzen eine oder mehrere Kleidungsstücke aus Fleece. Als typische Outdoor-Bekleidung werden Jacken und Pullover aus

Fleece vielfach mit Naturnähe in Verbindung gebracht. Langlebigkeit und die zunehmende Verwendung von Recyclingmaterialien tragen ebenfalls dazu bei, dass Fleece-Textilien häufig ein umweltfreundliches Image haben. Dass Fleece-Bekleidung beim Waschen Mikroplastik freisetzt, ist vergleichsweise wenig bekannt: Knapp 60 % der befragten Nutzer/-innen von Fleece-Textilien geben an, von diesem Zusammenhang noch nichts gehört zu haben.

Bei den Handlungsmöglichkeiten besteht vor allem die Bereitschaft, Fleece-Bekleidung seltener zu waschen. Über die Hälfte der Nutzer/-innen ist bereit, dies zu tun. Deutlich weniger (33 %) können sich vorstellen, künftig nur noch Textilien aus Naturfasern zu nutzen. Waschbeutel, die feine Partikel während der Wäsche zurückhalten, ist für etwa ein Viertel eine mögliche Alternative.

### **Hundekotbeutel**

Ca. 250.000.000 Hundekotbeutel werden jährlich von deutschen Städten und Gemeinden ausgegeben. Das entspricht knapp vier Prozent aller Plastiktüten in Deutschland. Der überwiegende Teil der Beutel besteht aus herkömmlichem Plastik und ist somit nicht abbaubar und kann über lange Zeit ein Umweltproblem darstellen. Hundekotbeutel werden häufig mutwillig falsch entsorgt und gelangen so in Grünanlagen und Gewässer.

Über 25 % der Befragten nutzen zumindest gelegentlich Hundekotbeutel. Für die Nutzer/-innen von Hundekotbeutel ist Materialbeständigkeit die wichtigste Eigenschaft: Hundekotbeutel sollen verlässlich reißfest und nicht zu dünn sein. Zugleich geben 80 % der Nutzer/-innen an, dass es ihnen sehr wichtig oder wichtig ist, dass Hundekotbeutel aus biologisch abbaubarem Material bestehen. Dies mag damit zusammenhängen, dass Hundekotbeutel vor allem in Grünanlagen zum Einsatz kommen. Dass Hundekotbeutel zur Quelle von Mikroplastik werden können, ist der Mehrheit der Nutzer/-innen bekannt: Über 60 % haben bereits von Mikroplastik und der Hundekotbeutelproblematik gehört, das Thema wird von den meisten als sehr wichtig oder wichtig eingeschätzt wird.

Als wichtigste Maßnahmen gegen eine wilde Entsorgung von Hundekotbeuteln werden gut zugängliche Entsorgungsmöglichkeiten genannt. Eine große Mehrheit spricht sich dafür aus, mehr Mülleimer an den richtigen Stellen aufzustellen. Ebenfalls häufig genannt wird die Verwendung von Hundekotbeuteln aus bioabbaubarem Material. Diese Maßnahme halten knapp 60 % der Nutzer/-innen für (sehr) wichtig. Allerdings sind die Vorstellungen, was damit genau gemeint ist, eher vage. Erhebliche Unsicherheit besteht auch im Hinblick darauf, woran ein bioabbaubares Produkt erkannt werden kann.

### **6.3 Wen sehen Verbraucher/-innen in der Pflicht?**

In vielen Berichten über Mikroplastik stehen Verbraucher/-innen als Verursacher und als Verantwortliche für die Lösung dieses Umweltproblems im Mittelpunkt. Verbraucher/-innen werden angehalten, ihre Nutzungs- und Entsorgungspraktiken zu ändern, damit weniger Mikroplastik in die Umwelt gelangt. Ausgeblendet wird dabei aber, dass es weitere Akteure wie Hersteller, Entsorger oder Regulierer gibt, die Einfluss auf die Mikroplastikproblematik

nehmen können. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie Verbraucher/-innen ihre Verantwortung in Beziehung zu diesen Akteuren sehen. Das Ergebnis ist eindeutig: Bei den meisten der untersuchten Produkte werden Hersteller am stärksten in der Verantwortung gesehen, etwas für die Vermeidung von Mikroplastikeinträgen in Gewässer zu tun. Etwas weniger häufig werden die Politik und die Verbraucher/-innen selbst als Verantwortliche genannt. Auffällig ist, dass Kläranlagenbetreiber nur selten als Verantwortliche erwähnt werden. Die einzige Ausnahme sind Hundekotbeutel. Hier sehen sich Verbraucher/-innen am stärksten in der Pflicht. An zweiter Stelle werden die Hersteller genannt.

Dies zeigt, dass Verbraucher/-innen bereit sind, bei der Lösung der Mikroplastik Problematik einen Beitrag zu leisten, sie erwarten aber von der Industrie Transparenz und umweltfreundliche Produkte. Auch Regularien durch den Gesetzgeber, vor allem gegenüber den Herstellern haben eine Bedeutung. „End-of-Pipe“ Lösungen durch z. B. Wasseraufbereitungstechnologien werden nur von einer Minderheit als Problemlösung gesehen.

Deutlich wird auch, dass Verbraucher/-innen trotz des hohen Problembewusstseins die eigenen Handlungsmöglichkeiten - je nach Produktgruppe - sehr unterschiedlich einschätzen. Eine Veränderung von Nutzungs- und Entsorgungspraktiken erscheint am ehesten dann als akzeptabel, wenn, wie bei Peelings, ein direkter Beitrag des eigenen Verhaltens zum Eintrag von Mikroplastik erkennbar ist und praktikable Alternativen verfügbar sind. Auffällig ist auch, dass der eigene Beitrag zum Eintrag von Mikroplastik nur sehr selektiv bezogen auf bestimmte Produktgruppen bekannt ist. Offensichtlich gibt es ein Gefälle zwischen der allgemeinen Problemwahrnehmung von Mikroplastik in Gewässern und dem Wissen über konkrete Praktiken, Eintragspfade und Handlungsmöglichkeiten.

Hinzu kommt, dass die Aussagefähigkeit bestehender Produkt-, Material- und Gütesiegel für Verbraucher/-innen teils unklar oder sogar missverständlich ist. So beziehen sich Label wie „frei von Mikroplastik“ nur auf primäres Mikroplastik und geben keine Auskunft über die Wirkungen von chemischen Abbauprodukten in der Umwelt. Bestehende Produkt-, Material- und Gütesiegel berücksichtigen die Wirkungen von Mikroplastik auf limnische Systeme nur unzureichend. Dies gilt auch für das Kriterium Bioabbaubarkeit. Dies macht es schwer, weniger umweltbelastende Produktalternativen zu erkennen.

Umweltzeichen und Gütesiegel sind wichtige Instrumente der Produktpolitik, um Wissen über umweltrelevante Eigenschaften von Produkten und Dienstleistungen in Kurzform zu vermitteln. Daher wurde untersucht, ob ein Umweltsiegel aus Sicht von Verbraucher/-innen ein hilfreiches Instrument bei der Wahl weniger umweltbelastender Produkte sein könnte und welche Anforderungen an die Ausgestaltung eines solchen Siegels bestehen. Eine Mehrheit der Befragten würde ein Umweltsiegel als Entscheidungshilfe begrüßen. Die meisten von ihnen würden ein spezifisches Mikroplastik-Label befürworten, aber auch ein Mehrfach-Label findet eine relativ breite Akzeptanz. Angesichts der Heterogenität der betrachteten Praktiken und Produkte erscheint ein übergreifendes Siegel mit einer einheitlichen

Botschaft allerdings nur schwer realisierbar. Zudem würde ein solches Umweltzeichen bestehende Wissensbedarfe nur zum Teil abdecken und vor allem bei solchen Produkten zur Anwendung kommen können, die primäres Mikroplastik (nicht) enthalten oder freisetzen. Angesichts der Vielzahl von Labels stellt sich dabei die Frage, wie Transparenz über die Kriterien hergestellt werden kann. Daraus kann gefolgert werden, dass ein Umweltzeichen zudem bestenfalls ein Baustein einer umfassenden Kommunikation für die Zielgruppe der Verbraucher/-innen zum Thema Mikroplastik sein könnte.

### **Zwischenfazit**

Mikroplastik in Gewässern wird in der Bevölkerung als ein wichtiges Umweltproblem wahrgenommen. Fast alle haben schon einmal von diesem Thema gehört. Eine Mehrheit ist besorgt, dass Mikroplastik in Gewässern eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellt.

Die eigene Handlungsbereitschaft der Verbraucher/-innen wird stark an die Handlungsbereitschaft von Politik und Herstellern geknüpft. Veränderte Nutzungs- und Entsorgungspraktiken werden am ehesten in Betracht gezogen, wenn der Beitrag des eigenen Handelns gut nachvollziehbar ist und praktikable Alternativen verfügbar sind. Transparente und leichtverständliche Gütesiegel würden als Entscheidungshilfe begrüßt, müssten aber durch weitere Informationsangebote ergänzt werden.

## 7 PLASTRAT - Was nun?

Aus den vorangegangenen Ausführungen und der aktuellen öffentlichen Diskussion wird deutlich, dass noch viele offene Fragen zum Thema Mikroplastik existieren oder auch bereits verfügbare Konzepte und Ansätze bislang nur unzureichend Einzug in die Praxis gehalten haben. Zur erfolgreichen Umsetzung des Vorhabens einer Verminderung des Eintrags von urbanem Plastik in limnische Systeme bedarf es der aktiven Unterstützung vieler verschiedener Akteure aus Wissenschaft, Bevölkerung, Industrie, Kommunalverwaltung, Regulationsbehörden und (Ab-)Wasserwirtschaft.

Nachfolgend werden einige exemplarische Handlungsfelder aufgezeigt, welche unmittelbar aus den Projektarbeiten und den begleitenden Gesprächen mit Vertretern der verschiedenen Stakeholdergruppen resultieren.

### Was kann die Wissenschaft tun?

Nun in erster Linie: forschen, forschen, forschen! Denn in den meisten der vorangegangenen Themenfeldern konnte ausgewiesen werden, dass noch ein großes Wissensdefizit in Bezug auf die Eintragspfade und Wirkung von Mikroplastik in limnischen Systemen bestehen. Dieses wissenschaftliche Defizit lässt sich unter anderem in folgenden Bereichen erkennen:



#### **Degradationsprozesse, Verwitterung von Kunststoffen und Additiven auf molekularer Ebene sowie Entstehung und Freisetzung neuer Verbindungen**

Die PLASTRAT-Arbeiten haben gezeigt, dass die Degradation von Plastik in der Umwelt von einer Vielzahl einwirkender Einflüsse wie UV-Strahlung, Temperatur und mechanischen Einwirkungen abhängig ist. Leider ist es nur unzureichend möglich, diese Einflussfaktoren zu differenzieren und quantifizieren. Zukünftige Forschungsvorhaben sollten sich deshalb vermehrt mit den Degradationsprozessen, Prozessen der Verwitterung von Kunststoffen und Additiven auf molekularer Ebene sowie Entstehung und Freisetzung neuer toxikologisch relevanter Verbindungen auseinandersetzen. Konkret bedarf es der verbesserten Erfassung der Verwitterungsprozesse von Kunststoffen unter standardisierten Testbedingungen und der Entwicklung von Alterungsmodellen zur Abschätzung langfristiger Umweltbelastungen durch Mikroplastik-Emissionen.



#### **Durchführung von Langzeitstudien zu den toxikologischen Wirkungen von Mikroplastik und darin enthaltenen Substanzen in der Umwelt**

Toxikologische Wirkungen von Mikroplastik können durch das Auslaugen darin enthaltener Substanzen wie Additive während des Degradationsprozesses und auch durch die Aufnahme der Mikroplastikpartikel selbst resultieren. Die meisten verfügbaren toxikologischen Ergebnisse stellen eine Momentaufnahme dar, belastbare Ergebnisse zu langfristigen gesundheitlichen Folgen liegen nur in sehr begrenztem Ausmaß vor.



### **Optimierung der Methoden und Technologien zur Substanzdetektion und -identifikation**

Basispolymeren werden verschiedene Additive entlang der Wertschöpfungskette zugesetzt. Eine jede Additivklasse beinhaltet eine große Anzahl an unterschiedlichen chemischen Verbindungsklassen, Substanzen und Substanzgemischen, die eine hohe Relevanz für die human- und ökotoxikologische Bewertung der Kunststoffe haben können. Bestehende Methoden der Substanzdetektion und -identifikation gestalten sich sehr zeit- und kostenintensiv, zudem ist eine vollumfängliche Stoffidentifikation nicht möglich, weshalb an dieser Stelle noch erheblicher Optimierungsbedarf besteht.



### **Harmonisierung und Standardisierung von Verfahren zur Probenaufarbeitung und Analyse**

Erste Ansätze zur Standardisierung der Verfahren zur Probenaufbereitung wurden bereits in Querschnittsthemen von „Plastik in der Umwelt“ vorgeschlagen. PLASTRAT hat zu deren Entwicklung aktiv beigetragen. Diese Aktivitäten gilt es nun in den entsprechenden Arbeitskreisen und Normierungsgremien auf nationaler und internationaler Ebene fortzusetzen und in verbindliche Normen und Richtlinien zu überführen. Zusätzlicher Mehrwert einer Standardisierung könnte in einer Optimierung der Analyseverfahren und -prozesse liegen. An dieser Stelle sind Wissenschaft und Hersteller gemeinsam gefragt, zeit- und kostenoptimierte Analyseverfahren zu konzipieren.



### **Durchführung von Messkampagnen zur Bilanzierung von Mikroplastikeinträgen entlang der einzelnen Eintragspfade**

Die direkten und diffusen Eintragspfade von Mikroplastik in die Umwelt sind weitestgehend bekannt. Eine mengenbezogene Bilanzierung, welche eine belastbare Einschätzung der Umweltkonzentrationen und damit verbundener Risikopotenziale ermöglichen würde, steht bislang jedoch nicht zur Verfügung.

## **Was können Verbraucher/-innen tun?**

Die Befragung der Verbraucher/-innen hat gezeigt, dass Mikroplastik in der Bevölkerung als ein wichtiges Umweltproblem angesehen wird. Viele Verbraucher/-innen sind bereit, durch ihr eigenes Verhalten einen Beitrag zur Lösung dieser Problematik zu leisten.



### **Bewusster Umgang mit Kunststoffmaterialien**

Konsumenten und Konsumentinnen können über eine Veränderung der eigenen Routinen im Umgang mit mikroplastikemittierenden Produkten dazu beitragen, dass weniger Mikroplastik in limnische Systeme gelangt. Beispiele hierfür sind der Verzicht auf Kosmetika, die Mikroplastik enthalten, alternative Praktiken zum Reinigen von Kunstfasertextilien (Lüften statt Waschen) oder ein verringertes Littering durch ordnungsgemäße Entsorgung von Hundekotbeuteln. Allerdings haben Konsument/-innen in vielen Fällen nur begrenzte Handlungsmöglichkeiten, da die Inhaltsstoffe von Produkten nicht bekannt sind oder bestehende Alternativen, wie die Nutzung von Waschbeuteln, nur schwer mit bestehenden Alltagsroutinen in Einklang

gebracht werden können. Hinzu kommt, dass vermeintlich umweltfreundliche Handlungsoptionen, wie die Verwendung von Produkten aus bioabbaubarem Kunststoff, selbst wieder problematische Umweltwirkungen haben können.



### **Bessere Information von Verbraucher/-innen**

Um Konsumenten und Konsumentinnen zu einem bewussteren Umgang mit Kunststoffprodukten und -materialien zu bewegen, bedarf es einer umfassenden, zielgruppenspezifisch differenzierten Kommunikationsstrategie zu Mikroplastik in limnischen Systemen. Eine solche Kommunikationsstrategie sollte aufzeigen, in welchen Bereichen Verbraucher/-innen tatsächlich relevante Handlungsmöglichkeiten haben, einen nennenswerten Beitrag zur Verringerung des Eintrags von Mikroplastik in Gewässer zu leisten. Dabei sollte gezielt auf Produkte hingewiesen werden, die aus vergleichsweise unbedenklichen Materialien bestehen. Darüber hinaus sollten alternative Praktiken für die Pflege und Entsorgung von Plastikprodukten kommuniziert werden, die sich gut in bestehende Alltagsroutinen einpassen lassen. Absender einer solchen Kommunikationskampagne können Politik, Hersteller und Umweltverbände gleichermaßen sein.

## **Was können Hersteller tun?**

Eine umfassende Reduzierung des Eintrags von Mikroplastik und der darin enthaltenen Additive in limnische Systeme sollte bereits im Herstellungsprozess der Kunststoffmaterialien und Produkte ansetzen. Neben einer konsequenten Umsetzung der Vorgaben und ergänzender branchenspezifischer Normen und Standards, können auf Basis der Projektergebnisse von PLASTRAT folgende Handlungsempfehlungen für Hersteller abgeleitet werden:



### **Verminderung des Einsatzes schädlicher Additive und Prozesschemikalien**

Ein zentraler Ansatzpunkt für Hersteller und Produzenten besteht im verminderten Einsatz und der bewussten Auswahl eingesetzter Additive nach umwelt- und humantoxikologischen Gesichtspunkten (z. B. geringe Toxizität, gute Abbaubarkeit). Auch der gesetzliche Rahmen für den Einsatz von Chemikalien in Kunststoffen sollte ausgebaut und der Einsatz von Additiven und Hilfsstoffen bei der Produktion stärker überwacht werden. Der Zusatz unerwünschter Chemikalien im Zuge des Herstellungsprozesses von Kunststoffen könnte u. a. dadurch minimiert werden, dass „Positivlisten“ mit toxikologisch unbedenklichen Chemikalien erstellt und für Hersteller verpflichtend gemacht werden.



### **Nachhaltiges Produktdesign**

Hersteller sollten ihre Produkte derart gestalten, dass sie mit den gängigen Normen und Richtlinien des umweltgerechten Produktdesigns konform gehen. Ein besonderes Augenmerk sollte dabei auf die Nutzung recycelbarer Abfallfraktionen gelegt werden.



### **Ganzheitliche Produktbewertung im Hinblick auf ihre Umweltwirkungen**

Auf Basis der bestehenden gesetzlichen Vorgaben ist die Produktsicherheit durch eine Risikobewertung gemäß REACH-Verordnung nachzuweisen. Toxikologische



Bewertungen sind Teil dieses Verfahrens. Die Projektergebnisse unterstreichen die Bedeutung und Notwendigkeit derartiger ganzheitlicher Bewertungsverfahren zur Minimierung des Eintrags von Mikroplastik in limnische Systeme. Das Konzept der Produktsicherheit sollte daher auch auf Recyclate ausgeweitet werden.



### **Kontrollierte und effektive Entsorgungswege schaffen**

Im Rahmen von PLASTRAT wurden durch unterschiedliche Stakeholder auf ein teils unklares Verständnis über Herkunft und Art von Mikroplastik verwiesen. Die weit größte Menge an Mikroplastik entsteht durch unachtsame und unkontrollierte Entsorgung und anschließende Fragmentierung von Kunststoffprodukten und -artikeln in der Umwelt. Die Bedeutung der Schaffung kontrollierter und effektiver Entsorgungspfade erscheint vor diesem Hintergrund elementar.



### **Transparente Deklaration von Chemikalien**

Hersteller sollten darüber hinaus eine transparente, rechtskonforme Deklaration der eingesetzten Inhaltsstoffe (inklusive Mengenangaben) vornehmen, damit Verbraucher/-innen ausreichend über die einzelnen Kunststoffinhaltsstoffe informiert werden. Die Deklaration der eingesetzten Additive, Hilfsstoffe und sonstiger Substanzen könnte beispielsweise über Informationsportale in Verknüpfung mit der bestehenden SCIP-Datenbank (<https://echa.europa.eu/de/scip>) der ECHA konsequent über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg nachvollziehbar und online einsehbar gemacht werden.



### **Hinweise zur Optimierung textiler Produktionsprozesse**

Im Rahmen des Stakeholderworkshops mit Vertretern der Textilindustrie konnten einige allgemeine Handlungsempfehlungen eigens für textile Herstellungsbetriebe abgeleitet werden, welche von den Teilnehmenden in absteigender Priorisierung in der Reduzierung von Faserverlusten, der stärkeren Nutzung von bereits verfügbaren Stoffen, die weniger Fasern über die Produktnutzungsdauer freisetzen, und der Entwicklung von neuartigen Textilien mit geringem Faseraustrag gesehen wurden. Darüber hinaus könnte bereits im Rahmen des Herstellungsprozesses ein frühzeitiger Rückhalt von Mikroplastikemissionen erfolgen, sofern eine erste Produktwäscherung bereits am Ende des Produktionszyklus standardmäßig etabliert würde.



### **Tue Gutes und rede darüber!**

Ganz im Sinne dieses allgemeinen Grundsatzes guter Öffentlichkeitsarbeit sollten Unternehmen, die eine Vorbildfunktion im Bereich der Mikroplastik-Reduzierung und umweltfreundlichen Prozessführung im Allgemeinen einnehmen, dieses auch gerne zur eigenen Öffentlichkeitsarbeit nutzen. Denn nur so gelingt es langfristig, ein flächendeckendes Umdenken innerhalb der einzelnen Branchen zu erzeugen.

## **Was können Regulationsbehörden und die Politik tun?**

Wenngleich bereits aktuell vielfältige regulatorische und normative Ansätze zur Reduzierung des Eintrags von Mikroplastik in limnische System ergriffen wurden, konnten im Rahmen der Projektbearbeitung von PLASTRAT und des Dialogs mit den unterschiedlichen



Stakeholdergruppen weiterhin singuläre Themenstellungen ermittelt werden, in denen ein weiterer Handlungsbedarf seitens der Regulationsbehörden und Politik gesehen wird:



### **Überarbeitung bestehender Produkt-, Material- und Gütesiegel**

Trotz einer Vielzahl an bestehenden Güte-, Material- und Prüfsiegeln für Kunststoffmaterialien, -produkte oder -produktgruppen wird der Informationswert dieser Label von den Zielgruppen vielfach als nicht ausreichend beschrieben. Konkret wird ein Überarbeitungsbedarf mit dem Ziel einer verständlichen und eindeutigen Kundeninformation gesehen. Dieser Forderung könnte dahingehend nachgekommen werden, dass Produkte als explizit „mikroplastikfrei“ deklariert oder eine Garantie der Einhaltung von Umweltvorgaben durch eine externe Prüfstelle gewährleistet wird.



### **Konsequente Umsetzung und Erweiterung des bestehenden Stoffrechts**

Trinkwasserverordnung (TrinkwV), Bedarfsgegenständeverordnung (BedGgStV) und REACH-Verordnung bilden zentrale Elemente der aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen des Produkt- und Stoffrechts im Hinblick auf die Themenstellungen von PLASTRAT. Diese gesetzlichen Regelungen sollten konsequent auch im Hinblick auf Importprodukte Anwendung finden. Mit zunehmendem Wissensstand zu den human- und ökotoxikologischen Wirkungen von Zusatz- und Inhaltsstoffen in Kunststoffmaterialien kann unter Umständen eine Nachschärfung der bestehenden Rechtsverordnungen im Hinblick auf Vorgaben zum produktgruppenspezifischen Chemikalieneinsatz erforderlich werden.



### **Pflicht zur transparenten Deklaration von Additiven und sonstigen Hilfsstoffen**

Sofern Hersteller nicht auf freiwilliger Basis zur transparenten Deklaration von Hilfs- und Betriebsstoffen motiviert werden können, wäre gegebenenfalls im Sinne der Produkthaftung eine verpflichtende Umsetzung auf gesetzlicher Basis zu überlegen.



### **Einführung von „Positivlisten“ unbedenklicher Materialien und Substanzen**

In Anlehnung an die Trinkwasserverordnung wäre auch im Hinblick auf im Herstellungsprozess zugesetzte Stoffe die Einführung von „Positivlisten“ zu überlegen. Diese könnten entweder neu entwickelt oder bestehende Listen auf weitere Produktgruppen und Umweltkompartimente ausgeweitet werden. Verbunden mit dem Konzept der „Positivlisten“ ist in der Regel auch stets ein umfangreiches Konzept zur Marktüberwachung, bestehend aus einer Prüf- und Zertifizierungspflicht von Produkten und Materialien.



### **Synergien zu anderen thematischen Debatten nutzen**

Lösungsansätze zur Reduzierung des Eintrags von Mikroplastik in limnische Systeme weisen vielfach Synergien mit anderen thematischen Problemstellungen auf. Als positives Beispiel können die gesetzlichen Vorgaben zur thermischen Klärschlammverwertung bzw. die Unterbindung der Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft gesehen werden, welche implizit zu einer Reduktion der im Klärschlamm angereicherten Mikroplastikpartikel in limnische Systeme beitragen. Ebenso trägt aber auch die Einführung zusätzlicher Reinigungsstufen in

Kläranlagen zur Elimination abfiltrierbarer Stoffe unmittelbar zum Rückhalt von Mikroplastik in den Kläranlagen bei.

### **Was kann die (Ab-)Wasserwirtschaft tun?**

Nicht zuletzt kann auch die Wasserwirtschaft selbst einen aktiven Beitrag zur Problemlösung beitragen, indem Kläranlagentechnik und -abläufe im Hinblick auf einen größtmöglichen Rückhalt von Mikroplastikpartikeln hin optimiert werden. Zudem können Materialien verwendet werden, die keine oder nur geringe Mengen an Mikroplastikpartikeln freisetzen.



#### **Reduzierung von Mischwasserentlastungen**

Mischwasserentlastungen sind aus wirtschaftlichen Gründen unumgänglich; dennoch ist eine Reduzierung von (unbehandelten) Mischwasserabschlägen anzustreben, um Einleitungen von Mikroplastik in (Oberflächen-)Gewässer zu mindern.



#### **Optimierung der Kläranlagentechnik und Klärschlammverwertung**

Um Einträge von Mikroplastik in (Oberflächen-)Gewässer weiter zu reduzieren, kann eine Optimierung auf einen weitestgehenden Partikelrückhalt erfolgen. Dies ermöglicht auch Synergieeffekte auf weitere abwasserrelevante Parameter, beispielsweise für den Rückhalt von Nährstoffen bis hin zu Mikroorganismen und Resistenzgenen (in Abhängigkeit der eingesetzten Verfahrenstechnik).

Die während der Abwasserbehandlung zurückgehaltenen Mikroplastikpartikel werden über den Klärschlamm abgezogen, was entsprechend bei der Klärschlammentsorgung/-verwertung zu beachten ist.

## 8 Literaturverzeichnis

- Arthurson, V. (2008). Proper sanitization of sewage sludge: a critical issue for a sustainable society. *Applied and environmental microbiology*, 74(17), 5267–5275.
- Bertling, J.; Hamann, L.; Bertling, R. (2018). Kunststoffe in der Umwelt. <https://doi.org/10.24406/UMSICHT-N-497117>
- Bessa, F.; Frias, J.; Knögel, T.; Lusher, A.; Andrade, J.; Antunes, J. C.; Sobral, P.; Pagter, E.; Nash, R.; O'Connor, I.; Pedrotti, M. L.; Keros, E.; León, V. M.; Tirelli, V.; Suaria, G.; Lopes, C.; Raimundo, J.; Caetano, M.; Gago, J.; Gerdts, G. (2019). Harmonized protocol for monitoring microplastics in biota. Technical Report JPI-Oceans BASE-MAN. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28588.72321/1>
- Brandt, J.; Bittrich, L.; Fischer, F.; Kanaki, E.; Tagg, A.; Lenz, R.; Labrenz, M.; Brandes, E.; Fischer, D.; Eichhorn, K.-J. (2020). High-Throughput Analyses of Microplastic Samples Using Fourier Transform Infrared and Raman Spectrometry. *Applied Spectroscopy*, 74(9), 1185–1197. <https://doi.org/10.1177/0003702820932926>
- Braun, U.; Jekel, M.; Gerdts, G.; Ivleva, N.; Reiber, J. (2018). 1. Diskussionspapier Mikroplastik-Analytik - Probenahme, Probenaufbereitung und Detektion; Bundesministerium für Bildung und Forschung: „Plastik in der Umwelt - Quellen, Senken, Lösungsansätze“.
- Broß, L.; Badenberg, S.; Krause, S.; Schaum, C. (2020). Abfiltrierbare Stoffe als Begleitparameter: Ist die Vergleichbarkeit von Messergebnissen gegeben? *Korrespondenz Abwasser, Abfall (KA)*. Vol. 67. 2020 Nr. 1, S. 28-36
- Burns, E. E.; Boxall, A. B. A. (2018). Microplastics in the aquatic environment: Evidence for or against adverse impacts and major knowledge gaps: Microplastics in the environment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 37(11), 2776–2796. <https://doi.org/10.1002/etc.4268>
- Chen, G.; Feng, Q.; Wang, J. (2020). Mini-review of microplastics in the atmosphere and their risks to humans. *Science of The Total Environment*, 703, 135504. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135504>
- DESTATIS. (2020). Trockenmasse des aus Abwasserbehandlungsanlagen direkt entsorgten Klärschlammes: Bundesländer, Jahre, Entsorgungsarten des Klärschlammes.
- Dierkes, G.; Lauschke, T.; Becher, S.; Schumacher, H.; Földi, C.; Ternes T.A (2019). Quantification of microplastics in environmental samples via pressurized liquid extraction and pyrolysis-gas chromatography. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 411(26), 6959-6968.
- DIN EN ISO 4892-2(2013) Kunststoffe - künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 2: Xenonbogenlampen (ISO 4892-2:2013); Beuth Verlag GmbH
- DIN EN ISO 5667-13 (2011) Wasserbeschaffenheit - Probenahme - Teil 13: Anleitung zur Probenahme von Schlämmen (ISO 5667-13:2011). Beuth Verlag GmbH.
- Duis, K.; Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: Sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe*, 28(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y>

- Dümichen, E.; Eisentraut, P.; Bannick, C. G.; Barthel, A.-K.; Senz, R.; Braun, U. (2017). Fast identification of microplastics in complex environmental samples by a thermal degradation method. *Chemosphere*, 174, 572–584. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.010>
- DüMV (2019). Deutsche Düngemittelverordnung. abgerufen am 11. September 2020, von [https://www.gesetze-im-internet.de/d\\_mv\\_2012/](https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/)
- Enders, K.; Lenz, R.; Ivar do Sul, J. A.; Tagg, A. S.; Labrenz, M. (2020). When every particle matters: A QuEChERS approach to extract microplastics from environmental samples. *MethodsX*, 7, 100784. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100784>
- Fischer, M.; Scholz-Böttcher, B. M. (2017). Simultaneous Trace Identification and Quantification of Common Types of Microplastics in Environmental Samples by Pyrolysis-Gas Chromatography–Mass Spectrometry. *Environmental Science & Technology*, 51(9), 5052–5060. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06362>
- Frias, J.; Filgueiras, A.; Gago, J.; Pedrotti, M. L.; Suaria, G.; Tirelli, V.; Andrade, J.; Nash, R.; O'Connor, I.; Lopes, C.; Caetano, M.; Raimundo, J.; Carretero, O.; Viñas, L.; Antunes, J. C.; Bessa, F.; Sobral, P.; Goruppi, A.; Aliani, S.; Gerdts, G. (2019). Standardised protocol for monitoring microplastics in seawater. Technical Report JPI-Oceans BASEMAN. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14181.45282>
- GESAMP. (2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: A global assessment. International Maritime Organization (IMO)
- Geyer, R.; Jambeck, J. R.; Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Groh, K. J.; Backhaus, T.; Carney-Almroth, B.; Geueke, B.; Inostroza, P. A.; Lennquist, A.; Leslie, H. A.; Maffini, M.; Slunge, D.; Trasande, L.; Warhurst, A. M.; Muncke, J. (2019). Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards. *Science of The Total Environment*, 651, 3253–3268. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.015>
- Horton, A. A.; Walton, A.; Spurgeon, D. J.; Lahive, E.; Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of The Total Environment*, 586, 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
- Imhof, H. K.; Laforsch, C.; Wiesheu, A. C.; Schmid, J.; Anger, P. M.; Niessner, R.; Ivleva, N. P. (2016). Pigments and plastic in limnetic ecosystems: A qualitative and quantitative study on microparticles of different size classes. *Water Research*, 98, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.015>
- Imhof, H. K.; Schmid, J.; Niessner, R.; Ivleva, N. P.; Laforsch, C. (2012). A novel, highly efficient method for the separation and quantification of plastic particles in sediments of aquatic environments. *Limnology and Oceanography: Methods*, 10(7), 524–537. <https://doi.org/10.4319/lom.2012.10.524>
- Jambeck, J. R.; Geyer, R.; Wilcox, C.; Siegler, T. R.; Perryman, M.; Andrady, A.; Narayan, R.; Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 764–768. <https://doi.org/10.1126/science.1260879>

- Käppler, A.; Fischer, D.; Oberbeckmann, S.; Schernewski, G.; Labrenz, M.; Eichhorn, K.-J.; Voit, B. (2016). Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman or both? *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 408(29), 8377–8391. <https://doi.org/10.1007/s00216-016-9956-3>
- Käppler, A.; Fischer, M.; Scholz-Böttcher, B. M.; Oberbeckmann, S.; Labrenz, M.; Fischer, D.; Eichhorn, K.-J.; Voit, B. (2018). Comparison of  $\mu$ -ATR-FTIR spectroscopy and py-GCMS as identification tools for microplastic particles and fibers isolated from river sediments. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410(21), 5313–5327. <https://doi.org/10.1007/s00216-018-1185-5>
- Lassen, C.; Hansen, S. F.; Magnusson, K.; Hartmann, N. B.; Rehne Jensen, P.; Nielsen, T. G.; Brinch, A. (2015). Microplastics Occurrence, effects and sources of releases to the environment in Denmark. Danish Environmental Protection Agency. <http://mst.dk/service/publikationer/publikationsarkiv/2015/nov/rapport-ommikroplast>
- Lenz, R.; Labrenz, M. (2018). Small Microplastic Sampling in Water: Development of an Encapsulated Filtration Device. *Water*, 10(8), 1055. <https://doi.org/10.3390/w10081055>
- Lenz, R.; Enders, K.; Fischer, F.; Brandt, J.; Fischer, D.; Labrenz, M. (under review). Measuring impacts of microplastic treatments via image recognition on immobilized particles below 100  $\mu$ m. *Microplastics and Nanoplastics*.
- Löder, M. G. J.; Imhof, H. K.; Ladehoff, M.; Löschel, L. A.; Lorenz, C.; Mintenig, S.; Piehl, S.; Primpke, S.; Schrank, I.; Laforsch, C.; Gerdts, G. (2017). Enzymatic Purification of Microplastics in Environmental Samples. *Environmental Science & Technology*, 51(24), 14283–14292. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03055>
- Löder, M. G. J.; Kuczera, M.; Mintenig, S.; Lorenz, C.; Gerdts, G. (2015). Focal plane array detector-based micro-Fourier-transform infrared imaging for the analysis of microplastics in environmental samples. *Environmental Chemistry*, 12(5), 563. <https://doi.org/10.1071/EN14205>
- Muncke, J.; Andersson, A.-M.; Backhaus, T.; Boucher, J. M.; Carney Almroth, B.; Castillo Castillo, A.; Chevrier, J.; Demeneix, B. A.; Emmanuel, J. A.; Fini, J.-B.; Gee, D.; Geueke, B.; Groh, K.; Heindel, J. J.; Houlihan, J.; Kassotis, C. D.; Kwiatkowski, C. F.; Lefferts, L. Y.; Maffini, M. V.; Scheringer, M. (2020). Impacts of food contact chemicals on human health: A consensus statement. *Environmental Health*, 19(1), 25, s12940-020-0572–0575. <https://doi.org/10.1186/s12940-020-0572-5>
- Mundani, A.; Krause, S.; Schaum, C. (2018). Characteristics of conventional and bio-based polymers during sewage sludge treatment. in: Baztan, J.; Bergmann, M.; Carrasco, A.; Fossi, C.; Jorgensen, B.; Miguelez, Q.; Pahl, S.; Thompson, R.C.; Vanderlinden, J.-P. (Eds.) 2018 - MICRO 2018, Lanzarote. Fate and Impact of Microplastics: Knowledge, Actions and Solutions. 386p., MSFS-RBLZ. ISBN 978-84-09-06477-9 CC-BY-NC-SA
- Primpke, S.; Lorenz, C.; Rascher-Friesenhausen, R.; Gerdts, G. (2017). An automated approach for microplastics analysis using focal plane array (FPA) FTIR microscopy and image analysis. *Analytical Methods*, 9(9), 1499–1511. <https://doi.org/10.1039/C6AY02476A>

- Schaum, C.; Krause, S.; Wick, N.; Mundani, A. (2020). Mikroplastikrückhalt in der kommunalen Abwasserbehandlung. 91. Darmstädter Seminar: Mikroplastik – Herausforderungen und Perspektiven in der Abwasser- und Abfallbehandlung. Schriftenreihe IWAR 257, ISBN 978-3-940897-58-9.
- Schwinghammer, L.; Krause, S.; Schaum, C. (2020). Determination of large microplastics: wet-sieving of dewatered digested sludge, co-substrates, and compost. *Water Science & Technology*, doi: 10.2166/wst.2020.582, in Print.
- Silva, E.; Rajapakse, N.; Kortenkamp, A. (2002). Something from “Nothing” – Eight Weak Estrogenic Chemicals Combined at Concentrations below NOECs Produce Significant Mixture Effects. *Environmental Science & Technology*, 36(8), 1751–1756. <https://doi.org/10.1021/es0101227>
- Stieß, I.; Raschweski, L.; Sunderer, G.; Birzle-Harder, B.; Götz, K. (2021). Die Wahrnehmung von Umweltgefährdungen durch Mikroplastik im Kontext alltäglicher Konsumpraktiken – Ergebnisse einer empirischen Studie. *ISOE-Materialien Soziale Ökologie*, Frankfurt am Main: ISOE - Institut für sozial-ökologische Forschung
- Talvitie, J.; Heinonen, M. (2014). Preliminary study on synthetic microfibers and particles at a municipal waste water treatment plan. Helsinki Region Environmental Services HSY.
- Talvitie, J. (2018). Wastewater treatment plants as pathways of microlitter to the aquatic environment. Aalto University, Finland.
- Weithmann, N.; Möller J. N.; Löder M. G. J.; Piehl S.; Laforsch C.; Freitag R. (2018). Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science Advances* 4(4), eaap8060. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap8060>
- Wick, N.; Klein, K.; Schulte-Oehlmann, U.; Dombrowski, A.; Oehlmann, J.; Krause, S.; Schaum, C. (2021). Mikroplastik in limnischen Systemen: Einträge aus der Siedlungswasserwirtschaft und ökotoxikologische Effekte. *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2021 (14), Nr. 3. <https://doi.org/10.3243/kwe2021.03.003>
- Wick, N.; Krause, S.; Schaum, C.; Fischer, F.; Fischer, D.; Klaeger, F.; Labrenz, M. (2020). Herausforderungen bei Probenahme, -aufbereitung und Analyse von Mikroplastik in der kommunalen Abwasserbehandlung. *Korrespondenz Abwasser*, 2020 (67), Nr. 2. <https://doi.org/10.3242/kae2020.02.004>
- World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality. Third edition incorporating the first and second addenda. Volume 1 Recommendations. Geneva, (2014).

## 9 Abschlussberichte und Publikationen von PLASTRAT

### 9.1 Abschlussberichte von PLASTRAT

Die Abschlussberichte (Förderkennzeichen: 02WPL1446) aller Teilprojekte von PLASTRAT sind demnächst online verfügbar über die **Technische Informationsbibliothek (TIB)** Hannover ([www.tib.eu](http://www.tib.eu)) sowie über die Websites von **PlastikNet** ([www.bmbf-plastik.de](http://www.bmbf-plastik.de)) und **PLASTRAT** ([www.plastrat.de](http://www.plastrat.de)).

Universität der Bundeswehr München – Institut für Wasserwesen

*Schwerpunkt:*

***Eintragspfade der Siedlungswasserwirtschaft in limnische Systeme***

Goethe-Universität Frankfurt am Main – Abteilung Aquatische Ökotoxikologie

*Schwerpunkt:*

***Ökotoxikologie (Wirkung von Kunststoffen und Additiven)***

ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung

*Schwerpunkt:*

***Verbraucherverhalten***

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH

*Schwerpunkt:*

***Bewertung von Kunststoffen***

Bundesanstalt für Gewässerkunde

*Schwerpunkt:*

***Degradation und stoffliche Dynamik***

aquadrat ingenieure GmbH

*Schwerpunkt:*

***Ultrafiltration zur weitergehenden Abwasserbehandlung (Konzeption)***

Technische Universität Darmstadt – Institut IWAR

*Schwerpunkt:*

***Umweltchemie (Sorptionsverhalten)***

inge GmbH

*Schwerpunkt:*

***Ultrafiltration zur weitergehenden Abwasserbehandlung (Versuchsanlage)***

Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.

*Schwerpunkt:*

***Analyse von Mikroplastik mittels Raman-Spektroskopie***

Leibniz-Institut für Ostseeforschung

*Schwerpunkt:*

***Probenaufbereitung für die Analyse***



## 9.2 Publikationen von PLASTRAT (*Auswahl*)

### Buchbeiträge und Journals

- Brandt, J.; Bittrich, L.; Fischer, F.; Kanaki, E.; Tagg, A.; Lenz, R.; Labrenz, M.; Brandes, E.; Fischer, D.; Eichhorn, K.-J. (2019). High-Throughput Analyses of Microplastic Samples Using Fourier Transform Infrared and Raman Spectrometry. *Applied Spectroscopy*.
- Broß, L.; Badenberg, S.; Krause, S.; Schaum, C. (2020). Abfiltrierbare Stoffe als Begleitparameter: Ist die Vergleichbarkeit von Messergebnissen gegeben? *Korrespondenz Abwasser, Abfall (KA)*. Vol. 67. 2020 Nr. 1, S. 28-36
- Enders, K.; Lenz, R.; Ivar do Sul, J.; Tagg, A.; Labrenz, M. (2020). When every particle matters: A QuEChERS approach to extract microplastics from environmental samples. *MethodsX*. 7 (2020). 100784
- Fischer, D.; Fischer, F.; Brandt, J.; Bittrich, L.; Eichhorn, K.-J.; Fischer, H.; Hollricher, K.; Böhmler, M. (2019). Find, classify and identify microparticles with raman imaging. *Imaging & Microscopy* 21 (2019)2. - S. 16-17
- Fischer, D.; Käppler, A.; Fischer, F.; Brandt, J.; Bittrich, L.; Eichhorn, K.-J. (2019). Identifizierung von Mikroplastik in Umweltproben: Kombination von Partikelanalyse mit FTIR- und Raman-Mikroskopie. *GIT Labor-Fachzeitschrift* 63 (2019) 9. S. 38-40
- Fischer, D.; Käppler, A.; Fischer, F.; Brandt, J.; Bittrich, L.; Eichhorn, K.-J. (2019). Identification of microplastics in environmental samples – Combination of particle analysis with FTIR and raman microscopy. *GIT Laboratory Journal Europe* 23 (2019) 4. S. 43-45
- Heß, S.; Klein, K.; Nengeß, S.; Schulte-Oehlmann, U.; Oehlmann, J. (under review). Particle shape does not affect ingestion and egestion of microplastics in the freshwater shrimp *Neocaridina palmata*. *Environmental Science and Pollution Research*
- Ivar do Sul, J.; Tagg, A.SW.; Labrenz, M. (2018). Exploring the common denominator between microplastics and microbiology: a scientometric approach. *Scientometrics* 117:2145. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2936-y2145-2157>
- Klein, K.; Piana, T.; Lauschke, T.; Schweyen, P.; Dierkes, G.; Ternes, T.; Schulte-Oehlmann, U.; Oehlmann, J. (2021). Chemicals associated with biodegradable microplastic drive the toxicity to the freshwater oligochaete *Lumbriculus variegatus* *Aquatic Toxicology*, Vol. 231. 2021. Nr. 105723
- Klein, K.; Hof, D.; Dombrowski, A.; Schweyen, P.; Dierkes, G.; Ternes, T.; Schulte-Oehlmann, U.; Oehlmann, J. (under review). Enhanced in vitro toxicity of plastic leachates after UV irradiation. *Water Research*
- Käppler, A.; Fischer, M.; Scholz-Böttcher, B.; Oberbeckmann, S.; Labrenz, M.; Fischer, D.; Eichhorn, K.-J.; Voit, B. (2018). Comparison of  $\mu$ -ATR-FTIR spectroscopy and py-GCMS as identification tools for microplastic particles and fibers isolated from river sediments. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 410 (2018) 5313-5327
- Wick, N.; Krause, S.; Schaum, C.; Fischer, F.; Fischer, D.; Klaeger, F.; Labrenz, M. (2020). Herausforderungen bei Probenahme, -aufbereitung und Analyse von Mikroplastik in der kommunalen Abwasserbehandlung. *Korrespondenz Abwasser, Abfall (KA)*. Vol. 67. 2020. Nr. 2, S. 118-124



Wick, N.; Klein, K.; Schulte-Oehlmann, U.; Dombrowski, A.; Oehlmann, J.; Krause, S.; Schaum, C. (2021). Mikroplastik in limnischen Systemen: Einträge aus der Siedlungswasserwirtschaft und ökotoxikologische Effekte. Korrespondenz Wasserwirtschaft (KW). Vol. 14. 2021. Nr. 3

### **Vorträge und Tagungsbeiträge**

- Birzle-Harder, B.; Kerber, H.; Raschewski, L.; Stieß, I. (2019). Wahrnehmung von Mikroplastik bei der Nutzung und Entsorgung von Produkten. 18. BfR-Forum Verbraucherschutz: Mikroplastik, Berlin
- Fischer, D. (2018). Makro- und Mikroplastik in der Umwelt. Kolloquium „DAS Environmental GmbH“, Dresden
- Fischer, D.; Fischer, F.; Brandt, J.; Bittrich, L.; Löder, M. (2020). Mikroplastikanalyse in verschiedenen Medien - ein aktueller Überblick. 91. Darmstädter Seminar: Mikroplastik – Herausforderungen und Perspektiven in der Abwasser- und Abfallbehandlung. Darmstadt. Schriftenreihe IWAR 257, ISBN 978-3-940897-58-9.
- Fischer, D.; Käßpler, A.; Fischer, F.; Brandt, J.; Bittrich, L.; Muche, J.; Rödiger, A.; Eichhorn, K.-J.; Lenz, R.; Tagg, A.S.; Enders, K.; Labrenz, M. (2019). Identification and quantification of microplastics in environmental samples by a combination of optical particle analysis with FTIR and Raman microscopy. Inside Raman Workshop, Pliezhausen, 17. – 18.10.2019
- Fischer, D.; Käßpler, A.; Fischer, F.; Brandt, J.; Bittrich, L.; Muche, J.; Rödiger, A.; Eichhorn, K.-J.; Lenz, R.; Tagg, A.S.; Enders, K.; Labrenz, M. (2019). An analytical approach for the identification and quantification of microplastic in environmental samples by an automated combination of optical particle analysis with FTIR and Raman microscopy. ICCE 2019 - 17th International Conference on Chemistry & the Environment. - Thessaloniki, GR, 16.06.2019 - 16.06.2019, Conference Proceedings S. 743-745
- Fischer, D.; Käßpler, A.; Fischer, F.; Brandt, J.; Muche, J.; Eichhorn, K.-J.; Bittrich, L.; Oberbeckmann, S.; Labrenz, M. (2018). Analytical approach for the identification and quantification of microplastic particles in environment samples by a combination of particle analysis with FTIR and Raman microscopy. Microplastics 2018, Monte Verita, Ascona, Schweiz
- Fischer, D.; Käßpler, A.; Fischer, F.; Brandt, J.; Muche, J.; Eichhorn, K.-J.; Bittrich, L.; Oberbeckmann, S.; Labrenz, M. (2018). Analytical approach for the identification and quantification of microplastic particles in environment samples by a combination of particle analysis with FTIR and Raman microscopy. in: Baztan, J.; Bergmann, M.; Carrasco, A.; Fossi, C.; Jorgensen, B.; Miguelez, Q.; Pahl, S.; Thompson, R.C.; Vanderlinden, J.-P. (Eds.) 2018, MICRO 2018, Lanzarote. Fate and Impact of Microplastics: Knowledge, Actions and Solutions. 150p., MSFS-RBLZ. ISBN 978-84-09-06477-9
- Fischer, F. (2019). Eintragsquellen, Transportwege, Verbleib - mögliche Gefährdungen für Mensch und Umwelt. Lange Nacht der Wissenschaft, IPF Dresden

- Fischer, F.; Fischer, D.; Brandt, J.; Bittrich, L.; Käppler, A., Eichhorn, K.-J. (2019). Analytical approach for the identification and quantification of microplastic particles by a combination of particle analysis with Raman and FTIR microscopy. ACS Fall Meeting, San Diego, 25. – 29. 8. 2019
- Gottschling, M.; Zhuo, Y.; Schwabe, I.; Heide, J.; Quynh Bui, T.; van Oyen, A.; Sakaguchi-Söder, K.; Schebek, L. (2018). Wie lassen sich aus einem Zusammenhang stoffspezifischer Parameter ausgewählter Schadstoffe und MP Verteilungskoeffizienten ableiten?. Umwelt 2018, Münster
- Gottschling, M.; Sakaguchi-Söder, K.; Gogic, D.; Schebek, L. (2020). Investigation of the correlation between wastewater treatment parameters and pollutant accumulation on LDPE in the long-term deployment tests at municipal wastewater treatment plants. SETAC Europe 30th Annual Meeting, Dublin, 3. – 7. 5. 2020
- Käppler, A.; Fischer, D.; Oberbeckmann, S.; Labrenz, M.; Eichhorn, K.-J. (2018). Identifizierung von Mikroplastik mittels Schwingungsspektroskopie: IR, Raman oder beides?. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Mikroplastik in der Umwelt - Statuskolloquium, Augsburg
- Käppler, A.; Fischer, D.; Scholz-Böttcher, B.; Oberbeckmann, S.; Labrenz, M.; Fischer, D.; Eichhorn, K.-J.; Voit, B. (2018). Comparison of  $\mu$ -ATR-FTIR spectroscopy and py-GCMS as identification tools for microplastic particles and fibers isolated from river sediments. in: Baztan, J.; Bergmann, M.; Carrasco, A.; Fossi, C.; Jorgensen, B.; Miguelez, Q.; Pahl, S.; Thompson, R.C.; Vanderlinden, J.-P. (Eds.) 2018 - MICRO 2018, Lanzarote. Fate and Impact of Microplastics: Knowledge, Actions and Solutions. 153p., MSFS-RBLZ. ISBN 978-84-09-06477-9
- Kläger, F.; Labrenz, M. (2020). Mikroplastik in Umweltmedien - Methoden zur Probenvorbereitung. 91. Darmstädter Seminar: Mikroplastik – Herausforderungen und Perspektiven in der Abwasser- und Abfallbehandlung. Darmstadt. Schriftenreihe IWAR 257, ISBN 978-3-940897-58-9.
- Klein, K. (2019). Alles klar? mikro - Schadstoffe und Plastik in Wasser und Umwelt. mikro – Plastik und Schadstoffe, Mörfelden-Walldorf
- Klein, K. (2019). Effekte von irregulären PLA-Mikropartikeln auf den benthischen Süßwasseroligochaeten *Lumbriculus variegatus*. 24. Jahrestagung der SETAC GLB. Landau
- Klein, K. (2020). Mikroplastik in der Umwelt: Eintrag, Verbleib und Auswirkungen. Hydrobiologisches Seminar im Wintersemester 2019/20. Institut für Hydrobiologie, TU Dresden, Dresden
- Klein, K. (2020). Induction of in vitro toxicity by UV-weathered microplastic leachates. MICRO2020, Lanzarote (online)
- Krause, S.; Badenberger, S.; Mundani, A.; Schaum, C. (2018). PLASTRAT - Plastik in Binnengewässern. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Mikroplastik in der Umwelt - Statuskolloquium, Augsburg
- Mundani, A.; Badenberger, S.; Metzner, T.; Krause, S.; Schaum, C. (2018). Arzneimittel, Drogen, Mikroplastik - welche Spurenstoffe enthält unser Abwasser? Hochschulforum IFAT 2018, München

- Mundani, A.; Krause, S.; Schaum, C. (2018). (Mikro-) Plastik im Klärschlamm. UMWELT 2018, Münster
- Mundani, A.; Krause, S.; Schaum, C. (2018). Characteristics of conventional and bio-based polymers during sewage sludge treatment. in: Baztan, J.; Bergmann, M.; Carrasco, A.; Fossi, C.; Jorgensen, B.; Miguelez, Q.; Pahl, S.; Thompson, R.C.; Vanderlinden, J.-P. (Eds.) 2018 - MICRO 2018, Lanzarote. Fate and Impact of Microplastics: Knowledge, Actions and Solutions. 386p., MSFS-RBLZ. ISBN 978-84-09-06477-9 CC-BY-NC-SA
- Newe, W.; Pannekens, H.; Schertzinger, G. (2019). Toxicological assessment of leachates from microplastic using CALUX systems. 12th BioDetectors Conference, Wien, Österreich
- Schaum, C.; Krause, S.; Mundani, A. (2018). Weitergehende Behandlung von Kläranlagenabläufen. in: DWA (2018), Kommunale Abwasserbehandlung-Wasserwirtschaftskurs Q/2, S.189 ff., Hennef
- Schaum, C.; Krause, S.; Wick, N.; Mundani, A. (2020). Mikroplastikrückhalt in der Kommunalen Kläranlage. 91. Darmstädter Seminar: Mikroplastik – Herausforderungen und Perspektiven in der Abwasser- und Abfallbehandlung, Darmstadt. Schriftenreihe IWAR 257, ISBN 978-3-940897-58-9.
- Wick, N.; Krause, S.; Schaum, C.; Kläger, F.; Labrenz, M.; Fischer, F.; Fischer, D. (2020). Sampling of Microplastics in Water Resource Recovery Facilities: Challenges and Limits. WEFTEC 2020, New Orleans, USA (online)

[www.unibw.de/wasserwesen](http://www.unibw.de/wasserwesen)

**ISBN 978-3-943207-52-1**