

Eine Initiative des Bundesministeriums
für Bildung und Forschung

Plastik in der Umwelt

Quellen • Senken • Lösungsansätze

Mikroplastik-Einträge über das Abwasser in die aquati- sche Umwelt

Handlungsempfehlungen und Erkenntnisse
aus dem REPLAWA-Vorhaben zur Ermittlung
und Verringerung von Mikroplastik-Einträgen
im Bereich der Abwasserentsorgung

August 2022



GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FONA
Sozial-ökologische
Forschung
BMBF

Projektpartner

Prof. Dr. Holger Scheer, Dr. Tim Fuhrmann, Peter Wulf, Dr. Ingo Urban
Emscher Wassertechnik GmbH

Prof. Dr. Matthias Barjenbruch, Philipp Lau, Luisa Reinhold
Technische Universität Berlin, Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt, Institut Bauingenieurwesen, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft

Dr. Katrin Bauerfeld, Johanna Scheele
Technische Universität Braunschweig, Institut für Siedlungswasserwirtschaft

Prof. Dr. Anja P. Jakobi, Dr. Bastian Loges, Ronja Hänschen
Technische Universität Braunschweig, Department für Sozialwissenschaften, Institut für Internationale Beziehungen

Prof. Dr. Karl-Georg Schmelz, Dr. Issa Nafo, Andrea Holte
Lippeverband

Dr. Ulrich Grabbe, Dr. Thomas Fundneider
Mecana Umwelttechnik GmbH

Andreas Sack, Hansjörg Lenz, Sonja Winandi
Nordic Water GmbH

Dr. Jose Ordonez
MARTIN Systems GmbH

Stefanie Meyer
Stadtentwässerung Braunschweig GmbH

Dieses Dokument ist im Rahmen des Forschungsverbundprojekts „Reduktion des Eintrags von Plastik über das Abwasser in die aquatische Umwelt (REPLAWA)“ erstellt worden. Das REPLAWA-Verbundprojekt ist Teil des BMBF-Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt – Quellen, Senken, Lösungsansätze“. Der Forschungsschwerpunkt ist Teil der BMBF-Leitinitiative „Green Economy“ im Rahmenprogramm „Forschung für nachhaltige Entwicklung“ (FONA). Weitere Informationen siehe <https://bmbf-plastik.de>.

Stand: August 2022.

Dieses Dokument steht online zur Verfügung unter <https://www.replawa.de> und <https://bmbf-plastik.de>.

Danksagung & Disclaimer

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 02WPL1445A ff. gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren/-innen.

Inhaltsverzeichnis

Veranlassung	4
Zusammenfassung	4
Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen	6
Anhaltende Weiterentwicklung der Methoden zur MP-Analytik	6
Große Messunsicherheiten bei der MP-Analytik	7
Hoher Aufwand der MP-Analytik schränkt umfassendes Monitoring ein	8
Ermittlung von Reduktionspotentialen technischer Aggregate durch gezielte Mikroplastik-Dotierung	8
Hohe Elimination von Mikroplastikpartikeln bei der Abwasserreinigung und durch nachgeschaltete Filtration	9
Bilanzierung von Mikroplastik-Stoffströmen in Kläranlagen.....	11
Regulierung von Mikroplastikemissionen aus Kläranlagenabläufen	11
Klärschlamm fungiert als Senke für Mikroplastik	12
Mikroplastik wird über bodenbezogene Klärschlammverwertung in die Umwelt eingetragen	13
Relevante Mikroplastikemissionen bei Niederschlags- und Mischwasserein- leitungen	13
Verringerung von unkontrollierten Einträgen aus der Misch- und Regenwasse- rkanalisation	14
Umfassende Quantifizierung der MP-Eintragspfade aus der Siedlungswasser- wirtschaft in Deutschland ist nötig	15
Maßnahmen verstärkt an den Emissionsquellen ansetzen	15
Mikroplastikverschmutzung von Gewässern.....	15
Internationale Regulierungsansätze	16
Forschungsbedarf	18
Analyse und Wirkungsbeurteilung von Mikroplastik	18
Vertiefen des Systemverständnisses und der MP-Stoffströme	19
Interdisziplinäre Forschung für die Vorbereitung effektiver Regulierung	20
Literatur	21

Veranlassung

Kunststoffe sind in der heutigen Lebenswelt allgegenwärtig und in vielen Bereichen kaum zu ersetzen. Da Kunststoffe in stetig steigenden Mengen produziert werden und gleichzeitig sehr langlebig sind, ist eine zunehmende Anreicherung in der limnischen und maritimen Umwelt zu verzeichnen – insbesondere in Form von Mikroplastik. Viele Kunststoffarten gelten zwar an sich als toxikologisch unbedenklich, allerdings sind die öko- und humantoxikologischen Risiken von immer weiter degradierenden Kunststoffpartikeln noch unklar, zumal die Partikel unterschiedlichste Additive enthalten und auch als Träger von Spurenstoffen und pathogenen Mikroorganismen dienen können (UBA, 2017). Eine Reduzierung der weiteren Kunststoffemissionen in die Umwelt erscheint schon aus Vorsorgegründen unabdingbar.

Untersuchungen zu Kunststoff-Partikeln in deutschen Binnengewässern (UBA, 2017; Länderbericht 2018) haben auf Kunststoffeinträge über das Abwasser aufmerksam gemacht, sodass das Thema auch in der Siedlungswasserwirtschaft an Relevanz gewonnen hatte. Im Rahmen des BMBF-Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt – Quellen • Senken • Lösungsansätze“ (PidU) wurden durch das REPLAWA-Verbundprojekt (2018 – 2021) die Mikroplastikeinträge im Zusammenhang mit der Abwasserableitung und -behandlung untersucht.

Daraus wurden die nachfolgenden Handlungsempfehlungen abgeleitet. Diese sind auch in die Kernbotschaften des BMBF-Förderschwerpunkts (Hinzmann et al., 2022) eingeflossen.

Zusammenfassung

Mikroplastik wird über die verschiedenen Abwasserströme (Schmutz-, Misch- und Niederschlagswasser) in die aquatische Umwelt eingetragen. Die Untersuchungen im Rahmen des BMBF-Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt“ haben einen großen Erkenntnisgewinn zu Mengen, Verbleib und Reduktionsmöglichkeiten von Mikroplastik in Abwasser erbracht.

Aufbauend auf der Schaffung der methodischen Grundlagen für die komplexe massebezogene Mikroplastik-Analytik konnten zahlreiche Mikroplastik-Befunde und Einordnungen erarbeitet werden. Wegen der sehr aufwändigen Analytik beruhen viele dieser Befunde jedoch auf einer noch dünnen Datenbasis und sind zudem mit hohen Fehlerspannweiten behaftet. Trotzdem können auch aus dem Abgleich mit anderen Forschungsgruppen bereits klare Trendaussagen getroffen werden.

So wurde deutlich, dass Kläranlagen aufgrund ihrer Reinigungsleistung (Mikroplastik-Rückhalt von mind. 95 %, massebezogen sogar mind. 99 %) keine maßgebende Rolle unter den Mikroplastik-Eintragspfaden in die aquatische Umwelt spielen. Dennoch ließe sich der Rückhalt in den Kläranlagen durch nachgeschaltete Filtrationsanlagen weiter steigern. Die bei der weitergehenden Abwasserreinigung zur Phosphor- und/oder Spurenstoffelimination eingesetzten Filterverfahren tragen daher auch zu einer Reduzierung der Mikroplastikausträge aus den Kläranlagen bei.

Das in den Kläranlagen abgeschiedene Mikroplastik verbleibt zum größten Teil im Klärschlamm (bis zu 80 %). Durch Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft

oder im Landbau wird das Mikroplastik in Böden und Gewässer eingetragen. Eine Reduzierung dieser Einträge kann über eine Verringerung der bodenbezogenen Klärschlammverwertung erreicht werden, wie sie durch die Novellierung des Dünge- und Abfallrechts mittelfristig (2029/2032) bereits für große Kläranlagen (ab 50.000 EW) vorgeschrieben wird.

Orientierende Messungen zeigten in den untersuchten Gewässern signifikante Mikroplastik-Belastungen. Als wesentlichste Eintragspfade von Mikroplastik in die Gewässer werden Mischwasserentlastungen und Niederschlagswassereinleitungen angenommen. In einer überschlägigen Bewertung der einzelnen Eintragspfade zeigten sich insbesondere unbehandelte Misch- und Niederschlagswassereinleitungen als die größten MP-Eintragsquellen in die aquatische Umwelt und sollten entsprechend minimiert werden. Dies könnte auch durch gezielte Regulierungen von Niederschlags- und Mischwassereinleitungen forciert werden. Hierzu sind die notwendigen Datengrundlagen zu schaffen. So ist beispielsweise noch zu klären, wo der von Verkehrsflächen abgespülte Reifenabrieb, der mit rund 100.000 t/a eine der größten Mikroplastikquellen darstellt, in der Abwasserinfrastruktur verbleibt.

Mit dem BMBF-Forschungsschwerpunkt wurde bereits ein wichtiger Beitrag für ein Systemverständnis zu den Mikroplastik-Stoffströmen in der Siedlungswasserwirtschaft geliefert. Dieses Verständnis ist weiter zu vertiefen, um möglichst effiziente Maßnahmen zur Verringerung von Mikroplastik-Einträgen in die Umwelt ableiten zu können. Das ist auch im Hinblick auf entsprechende politische Entscheidungen von Relevanz. Dafür notwendige Bilanzierungen und Modellierungen sind mangels Datengrundlage noch auf zahlreiche Annahmen angewiesen und teilweise widersprüchlich. Es besteht somit insgesamt ein weiterhin hoher Forschungsbedarf – durch die bisherigen Untersuchungen konnten die Fragestellungen zur Mikroplastik-Thematik jedoch deutlich präzisiert werden. So ist insbesondere die bisherige Datenbasis auf Grundlage von harmonisierten Analysemethoden (vergleichbare Probenahme, Probenaufbereitung und Mikroplastik-Detektion) deutlich zu verbreitern. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen sollte auf dem schon erwähnten Misch- und Niederschlagswasser liegen, für das derzeit die größten Verminderungspotentiale an Mikroplastik-Einträgen gesehen werden.

Aus regulatoriver Perspektive wurde durch das REPLAWA-Vorhaben der Blick auf die Problematik der Mikroplastikverschmutzung erweitert: Weg von der End-of-pipe-Fokussierung und auch jenseits nationaler Grenzen. Gemeinsam mit den anderen sozialwissenschaftlichen Teilprojekten im BMBF-Forschungsschwerpunkt konnte REPLAWA deutlich machen, dass die Nutzung von Kunststoffen in der beobachteten Größenordnung potenziell ein gravierendes Umweltproblem darstellt, das sowohl gesellschaftliche wie internationale Ursprünge hat und demnach auch entsprechender Lösungsstrategien bedarf. Die Auswertung des Ist-Zustands der Plastikregulierung von allen UN-Mitgliedsstaaten zeigt, dass die unterschiedlichen Regulierungen noch nicht effektiv ineinandergreifen, sondern ein Mosaik an Verregelung darstellen, das recht unterschiedliche Produkte mit diversen Regulierungsinstrumenten und variierenden Regulierungsabsichten umfasst.

Somit wird Mikroplastik auch langfristig wie international ein relevantes Thema bleiben, da die Verschmutzung der Umwelt mit Kunststoffen permanent zunimmt. Deutschland ist mit dem umfangreichen BMBF-Forschungsschwerpunkt „Plastik in der

Umwelt“ international einen großen Schritt voraus gegangen und hat zu einem signifikanten Erkenntnisgewinn beigetragen. Jetzt gilt es, diesen Vorsprung zu erhalten.

Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen

Weiterentwicklung der Methoden zur MP-Analytik

- In der Diskussion um Kunststoffemissionen hat sich der Begriff „Mikroplastik“ (MP) etabliert, aber eine **einheitliche Definition für die Messgröße „Mikroplastik“** ist noch zu treffen. Hierzu wird auch auf das im BMBF-Förderschwerpunkt „Plastik in der Umwelt“ erarbeitete Statuspapier „Mikroplastik-Analytik“ (Braun et al., 2020) und das Kompendium „Kunststoff in der Umwelt“ (Bertling et al., 2022) verwiesen.
- **Probenaufbereitung im Feld:** Mittels einer an der TUB entwickelten Probenahmeapparatur mit einem rotierenden Siebfilter („RoSi“) können aus dem Abwasserstrom Probenahmen mit großen Volumina oder langer Probenahmedauer realisiert werden, wie sie bei feststoffarmen Wasserproben für die MP-Analyse benötigt werden. Mit der Apparatur können Proben mittels handüblicher Laborsiebe (Tressengewebe) im Partikelgrößenbereich $> 10 \mu\text{m}$ gewonnen werden. Der bei geschlossenen Sieb-/Filtersystemen üblicherweise auftretenden Problematik des Verblockens wird durch eine kontinuierliche Spülung der Siebfläche entgegengewirkt.
- **Probenaufbereitung im Labor:** Für die Aufbereitung sowohl von Abwasser- als auch von Schlammproben hat sich in den Untersuchungen der TUB die Aufbereitung durch Gefriertrocknung mit anschließender Vermahlung des Probenguts bewährt.
- Zur Probenaufbereitung eignet sich die **Mikrofiltertiegel-Methode** als alternative Methode für niedrig konzentrierte wässrige Proben (anstelle der vorgenannten Feststoffaufkonzentrierung und Gefriertrocknung). Allerdings besteht aufgrund des geringen Durchsatzes des Probevolumens durch den mit einem Sieb versehenen Tiegel noch weitergehender Entwicklungs- und Validierungsbedarf, um die Repräsentativität der mit der Mikrofiltertiegeln erzielten Messergebnisse sicher zu stellen.
- Für **Schlammproben** wurde an der TU BS der Aufschluss mittels Fenton-Reagenz (Oxidation der organischen Substanz mit H_2O_2 und Eisensalz in saurem Milieu) angepasst. Im Ergebnis zeigten sich hohe Reduktionsraten der organischen Trockenmasse ($> 75 \%$ im Rücklaufschlamm, $> 60 \%$ im Faulschlamm). Die detaillierte methodische Vorgehensweise ist dem REPLAWA-Schlussbericht (REPLAWA, 2022) zu entnehmen. Die Reduktion der Begleitmatrix kann zielführend sein, wenn eine eindeutige Identifikation von Polymeren in komplexer Matrix nicht möglich ist.
- Für die **massenbezogene Detektion von Mikroplastik** haben sich zunehmend thermogravimetrische Verfahren durchgesetzt. Für die TED-GC/MS (Thermoextraktion/Desorption in Kombination mit Gaschromatographie/Massenspektro-

skopie) steht eine mit UBA und BAM zur Anwendungsreife weiterentwickelte Methodik zur Verfügung.

- Die Konzentrationen der **PVC-Fraktion** ließen sich mit den vorhandenen Mitteln der TED-GC/MS bisher nicht einwandfrei ermitteln und bleiben im Summenparameter des Mikroplastiks daher bisher unberücksichtigt. Hier ist eine methodische Weiterentwicklung nötig.
- PE macht in auffälligem Maße den Großteil der in Abwasserproben gemessenen Kunststoffe aus (tlw. über 90 %). Die hohen PE-Befunde könnten auf eine systematische Überbestimmung der PE-Fraktion hindeuten, jedoch ließ sich diese anhand der Untersuchungen nicht erhärten.
- Trotz großer Fortschritte bei der Entwicklung der Analysemethoden besteht weiterhin der **Bedarf einer weitergehenden Harmonisierung der Methoden**, um die Vergleich- und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu verbessern. Dies stellt auch eine unabdingbare Voraussetzung für Mentoringprogramme oder spätere Regulierungsansätze dar.
- Solange keine harmonisierten oder standardisierten Untersuchungsverfahren vorliegen, sind für den Vergleich und die Bewertung von Messergebnissen immer auch **Metadaten** wie Abwassercharakteristik, untersuchte Polymere, Partikelgrößen sowie Verfahren der Probenahme, Probenaufbereitung und MP-Detektion heranzuziehen.
- Für das Aufstellen von Stoffstromanalysen und -bilanzen ist die Erhebung von **MP-Massenkonzentrationen** notwendig. Für ökotoxikologische Bewertungen kann auch eine detailliertere Erhebung mit **Partikelanzahlen** und Größenklassen sinnvoll sein. Eine direkte Umrechnung zwischen den Partikelanzahlen und der Massenkonzentration ist bei Umweltproben aufgrund der komplexen Matrix nicht möglich bzw. würde umfangreiche Metadaten erfordern.
- Weitere Ergebnisse und Empfehlungen zur Mikroplastik-Analytik sind auch im Statuspapier „Mikroplastik-Analytik“ (Braun et al., 2020) zusammengefasst, das im Rahmen des BMBF-Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt“ erstellt wurde.

Große Messunsicherheiten bei der MP-Analytik

- Gezielte Untersuchungen zu Messfehlern bei der Mikroplastikanalytik zeigen eine im Vergleich zu gängigen Abwasserparametern sehr hohe Unsicherheit bei MP-Messwerten (für die im REPLAWA-Vorhaben angewandte Analysekette ergab sich bspw. in Summe ein Messunsicherheit von $\pm 85\%$). Vor diesem Hintergrund sind **Messergebnisse** zu Mikroplastikvorkommen generell kritisch zu hinterfragen, zumal auch keine harmonisierten Analyseverfahren vorliegen.
- Die Abschätzung der **Messunsicherheit** über Wiederfindungsexperimente zeigt, dass bei der Probenahme die größten Unsicherheiten innerhalb der analytischen Kette entstehen. Die Ergebnisse belegen die Notwendigkeit einer Weiterentwicklung der Probenahmeverfahren.

- Zuverlässige Daten sind für rechtskräftige oder regulatorische Entscheidungen unabdingbar, jedoch gibt es keine Bewertungsmethode, um die Zuverlässigkeit der Probenahme in Bezug auf die **Repräsentativität** eindeutig festzustellen. Auch wenn jede Probenahme individuell, an bestimmte Vor-Ort-Bedingungen geknüpft und zu unterschiedlichen Zwecken durchgeführt wird, zeigen die im REPLAWA-Vorhaben durchgeführten Untersuchungen, dass die Probenahme anhand der Leistungsparameter Richtigkeit und Präzision bewertet und somit auch Anforderungen an die Repräsentativität gestellt werden können. Analog zu Qualitätssicherungs-Standards für Laboratorien wären auch für die Durchführung der Probenahme **Nachweise für die Repräsentativität** sinnvoll. Dies könnte über ein einheitliches Prüfungsprogramm erfolgen, welches als Bewertungsgrundlage für die Probenahmetechnik genutzt wird. Durch gezielte Repräsentativitätsuntersuchungen könnten zudem Defizite bei der Probenahme aufgedeckt bzw. analysiert werden.
- **Standardisierte Zulassungs- bzw. Bewertungsverfahren** würden auch die Weiter- sowie Neuentwicklung von Probenahmetechniken vereinfachen und die Diskrepanzen zwischen Routine- und Forschungsuntersuchungen verringern.
- Aus den an der TUB durchgeführten Untersuchungen ergibt sich insbesondere ein **Optimierungsbedarf für die repräsentative Erfassung der Schwimm- und Schwebstoffe** bei der automatischen Probenahme.

Hoher Aufwand der MP-Analytik schränkt umfassendes Monitoring ein

- Die Analyse von Mikroplastik ist im Vergleich zur Messung von Standardparametern der Abwassertechnik mit einem **sehr hohen Zeit- und gerätetechnischen Aufwand** verbunden. Bei feststoffarmen Proben sind teilweise große Probevolumina (bis zu 6 m³) zu filtern, um die erforderliche Probemasse für die MP-Detektion zu gewinnen. Mikroplastik wird daher mittelfristig kein gängiger Abwasserparameter für Monitoringprogramme oder die Eigenüberwachung der Betreiber von Abwasseranlagen werden. Für größere Messkampagnen bedarf es entsprechender fachlicher und finanzieller Unterstützung.
- Wegen der großen Herausforderungen und potenziellen Fehlerquellen bei der MP-Analytik (von der Probenahme bis zur MP-Detektion) erfordert die Durchführung repräsentativer und belastbarer MP-Messwerte ein **hohes Maß an Erfahrung und entsprechender gerätetechnischer Ausstattung**. Diese sind in üblichen Abwasserlaboratorien nicht gegeben. Daher empfiehlt es sich unbedingt, für die Durchführung von MP-Messungen erfahrene Institutionen einzubeziehen.

Ermittlung von Reduktionspotentialen technischer Aggregate durch gezielte Mikroplastik-Dotierung

- Für einige Fragestellungen sind nicht die Absolutwerte der gemessenen Mikroplastikkonzentrationen ausschlaggebend, sondern relative Größen wie der Eliminierungsgrad bei der Untersuchung der Mikroplastikreduktion in technischen Anlagen. Zur Verringerung des Aufwandes der MP-Analytik können hierbei Methoden der

gezielten Dotierung von Mikroplastikpartikeln zum Einsatz kommen, bei denen sich die dotierten Partikel durch **spezifische Marker-Eigenschaften** (Fluoreszenz, Magnetismus, stoffliche Besonderheiten) einfacher erfassen lassen als bei einer vollständigen Mikroplastikdetektion bspw. über thermogravimetrische Verfahren.

- Für die im REPLAWA-Vorhaben von der TU BS entwickelte **Methodik der Dotierung fluoreszierender PE-Partikel mit mikroskopischer Detektion durch Fluoreszenzmikroskopie** liegen gute und reproduzierbare Erfahrungen für Vergleiche der Mikroplastikelimination in der biologischen Abwasserreinigung und in nachgeschalteten Filtrationseinheiten vor. Auch bei der Ermittlung des Verbleibs von Kunststoffpartikeln bei der Klärschlammbehandlung ließen sich am Beispiel von dotierten fluoreszierenden PE-Partikeln exemplarische Bilanzierungen für die Feststoff- und die wässrige Phase erarbeiten.
- Bei der **Durchführung von Dotierungsversuchen** liegen besondere Herausforderungen in der Erstellung eines möglichst homogenen, in der Größenfraktionierung reproduzierbaren Partikelgemischs (vorzugsweise mit wiederholter Ermittlung der Partikelgrößenverteilung) sowie in der Einmischung in das Abwasser und/oder den Klärschlamm (empfohlen unter Ethanol-Zugabe). Die Probenahme wässriger Stoffströme muss unter Aufkonzentrierung der Partikel (z. B. durch die RoSi) bei gleichzeitiger Vermeidung von Probeverlusten erfolgen. Die Detektionsergebnisse durch Auszählung mit dem Fluoreszenzmikroskop müssen statistisch abgesichert werden und erfordern eine hohe Anzahl an bis dato nicht automatisierbaren Wiederholungsmessungen (empfohlen wird eine 20-fache Auszählung/Probe) und damit einen hohen Personalbedarf.

Hohe Elimination von Mikroplastikpartikeln bei der Abwasserreinigung und durch nachgeschaltete Filtration

- Die größten Herausforderungen in Bezug auf die Abwasserbehandlung bestehen bei den kleinen Partikelgrößen insbesondere beim Mikroplastik mit Partikelgrößen von 1 bis 1.000 µm sowie Partikelgrößen darunter (Nanoplastik). Zu den messtechnisch bisher schwer erfassbaren **Mikroplastikpartikeln < 10 µm** können für Kläranlagen noch keine belastbaren Aussagen zu Austragspfaden und zum Verbleib getroffen werden. Es wird vermutet, dass diese Partikel in die Klärschlammatrix eingebaut werden. Darüber hinaus sind solche sehr kleinen Partikel, wie auch flüssige, gelöste und gelartige Polymere, voraussichtlich mit vielen bisher eingesetzten technischen Filtrationssystemen kaum zu eliminieren (dazu liegen bisher keine konkreten Daten vor).
- Als Ergebnis des BMBF-Forschungsschwerpunktes ist übergreifend über die in den einzelnen Forschungsverbänden mit unterschiedlichen Verfahren ermittelten Daten für konventionelle kommunale Kläranlagen von einem Mikroplastik-Rückhalt von **mindestens 95 %** auszugehen. Die Untersuchungen im REPLAWA-Vorhaben ergaben einen auf die **Mikroplastik-Masse bezogenen Rückhalt von mindestens 99 % bzw. mindestens 2 Log-Stufen (Zehnerpotenzen)** für Partikel > 10 µm der fünf Polymere PE, PP, PS, PET, PMMA, die besonders häufig in der Umwelt vorkommen, siehe Abbildung 1 mit den von der TUB ermittelten Werten.

- Die hohe Reduktion von Mikroplastikpartikeln $> 10 \mu\text{m}$ aus dem Abwasserstrom ließ sich in **PE-Dotierungsversuchen** auf der Versuchskläranlage der TU BS für **die konventionelle biologische Reinigung nach dem Belebtschlammverfahren** bestätigen.

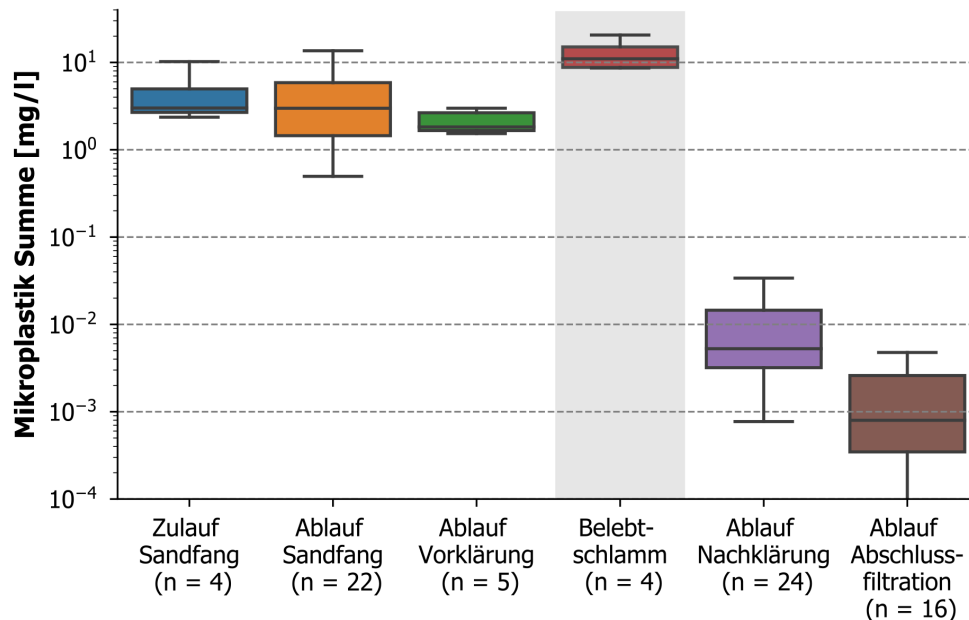


Abbildung 1: Mikroplastik-Massenkonzentrationen (PE, PP, PS, PMMA, PET; $10 - 1.000 \mu\text{m}$) in den einzelnen Reinigungsstufen von acht Kläranlagen in Deutschland (in Klammern: Anzahl der Proben n); deutlich erkennbar ist die Anreicherung im Belebtschlamm

- Dem konventionellen Belebtschlammverfahren **nachgeschaltete Filtrationseinheiten** (kontinuierlicher Sandfilter, Polstofffilter und Mikrosieb) zeigten eine weitergehende Reduktion der Feststoffe im Ablauf der Nachklärung und der dotierten PE-Partikel um 1 – 2 Größenordnungen (Zehnerpotenzen). Somit lässt sich die Qualität des Kläranlagenablaufs mit nachgeschalteten Filtrationstechnologien weiter verbessern.
- Durch den Einsatz von **MBR-Anlagen** kann die Abscheidung entsprechend der Porenweite der Membran auf nahezu 100 % maximiert werden.
- Kommunale Kläranlagen als Punktemissionsquellen tragen aufgrund ihrer hohen Reinigungsleistung nur einen geringeren Anteil an den gesamten direkten Mikroplastik-Emissionen in Gewässer bei, vermutlich in einer Größenordnung deutlich unter 3 %. Sie stellen nach derzeitigem Kenntnisstand daher keine maßgebliche Quelle für Mikroplastik-Einträge in Gewässer dar.
- Die vorgenannten Trendaussagen werden durch Abgleiche von Messergebnissen innerhalb des BMBF-Forschungsschwerpunkts bestätigt. Wegen des begrenzten Probenumfangs beruhen die genannten Eliminationsraten insgesamt jedoch nur auf einer **sehr kleinen Datenbasis** und sind durch weitere Messungen zu verifizieren. Dies betrifft im Besonderen auch abschließende Vergleiche der Filtrationsverfahren, für die vertiefende Untersuchungen notwendig sind.

Bilanzierung von Mikroplastik-Stoffströmen in Kläranlagen

- Anhand von Ergebnissen aus Messkampagnen mit thermogravimetrischer Ermittlung von Mikroplastik-Massekonzentrationen in Stoffströmen großtechnischer Kläranlagen ließen sich im Rahmen der Projektarbeit **überschlägige Bilanzierungen** für Mikroplastik errechnen, siehe Abbildung 2.

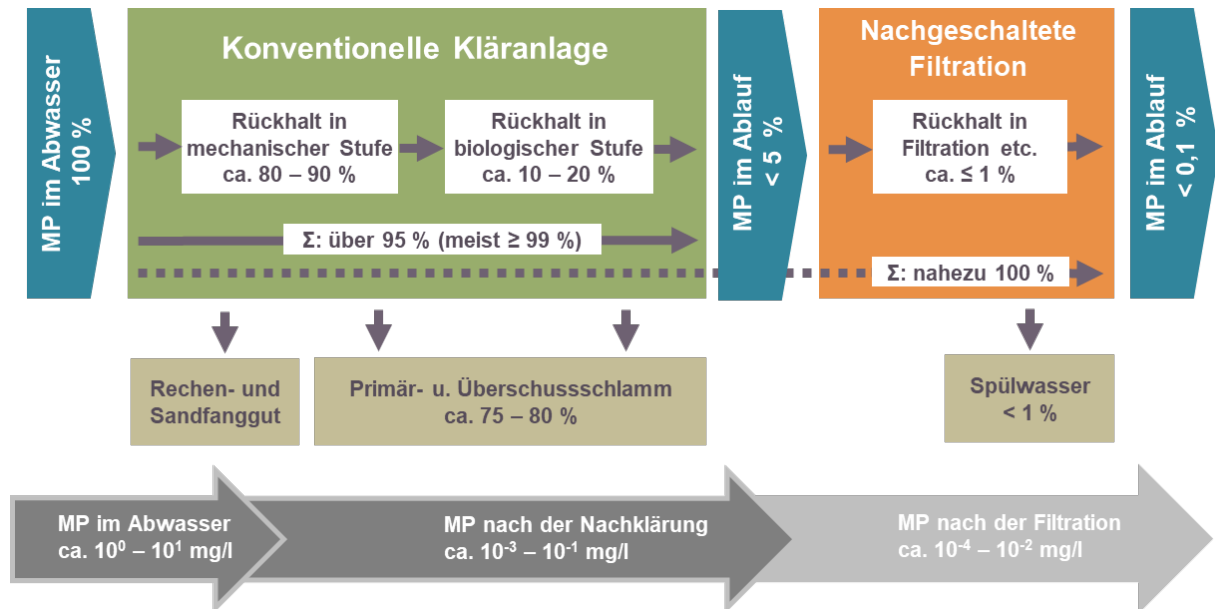


Abbildung 2: Überschlägige Eliminationsraten und Massenkonzentrationen für Mikroplastik (> 10 µm) in kommunalen Kläranlagen

- Die Bilanzen sind mit **großen Bilanzlücken** behaftet, die sich u. a. durch die fehlende Datenbasis aus dem Kläranlagenbetrieb ergeben. Eine Grundvoraussetzung für die sachgerechte Bilanzierung wäre daher die (kontinuierliche) Erfassung von Volumen und Massen der Stoffströme der Abwasser- und Klärschlammbehandlung über den gewählten Bilanzzeitraum sowie die mehrfach wiederholte Ermittlung der Mikroplastikbelastung in Intensivmesskampagnen.

Regulierung von Mikroplastikemissionen aus Kläranlagenabläufen

- Angesichts des geringen Anteils von Kläranlagen an den Mikroplastikemissionen in Gewässer erscheint eine **generelle Regulierung von Mikroplastikemissionen aus kommunalen Kläranlagenabläufen** aufgrund des dafür notwendigen Mitteleinsatzes nach derzeitigem Wissensstand wirtschaftlich nicht sinnvoll, da zunächst geprüft werden müsste, ob die dafür benötigten Mittel bei anderen Eintragspfaden (Misch- und Niederschlagswasser) effizienter eingesetzt werden könnten, um vergleichbare Umweltentlastungspotenziale zu erzielen. Dies könnte beispielsweise über Stoffstrommodelle ermittelt werden.
- Die synergetische Elimination von Mikroplastik kann jedoch als weiteres Argument für den Einsatz einer **weitergehenden Abwasserreinigung** mittels nachgeschalteter Filtrationsstufen zur Phosphor- und/oder Spurenstoffelimination sprechen. Die dafür eingesetzten Filtrationsverfahren zur Rückhaltung von parti-

kulären Bestandteilen im Kläranlagenablauf führen auch zu einer Reduzierung der Mikroplastikemissionen.

Klärschlamm fungiert als Senke für Mikroplastik

- **Klärschlamm** ist die Senke für das im Zuge der Abwasserreinigung eliminierte Mikroplastik. Dies zeigt sich auch durch den in Abbildung 1 erkennbaren Anstieg der MP-Konzentration in der Belebungsstufe von Kläranlagen.
- In Primär-, Überschuss- und Faulschlämmen einer großtechnischen kommunalen Kläranlage der Größenklasse 5 wurden im Rahmen der REPLAWA-Projektarbeiten Massekonzentrationen in einer Größenordnung von $10^0 - 10^1$ g MP/kg TM ermittelt (Stichbeprobung, Detektion mit TED-GC/MS ohne Größenklasseneinschränkung). Die detektierten Massekonzentrationen konnten in keinen signifikanten kausalen Zusammenhang zu den Randbedingungen der Abwasser- und Klärschlammbehandlung (u. a. Abwassercharakteristika, Anschlussgröße der Kläranlage, Verfahrensauswahl) gebracht werden. Die detektierten Massekonzentrationen liegen aber in der Größenordnung vergleichbarer Untersuchungen anderer Forschergruppen und spiegeln somit den aktuellen Stand des Wissens zur Mikroplastikemission aus Klärschlämmen wider.
- Im Rahmen von Dotierungsversuchen (fluoreszierendes PE $>10 \mu\text{m}$) in verschiedenen Skalen ließen sich für die **anaerobe mesophile und thermophile Stabilisierung** auch bei stark überhöhten PE-Konzentrationen im Rohschlamm (bis 101-fach gegenüber Literaturwerten) keine signifikanten negativen Effekte auf den Abbauprozess und die Faulgasproduktion ermitteln. Somit lassen sich keine Hinweise auf die Notwendigkeit einer angepassten Verfahrensführung zur Reduktion von PE-Partikeln oder ihres Einflusses auf die anaerobe Stabilisierung ableiten. Ein möglicher Einfluss anderer Polymerarten erscheint für die Randbedingungen der technischen Faulung unwahrscheinlich.
- Bei der nachgängigen **Faulschlammwässerung mit Zentrifugen und Kammerfilterpressen** hing die Verfrachtung von dotierten PE-Partikeln ($>10 \mu\text{m}$) aus der Schlammmatrix in das Schlammwasser maßgeblich von der Schlammkonditionierung ab und kann bis zu 30 % der PE-Masse in der Feststoffphase betragen. Hier kann eine optimale Konditionierung mit dem Ziel eines hohen Abscheidegrades der Suspensa deutlich zu einer Reduktion der Schlammwasserbelastung beitragen.
- Vorgenannter Effekt gewinnt vor allem an Relevanz, wenn Schlammwässer ohne thermische Behandlung als Ausgangsstoff für die Nährstoffrückgewinnung (z. B. die MAP-Fällung) genutzt werden. Zu empfehlen wäre daher, dass bei Untersuchungsprogrammen zur **Qualität von Rezyklaten** der Phosphorrückgewinnung in Abhängigkeit der vorangegangenen Behandlungsschritte auch Mikroplastikkonzentrationen erhoben werden.
- Das Verhalten anderer Polymerarten bei der Klärschlammwässerung, vor allem mit variierenden Stoffeigenschaften, z. B. der Dichte, wäre weitergehend zu untersuchen.

Mikroplastik wird über bodenbezogene Klärschlammverwertung in die Umwelt eingetragen

- Bei der **thermischen Behandlung des Klärschlammes** werden Mikroplastikpartikel sowohl in der Feststoff- als auch der wässrigen Phase vernichtet, während sie bei der **stofflichen Verwertung** in andere Umweltkompartimente eingetragen werden können. Aus den Messdaten der Mikroplastikfracht im Klärschlamm kommunaler Kläranlagen wurde der derzeitige **jährliche Mikroplastik-Eintrag** durch stoffliche Klärschlammverwertung auf rund 3.000 Mg Mikroplastik aus landwirtschaftlich und rund 1.700 Mg Mikroplastik aus landschaftsbaulich verwerteten Schlämmen hochgerechnet.
- Die Novellierung des Düngerechts trägt dazu bei, dass mittelfristig (2029/2032) die bodenbezogenen Klärschlamm- und damit Mikroplastikeinträge stark reduziert werden, wenngleich sie für Kläranlagen < 50.000 EW weiterhin möglich bleiben. Durch eine weitergehende **Minimierung der bodenbezogenen Klärschlammverwertung** könnte eine weitere Reduzierung der abwasserbürtigen Mikroplastikemissionen über Klärschlämme erreicht werden.
- Zu beachten ist, dass auch andere organische Düngemittel potenzielle Quellen für Mikroplastik sind (**Komposte, Gärreste**).
- Die **Datenlage** zur Bewertung der Emissionen sowohl im Klärschlamm als auch in anderen Sekundärrohstoffdüngern sowie die Belastung der aufnehmenden Böden, ist bis dato allerdings **sehr dünn**. Eine abschließende Einordnung und Abwägung des Emissionspotentials und der derzeitigen Bodenbelastung ist daher noch nicht möglich.

Relevante Mikroplastikemissionen bei Niederschlags- und Mischwassereinleitungen

- **Mischwasserabschläge** (aus der Mischkanalisation) und **Niederschlagswassereinleitungen** (aus der Trennkanalisation) sowie direkte Niederschlagswasserabflüsse von Verkehrsflächen werden derzeit als wesentliche Eintragsquelle von Mikroplastik in die aquatische Umwelt angesehen (siehe Abbildung 3).
- Für eine Bewertung der Relevanz der Einleitungen aus Misch- und Niederschlagswasser gibt es bisher keine systematisch erhobenen Messdaten und Auswertungen zu den Mikroplastikkonzentrationen und -frachten im Kontext mit zugehörigen Daten über die Einzugsgebiete und Niederschlagsereignisse. Hier besteht **erhöhter Untersuchungsbedarf, um diese Einträge zu quantifizieren**.
- Dies betrifft auch weitergehende Bewertungen zum Rückhalt in den unterschiedlichen **Anlagen der Mischwasser- und Regenwasserbehandlung** (wie Regenüberlaufbecken, Regenklärbecken, Retentionsbodenfilter und Aggregate mit Lamellenseparatoren, Filtereinsätzen etc.). Da Mikroplastik ein Vielstoffgemisch mit unterschiedlichen werkstofflichen Eigenschaften ist, lassen sich bekannte Abscheideleistungen solcher Anlagen bspw. für sedimentierbare Stoffe (AFS) nicht direkt übertragen.

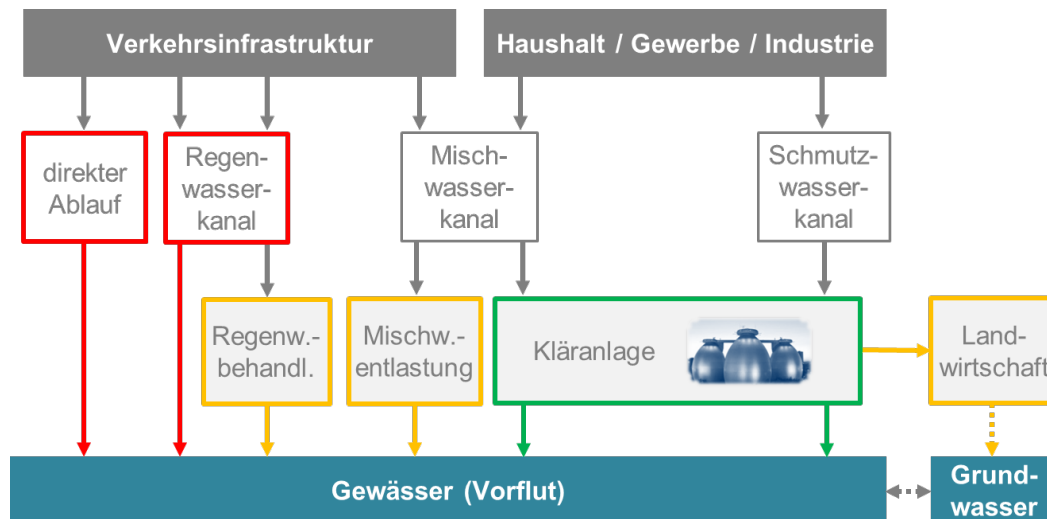


Abbildung 3: Eintragspfade von Mikroplastik in die aquatische Umwelt (vermutete Relevanz in Bezug auf die Gesamtemissionen: rot = hoch; gelb = mittel, grün = gering)

- Der Transport und Verbleib innerhalb der Abwasserinfrastruktur ist für den auf Verkehrsflächen anfallenden **Reifenabrieb**, der als eine der größten Mikroplastikquellen gilt, aufgrund der Schwierigkeiten bei der messtechnischen Erfassung und Bestimmung weiterhin unklar.
- Für Mikroplastik-Messungen bei Mischwasserabschlägen und Regenwassereinleitungen sind spezifische Herausforderungen für eine **ereignisgesteuerte und repräsentative Beprobung** von Abschlagsereignissen zu berücksichtigen. Dies betrifft insbesondere die zeitliche Verteilung der MP-Frachten bei Abschlagsereignissen. Die grundsätzliche Methodik für die Probenahme wurde im REPLAWA-Vorhaben erfolgreich getestet.
- Die Relevanz des für die Bewertung der stofflichen Belastung von Niederschlagswasser im DWA-A/M 102 (2020 – 2022) eingeführten Referenzparameters AFS63 ist in Bezug auf Kunststoffemissionen unklar.

Verringerung von unkontrollierten Einträgen aus der Misch- und Regenwasserkanalisation

- Überschlägige Abschätzungen der MP-Eintragspfade über Abwasser zeigen eine deutliche Tendenz, dass die **größten MP-Einträge in Gewässer aus unbehandelten Misch- und Niederschlagswassereinleitungen stammen**. Wegen fehlender Datengrundlagen bestehen jedoch große Unsicherheiten bei der Quantifizierung solcher Einträge.
- Aufgrund der potenziellen human- und ökotoxikologischen Wirkung von Kunststoffemissionen und der Langlebigkeit der sich in der Umwelt anreichernden Kunststoffe **sollten unkontrollierte MP-Einträge in Gewässer vermieden bzw. verringert werden**.
- Dass der Stand der Technik hinsichtlich des Behandlungsbedarfs von Niederschlagsabflüssen und Mischwasserüberläufen in Gewässer rechtlich teilweise noch unbestimmt ist, ist auch vor dem Hintergrund bestehender Erkenntnisse zu öko-

toxikologischen Risiken durch Antibiotikaresistenzen und Spurenstoffemissionen aus fachlicher Sicht unbefriedigend. **Zu den Risiken der Mikroplastikemissionen sind ergänzende Aussagen zu erarbeiten**, um in der Gesamtschau zu eindeutigen Empfehlungen für die Regulierung von Misch- und Niederschlagswassereinleitungen zu kommen.

- Zur Minimierung von Mikroplastikeinträgen in Gewässer sind geeignete **Rückhaltesysteme als Barrieren** zu untersuchen, welche verhindern, dass Abwasser in Form von Niederschlagswasser unbehandelt in die aquatische Umwelt entlassen wird. Dies könnte auch durch klarere politische **Regulierungsansätze für Niederschlags- und Mischwassereinleitungen** forciert werden.
- Am Beispiel des Parameters Mikroplastik wird deutlich, dass Einträge in Gewässer durch Abwasserbehandlungsmaßnahmen technisch in einem bestimmten Umfang reduziert werden können, dass aber auch **zusätzliche Maßnahmen an der Quelle** notwendig sind.

Umfassende Quantifizierung der MP-Eintragspfade aus der Siedlungswasserwirtschaft in Deutschland ist nötig

- Als **Grundlage für politische Entscheidungen** zur Reduzierung von Verschmutzungen durch Mikroplastik ist eine umfassende Quantifizierung der MP-Eintragspfade aus der Siedlungswasserwirtschaft nötig, die eine Bewertung der einzelnen MP-Einträge und -Verminderungspotenziale ermöglicht.
- Bisher existierende **Ansätze von Bilanzierungsmodellen** basieren mangels Eingangsdaten auf einer Vielzahl von Annahmen und sind daher **wenig belastbar und teilweise widersprüchlich**.
- Das **Generieren und Verdichten von Messdaten** für die oben bereits im Einzelnen genannten Bereiche würde dabei helfen, übergeordnete Modellierungen von MP-Stoffströmen auf regionaler oder nationaler Ebene aufzustellen.

Maßnahmen verstärkt an den Emissionsquellen ansetzen

- Maßnahmen zur Reduktion von Kunststoffemissionen in der Siedlungswasserwirtschaft sind mit **erheblichem technischem und wirtschaftlichem Aufwand** verbunden. Als End-of-Pipe-Lösung sollten sie daher Vermeidungsmaßnahmen, die direkt bei den Emissionsquellen wie der Produktion und Nutzung von Kunststoffprodukten ansetzen, nur ergänzen – auch im Sinne des Verursacherprinzips.

Mikroplastikverschmutzung von Gewässern

- Untersuchte Gewässer wiesen **signifikante Mikroplastik-Belastungen** in Größenordnungen von im Mittel mehreren Mikrogramm/Liter auf und damit in der Größenordnung von Kläranlagenabläufen.
- Um den selektiven Ausschluss von Partikeln bei der Analyse zu verhindern wird die Probenahme über die gesamte Wassersäule und den gesamten Gewässerquerschnitt empfohlen, bspw. in Anlehnung an die **Vielpunktprobenahme** nach Habersack (2017).

- Mikroplastik-Bilanzen für einzelne Gewässerabschnitte lassen sich alleine über die Untersuchung von Wasserproben und Punkteinleitungen nicht schließen, da **Sedimentations- und Remobilisierungseffekte zu berücksichtigen sind**. Zur Beurteilung des Stofftransportes sollten bei solchen Untersuchungen daher Sedimentbeprobungen mit in Messprogramme integriert werden. Zur Berücksichtigung des Akkumulationsverhalten der MP-Partikel innerhalb eines Gewässerabschnittes sind Probenahmen longitudinal über den Fließweg zu erheben.
- Einzelne Stichproben eignen sich nicht, um belastbare Aussagen zur Belastung eines Gewässers mit Mikroplastik zu treffen.

Internationale Regulierungsansätze

- Die Bestandsaufnahme zur internationalen Regulierung zeigt, dass bislang keine globale Regulierung zu Plastik etabliert wurde. Allerdings hat die United Nations Environment Assembly (UNEA), also die **Umweltversammlung der Vereinten Nationen**, im März 2022 ein Verhandlungsgremium beauftragt, einen bindenden völkerrechtlichen Vertrag zur Verhinderung globaler Plastikverschmutzung zu erarbeiten. Die Bundesregierung sollte sich in diese Verhandlungen aktiv einbringen und das Gremium politisch, wie durch Ressourcen unterstützen. Gerade weil es sich um ein grenzüberschreitendes Umweltproblem handelt, sind internationale Initiativen maßgeblich zu deren Bewältigung.
- Plastik ist ein **komplexer Gegenstand für nationale, regionale und internationale Regulierung**, weil es unterschiedlich eingesetzt wird und verschiedene Materialarten umfasst, aber auch, weil die Beurteilung der Probleme durch Plastikverschmutzung wie die präferierten Lösungsansätze erheblich variieren. Insbesondere im globalen Kontext erschwert die Fragmentierung der Akteursinteressen internationale Kooperationen zur Plastikregulierung erheblich. Deshalb darf die Initiative der UNEA nicht geringgeschätzt werden, sondern stellt ein dringend benötigtes Forum dar, um die Interessen unterschiedlicher Stakeholder zu diskutieren und gemeinsame Potentiale auszuloten.
- Aus Regulierungsperspektive stehen regulierenden Akteuren unterschiedliche Instrumente zur Verfügung: Verbote, Steuern, Abgaben sowie die Setzung eines Rahmens innerhalb dessen bestimmte Akteure Selbstregulierung etablieren können. Dabei können diverse Regulierungsgegenstände benannt werden, etwa konkrete Kunststoffe, aber auch Plastikprodukte oder Plastikmüll. Hinsichtlich der Regulierungsziele unterscheiden sich Vorgaben, die sich auf die Vermeidung von Plastiknutzung beziehen, maßgeblich von jenen, die die Konsequenzen der Nutzung bearbeiten wollen, indem sie besseres Recycling oder strengere Abwasserreinigung vorgeben. Vor dem Hintergrund dieser Möglichkeiten sollte **zukünftige Plastikregulierung** den gesamten Produktzyklus von Plastik adressieren, verschiedene Instrumente wie Verbote und Anreize gemeinsam nutzen und alle relevanten Akteure dazu miteinbeziehen.
- Die **internationale Bestandsaufnahme der Plastikregulierung aller 193 UN-Mitgliedstaaten** (Auswertung der Datenbank „PlasticsReg“, 2022) zeigt bei der staatlichen Regulierung eine große Varianz in Bezug auf die regulierten Gegenstände (Plastikprodukte), der genutzten Instrumente (Verbote, Steuern, Ab-

gaben und Selbstregulierung) sowie der beabsichtigten Ziele. In vergleichender Perspektive ergibt sich kein einheitliches Muster in der Regulierung, auch wenn Staaten mehrheitlich Verbote für bestimmte Produktgruppen (insbesondere Plastiktüten und Einwegkunststoffprodukte) etabliert haben. Stattdessen stellt die beobachtbare Verregelung insgesamt ein Mosaik dar, das bestimmte Phasen des Produktzyklus betont und andere außen vor lässt. Nötig wäre mehr Austausch über die Effekte unterschiedlicher Regulierung, der in internationalen oder regionalen Foren ermöglicht werden sollte.

- Unter den **Regionalorganisationen** weist die Europäische Union die deutlichste Regulierungsdynamik auf. Demgegenüber stehen die Afrikanische Union und der Verband Südostasiatischer Nationen (ASEAN) erst am Beginn regionaler Verregelung, auch wenn es in diesen Regionen durchaus eine Vielzahl nationaler Regulierung gibt. Der interregionale Austausch, der seit einiger Zeit beobachtbar ist, sollte ausgebaut werden, um **Lernen über Regionsgrenzen** hinweg zu ermöglichen.
- Für **primäres Mikroplastik** besteht bisher kaum direkte Regulierung. Diese würde zunächst die Definition von Mikroplastik und dessen Bestimmung (Mikroplastikanalytik) voraussetzen, bei der auch ingenieurs- wie naturwissenschaftliche Expertise zentral ist. Eine prominente Ausnahme stellt die Regulierung von Microbeads (bewusst zugesetzten Mikroplastikkügelchen) durch die Europäische Chemikalienagentur (ECHA) dar. Auch wenige Nationalstaaten haben bereits Microbeads verregelt. Allerdings stellen Microbeads nur einen kleinen Ausschnitt der primären Mikroplastik dar. **Sekundäres Mikroplastik** – vor allem Reifenabrieb oder Kunststofftextilfasen – bleibt bei solcher Regulierung außen vor. Dass es sich insbesondere bei Letzteren um schwer zu regulierende Probleme handelt, sollte nicht zur Untätigkeit führen, zumal es auch weiterhin die Möglichkeit gibt, am ursprünglichen Makroplastikprodukt anzusetzen.
- Aus Regulierungsperspektive sollte nach der nun vorliegenden Bestandsaufnahme von Plastikregulierung der Fokus erweitert werden, um angesichts der Vielzahl unterschiedlicher Regulierungsinstrumente, -gegenstände und -ziele belastbares Wissen über die **Effekte** solcher Regulierungen zu generieren. Dazu bedarf es einer systematischen, international vergleichenden Analyse der **Implementierung** von Plastikregulierung, um deren Wirkung auf die Reduktion von Einträgen in die Umwelt bestimmen zu können. Somit sollten sowohl politische wie wissenschaftliche Akteure auf eine solche Evaluierung der Regulierungsinitiativen drängen, um auf der Grundlage dieser Ergebnisse „smarte“ Regulierung zu fördern und weniger effektive Verregelung zu ersetzen.

Forschungsbedarf

Der interdisziplinäre BMBF-Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt – Quellen

• Senken • Lösungsansätze“ hat die Mikroplastik-Forschung auch im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft einen großen Schritt weitergebracht. Durch den sehr hohen Zeit- und Kostenaufwand für die massenbezogene Mikroplastikanalytik bei Abwasser-, Schlamm- und Gewässerproben war der Umfang der gewonnenen Messdaten in allen bisherigen Mikroplastik-Untersuchungen allerdings stark begrenzt, weshalb Aussagen zu Mikroplastikrückhalten etc. nur auf geringen Probenzahlen beruhen. Zu vielen siedlungswasserwirtschaftlichen Einzelaspekten aber auch für übergreifende Modellierungen und weitergehende Bewertungen fehlen weiterhin belastbarere MP-Messdaten in größerem Umfang. Wegen des derzeit noch hohen messtechnischen Aufwandes ist mittelfristig nicht davon auszugehen, dass Mikroplastik-Messdaten in größerem Umfang durch Betreiber von Abwasseranlagen erhoben und bereitgestellt werden können. Daher sind weitere Mikroplastik-Untersuchungen direkt von bereitgestellten Fördermitteln abhängig.

Wie die oben zusammengestellten Erkenntnisse zeigen, besteht zur Ermittlung und Verringerung von Mikroplastik-Einträgen im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft insgesamt ein anhaltend hoher Forschungsbedarf, der in der nachfolgenden Zusammenstellung im Einzelnen dargelegt wird.

Analyse und Wirkungsbeurteilung von Mikroplastik

- Unterstützung bei der **Mikroplastik-Definition**: Was genau ist Mikroplastik? Welche Bestandteile sind warum besonders relevant? Wie werden diese am besten bestimmt?
- Trotz großer Fortschritte bei der Entwicklung der Analysemethoden besteht weiterhin **Bedarf an einer weitergehenden Harmonisierung der Methoden für** Probenahme, Probenaufbereitung und Mikroplastik-Detektion, um sichere Mikroplastik-Befunde zu erzielen und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu verbessern. Dies stellt auch eine unabdingbare Voraussetzung für Monitoringprogramme oder spätere Regulierungsansätze dar. Hier sollte Deutschland auf Basis der erzielten Fortschritte durch den BMBF-Forschungsschwerpunkt weiter vorausgehen.
- Die Aussagen zu Mikroplastik-Befunden fußen bisher auf wenigen Einzelmesswerten, die statistische Auswertungen kaum zulassen. Eine **Verdichtung der Datengewinnung aus allen Umweltkompartimenten** auf Basis von im Vorfeld harmonisierten Methoden (s. o.) wäre nötig.
- **Effizientere Mikroplastikanalytik für Wasser- und Schlammproben**: Die aufwändige Analytik war bei vielen Messprogrammen im BMBF-Forschungsschwerpunkt ein Flaschenhals. Ziel sollte eine schnellere und kostengünstigere MP-Analytik sein. Diese wäre auch ein Treiber für größere Monitoringprogramme und eine Voraussetzung für Regulierungsansätze.
- Bei der thermogravimetrischen Detektion von Mikroplastik mittels TED-GC/MS besteht Weiterentwicklungsbedarf zur Bestimmung auch der **PVC-Fraktion**.

- Integration von Markern für Reifenabrieb wie **SBR** (Styrol-Butadien-Kautschuk) in Analyseprogramme, um die Emissionspfade aus dem Verkehrssektor bewerten zu können.
- Die **human- und ökotoxikologischen Wirkungen von Mikroplastik** sind insbesondere für sehr kleine Partikel noch nicht geklärt. Für eine Beurteilung, welche Mikroplastik-Größenklassen diesbezüglich besonders relevant sind und daher gezielt verringert werden sollten, steht die wissenschaftliche Basis noch aus.
- Erarbeitung von Aussagen zu Emissionen der bisher schwer erfassbaren Kunststoffpartikeln $< 10 \mu\text{m}$ einschließlich **Nanoplastikpartikel** aus Abwasseranlagen, da für diese Fraktionen ein größeres human- und ökotoxikologisches Potenzial vermutet wird. Die derzeitigen Probenahme- und Analysemethoden stoßen hier an ihre Grenzen. Für die sich durchsetzende TED-GC/MS wäre eine Weiterentwicklung für Partikel $< 5 \mu\text{m}$ bspw. für feststoffarme Wasserproben nötig.
- Zu Mikroplastikkonzentrationen in **Proben mit besonders herausfordernder Matrix** wie Bodenproben oder sehr feststoffarmen Sickerwasserproben sind die analytischen Methoden weiter zu verifizieren und entsprechende Messwerte zu erheben.

Vertiefen des Systemverständnisses und der MP-Stoffströme

- Für die Bewertung von **Verfahren zum technischen Rückhalt von Mikroplastik** in Kläranlagen fehlt es an vertiefendem Verständnis für die Effekte in einzelnen Verfahrensstufen auf die Mikroplastik-Matrix. Dieses wäre auch Voraussetzung für abschließende, **vergleichende Bewertungen der unterschiedlichen Filtrationsverfahren**.
- Validierungsbedarf besteht auch bei der Quantifizierung der **Mikroplastikstoffströme über die Klärschlammverwertung** in Böden und Wasser.
- Zu Misch- und Regenwasser liegen bisher nahezu keine belastbaren Mikroplastikmessdaten vor. Es fehlt bisher auch das Verständnis für die zeitliche Verteilung der Mikroplastik-Frachten bei Einleitereignissen. Da **Misch- und Regenwassereinleitungen** als besonders relevanter Eintragspfad von Mikroplastik in Gewässer gelten, sind vermehrte Anstrengungen nötig, diese Einträge unter Berücksichtigung der Herausforderungen bei der **ereignisgesteuerten, repräsentativen Beprobung von Abschlagsereignissen** zu quantifizieren.
- Für den Bereich des Misch- und Regenwassers sind zudem geeignete Maßnahmen zur Reduzierung von Mikroplastikemissionen zu identifizieren (so wie das für Kläranlagen nun teilweise erfolgt ist). Hierzu fehlen vergleichende Untersuchungen zur Effizienz von **Verfahren der Misch- und Regenwasserbehandlung** gemäß dem Stand der Technik bzw. von neuen Ansätzen.
- Bestehende Ansätze für eine **deutschlandweite Modellierung der Mikroplastik-Stoffströme in der Siedlungswasserwirtschaft** sollten auf Basis belastbarer Daten weitergeführt werden. Ein vertieftes **Systemverständnis ist notwendig** für die Ableitung von sinnvollen und effizienten Maßnahmen zur Verringerung von MP-Einträgen in die Umwelt: Wo besteht das größte Verminderungspotenzial? Welche Maßnahmen sind besonders effizient?

- Bisherige Untersuchungen zur **Verschmutzung von Gewässern mit Mikroplastik** erfolgten überwiegend über die Messung von Partikelzahlen. Masse- bzw. frachtbezogene Werte für Gewässer liegen nur orientierend vor. Für weitergehende Einordnungen der Gewässerbelastungen sowie Bilanzierungen über Gewässerabschnitte wären umfangreichere Messungen in der Wassersäule und im Sediment von Gewässern notwendig.

Interdisziplinäre Forschung für die Vorbereitung effektiver Regulierung

- Um möglichst evidenzbasiert politische Entscheidungen treffen zu können, empfiehlt sich die Fortsetzung **interdisziplinär zusammengesetzter Forschungsverbünde** wie im BMBF-Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt“. Sie haben äußerst positiv zum Gesamtverständnis der Umweltverschmutzung durch Plastik beigetragen und dadurch Schnittstellen der sehr komplexen Fragestellungen bearbeiten können, die sich auch im Vorfeld umfassender Regulierung stellen.
- Sinnvoll wäre außerdem eine **Evaluierung der interdisziplinären Zusammenarbeit**, um deren Potentiale in künftigen Projekten noch steigern zu können, indem etwa mehr Möglichkeiten für den interdisziplinären Austausch institutionalisiert werden. Je niedrigschwelliger der wechselseitige Informationstransfer organisiert werden kann, desto stärker können sich naturwissenschaftliche, technologische und gesellschaftliche Perspektiven integrieren.
- Zudem könnten weitere **politikwissenschaftliche Studien zur Implementation und Effektivität unterschiedlicher Instrumente von Plastikregulierung** konkrete Aussagen generieren und damit Empfehlungen für eine potenziell effektivere Eindämmung der Umweltverschmutzung durch Plastik geben. Bereits vorliegende Ergebnisse verweisen auf einen relevanten Zusammenhang von Regulierungsinstrumenten und staatlichen Kapazitäten, etwa bei der Überwachung von Verboten und der Ahndung bei deren Verletzung, dies sollte aber systematisch analysiert werden.

Literatur

Ein umfassendes Quellenverzeichnis zu den in diesem Dokument genannten Erkenntnissen ist dem Schlussbericht zum REPLAWA-Vorhaben (REPLAWA, 2022) zu entnehmen. Nachfolgend werden nur die im vorliegenden Text direkt benannten Quellen angegeben.

- Bertling, J., Bannick, C. G., Brinkmann, L., Barkmann, L., Braun, U., Knoblauch, D., Kraas, C., Mederake, L., Nosić, F., Philipp, B., Sartorius, I., Schritt, H., Stein, U., Wencki, K., Wendt-Potthoff, K., Woidasky J., 2022: Kunststoff in der Umwelt – ein Kompendium, 2. Auflage 2022, <https://doi.org/10.24406/umsicht-n-647638>, online verfügbar unter https://bmbf-plastik.de/de/Publikation/Kompendium_Kunststoff-in-der-Umwelt_2022.
- Braun, U. et al., 2020: Mikroplastik-Analytik, Probenahme, Probenaufbereitung und Detektionsverfahren. Statuspapier im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Plastik in der Umwelt - Quellen • Senken • Lösungsansätze“, Stand: November 2020, https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2020-11/Statuspapier_Mikroplastik%20Analytik_Plastik%20in%20der%20Umwelt_2020.pdf.
- DWA-A/M 102, 2020 – 2022: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. Arbeits- und Merkblattreihe, Hrsg.: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- Habersack, H., Haimann, M., Kerschbaumsteiner, W., Lalk, P., 2017: Schwebstoffe im Fließgewässer. Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransportes, Auflage 2.
- Hinzmann, M., Knoblauch, D., Mederake, L., Schritt, H., Stein, U. (Hrsg.), 2022: Kernbotschaften zum Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt“. Download unter <https://bmbf-plastik.de/de/Publikation/Kernbotschaften>.
- Länderbericht, 2018: Mikroplastik in Binnengewässern Süd- und Westdeutschlands. Bundesländerübergreifende Untersuchungen in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz. Teil 1: Kunststoffpartikel in der oberflächennahen Wasserphase. Karlsruhe, Augsburg, Wiesbaden, Recklinghausen, Mainz, 2018, online verfügbar unter https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/6_sonderreihen/L%C3%A4nderbericht_Mikroplastik_in_Binnengew%C3%A4ssern.pdf.
- REPLAWA, 2022: Verbundprojekt REPLAWA: Reduktion des Eintrags von Plastik über das Abwasser in die aquatische Umwelt. Schlussbericht zum BMBF-geförderten FuE-Vorhaben, Juli 2022, online verfügbar unter <http://www.replawa.de/publikationen/>.
- UBA (Hrsg.), 2017: Wasserwirtschaft in Deutschland, Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen. Hrsg.: Umweltbundesamt und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2017, ISSN 2363-832X, Download unter www.umweltbundesamt.de/publikationen, Kap. 3.8 Einträge von Kunststoffen in die Umwelt.
- PlasticsReg, 2022: Datenbank zu nationalen Plastikproduktregulierungen. Über die Webseite des Instituts für Internationale Beziehungen der TU Braunschweig online verfügbar: <https://www.tu-braunschweig.de/ib/forschung/projekte/replawa/plasticsreg-datenbank>.

