

Mikroplastik-Emissionen aus Kläranlagen

Welche Rolle spielt die Abwasserbehandlung?

Tim Fuhrmann, Ingo Urban, Holger Scheer (Essen), Philipp Lau, Luisa Reinhold, Matthias Barjenbruch (Berlin), Katrin Bauerfeld und Stefanie Meyer (Braunschweig)

Zusammenfassung

Mikroplastikpartikel werden über Abwasser in die aquatische Umwelt eingetragen. Kläranlagenabläufe gelten als einer der Eintragspfade. Aktuelle Untersuchungen zeigen jedoch, dass in Kläranlagen die Mikroplastikpartikel im Abwasser weitgehend zurückgehalten werden können. Für konventionelle Kläranlagen wurden Rückhalteraten von über 99 % ermittelt, die über früheren Annahmen liegen. Kläranlagen stellen somit eine untergeordnete Rolle beim Eintrag von Mikroplastik in die aquatische Umwelt dar. Größere Emissionen werden bei Mischwasserentlastungen und Niederschlagswasserabläufen von Verkehrsflächen gesehen. Die Bestimmung absoluter Mikroplastik-Masskonzentrationen ist sehr aufwendig. Vergleichswerte aus der Literatur weisen mangels Standardisierung große Abweichungen auf. Diese resultieren insbesondere aus unterschiedlichen Probenahme- und Probenaufbereitungsmethoden. Ohne detaillierte Kontextinformationen sind Messwerte daher schwer reproduzierbar und vergleichbar.

Schlagwörter: Abwasserreinigung, kommunal, Analytik, Klärschlamm, Kunststoff, Mikroplastik, Mischwasser, Probenahme, Probenaufbereitung, TED-GC/MS

DOI: 10.3242/kae2021.09.003

Abstract

Microplastic emissions from sewage treatment plants

What role does wastewater treatment play?

Microplastic particles enter the aquatic environment via wastewater. Sewage treatment plant effluent is one of the pathways. However, the latest analyses show that sewage treatment plants can largely retain the microplastic particles in wastewater. Retention rates in excess of 99% have been recorded for traditional sewage treatment plants – higher than previously assumed. Sewage treatment plants thus play a lesser role in microplastics being introduced into the aquatic environment. Combined sewer systems and rainwater discharge from traffic areas are bigger sources of emissions. Determining absolute microplastic mass concentrations is a very elaborate process. Comparative figures from literature indicate major discrepancies due to a lack of standardisation, especially due to varying sampling and sample preparation methods. Readings are therefore hard to reproduce and compare without detailed contextual information.

Key Words: wastewater treatment, municipal, analysis, sewage sludge, plastic, microplastic, combined wastewater, sampling, sample preparation, TED-GC/MS

1 Mikroplastik als relevanter Parameter in der aquatischen Umwelt

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 Mikroplastik auch als Träger von Spurenstoffen und pathogenen

Mikroorganismen dient [1]. Eine Reduzierung der weiteren Kunststoffemissionen in die Umwelt erscheint schon aus Vor-sorgegründen unabdingbar.

Untersuchungen zu Kunststoffpartikeln in deutschen Binnengewässern [1, 2] haben auf Kunststoffeinträge über das Abwasser aufmerksam gemacht, sodass das Thema auch in der Siedlungswasserwirtschaft an Relevanz gewonnen hat. Als Mikroplastik werden dabei in der Regel Kunststoffpartikel in einem Größenbereich von 1 µm bis 5 mm bezeichnet, wobei die längste Dimension des Partikels für die Einordnung ausschlag-

gebend ist. Es bestehen jedoch bisher noch keine eindeutig normierten Grenzen.

2 Eintragungspfade von Mikroplastik in die aquatische Umwelt

Neben Einträgen durch Verwehungen, Littering und Bodenabtrag werden Mikroplastikpartikel auch über Schmutz-, Misch- und Niederschlagswasser in die aquatische Umwelt eingetragen. Die Mikroplastikfrachten im Abwasser lassen sich dabei zurückführen auf

- primäres Mikroplastik, das direkt in mikroskopischer Größe hergestellt und beispielsweise in Kosmetika, Hygiene- und Reinigungsprodukten oder als Basispellets zur weiteren Produktion eingesetzt wird
- sekundäres Mikroplastik, das durch Verschleiß und Zersetzung von Makroplastikteilen wie Verpackungsmaterial oder Textilien entsteht.

Mikroplastik gelangt über den Abwasserpfad grundsätzlich auf drei Wegen in die aquatische Umwelt (Abbildung 1):

- über das in Kläranlagen behandelte Schmutz- und Mischwasser bzw. über das Ausbringen von Klärschlamm in der Landwirtschaft
- über Mischwasserentlastungen
- über unbehandeltes oder durch Regenwasserbehandlungsanlagen aufbereitetes Niederschlagswasser.

Eine besondere Rolle spielen Mikroplastikemissionen von Verkehrsflächen. Insbesondere der Reifenabrieb, der nach [4] und [5] für Deutschland mit rund 100 000 t/a abgeschätzt wird. Soweit die Entwässerung der Verkehrsflächen über die Mischwasserkanalisation erfolgt, sind entsprechende Frachten an Reifenabrieb und sonstigen verkehrsbezogenen Partikeln auch im Kläranlagenzulauf zu finden, von denen – wie in Abschnitt 4.2 quantifiziert wird – der allergrößte Teil in den Kläranlagen jedoch zurückgehalten werden kann.

Bei Verkehrsflächen, die über die Regenwasserkanalisation entwässert werden, erfolgt ein gewisser Mikroplastikrückhalt über die Regenwasserbehandlung, sofern vorhanden. Belastbare Daten liegen hierzu bisher nicht vor. Über nicht erfasste Oberflächenabflüsse von Verkehrsflächen gelangen Mikroplastikpartikel ohne Frachtreduzierung in die aquatische Umwelt.

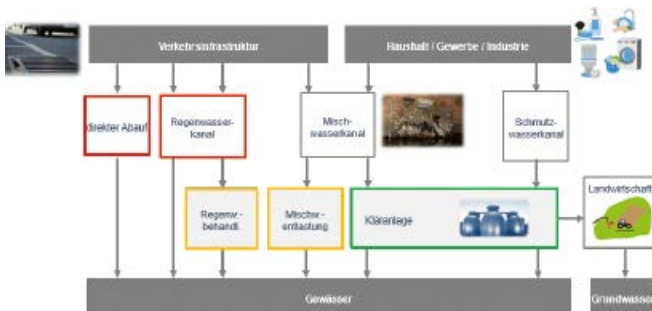


Abb. 1: Eintragungspfade von Mikroplastik in die aquatische Umwelt (modifiziert nach [3])

Das sagen unsere Kunden über hydrograv adapt für Nachklärbecken:

Besser als Filtern!



Probleme gelöst!

Hydrograv adapt hat das große Problem der Überlastung unserer Nachklärbecken gelöst.

Heiko Kümpel - Kläranlagenleiter
Großostheim Bachgau (35.000 EW)
Betreibt adapt seit 2009.

Wir beraten Sie gerne:

0351-811 355-0

info@hydrograv.com

Alle Infos: hydrograv.com

hydrograv

hydraulik • gravitatives trennen

3 Probenahme und Analyse

3.1 Herausforderungen bei umweltwissenschaftlichen Mikroplastikbestimmungen

Zentrales Problem bei der Bestimmung von Mikroplastik in Umweltproben sind die fehlende Standardisierung und der hohe technische Aufwand von der Probenahme bis zur Analyse. Mikroplastik umfasst als Sammelbegriff eine Vielzahl von einzelnen Kunststoffen, die unterschiedliche Materialeigenschaften und chemische Zusammensetzungen aufweisen. Aufgrund der Unterschiede vor allem in Bezug auf die Dichte, Größe und Form kommt es zu einer heterogenen Verteilung der einzelnen Partikel über die Wassersäule. Das Mikroplastik liegt im Wasser als partikuläre Schwimm- (beispielsweise Polypropylen mit einer Dichte von $0,83 \text{ g/cm}^3$), Schweb- (beispielsweise Polystyrol mit $1,05 \text{ g/cm}^3$) oder sedimentierbare Stoffe (beispielsweise Polyethylenterephthalat mit einer Dichte von $1,37 \text{ g/cm}^3$) vor. Hinzu kommt, dass unterschiedlich fortgeschrittene Alterungs- und Degradationsstufen der Mikroplastikpartikel, Agglomerationen und Koagulationen mit anderen Partikeln sowie die Bildung von Biofilmen auf der Oberfläche die Erfassung bei der Probenahme und die Identifizierung bei der anschließenden Analyse erschweren.

Die Methodik der Probenahme und Probenaufbereitung haben sehr großen Einfluss auf die späteren Mikroplastikmesswerte, siehe Abschnitt 4.2. Dies betrifft auch die Bestimmung relevanter Begleitparameter wie AFS [6]. Aufgrund der ubiquitären Verbreitung von Mikroplastik besteht zudem während der gesamten analytischen Kette, von der Probenahme im Feld bis zur Analyse im Labor, die Gefahr der Probenkontamination. Es ist daher auf möglichst kunststofffreie Ausrüstungen und Arbeitsbedingungen bzw. selbst auf den Abrieb von nicht medienführenden Teilen zu achten, beispielsweise bei persönlicher Schutzausrüstung (Textilien, Handschuhe) oder Deckeln der Probenahmeflaschen. Die Erhebung und Berücksichtigung von Blindwerten sind in diesem Zusammenhang unabdingbar.

3.2 Partikelzählung versus Massenbestimmung

Bei der Bestimmung von Mikroplastikvorkommen sind abhängig von der Fragestellung grundsätzlich zwei Messgrößen zu unterscheiden:

- Partikelanzahl, entweder mit Flächenbezug (bei offenen Gewässern zum Beispiel Partikel/ m^2 , Partikel/ km^2) oder Volumenbezug (Partikel/ m^3), bestimmt durch spektroskopische Verfahren, vorwiegend genutzt zur ökotoxikologischen Bewertung
- Massegehalte bzw. Konzentration mit Volumenbezug (mg/m^3 , $\mu\text{g/m}^3$), bestimmt durch thermoanalytische Verfahren zur quantitativen Beschreibung der Abwasserzusammensetzung.

Bei Mikroplastikuntersuchungen zu Gewässern erfolgen Messwertangaben häufig in Partikelzahlen. In der Siedlungswasserwirtschaft ist dagegen die Angabe von Massenkonzentrationen bzw. daraus resultierenden Frachten üblich, beispielsweise zur Erstellung von Stoffstrombilanzen. Massegehalte sind auch aus regulatorischer Sicht eine wichtige Größe, um eine Einschätzung des Vorkommens vorzunehmen. Eine Umrechnung zwischen den beiden Messgrößen Partikelanzahl und Massenkonzentration ist bei Umweltproben nicht möglich.

Die nachfolgenden Darstellungen zur Probenahme und Probenaufbereitung basieren auf Untersuchungen im REPLAWA-Projekt [7] mit dem Ziel der Bestimmung von Massenkonzentrationen.

3.3 Probenahme

Beim bisherigen Stand der Technik wird die Probenahme stärker durch Aspekte der Durchführbarkeit als der Repräsentativität bestimmt. Wegen der oben genannten unterschiedlichen Eigenschaften von Kunststoffpartikeln ist es praktisch nicht möglich, alle Kunststoffe in gleichem Ausmaß bei einer einzelnen

GWU-Umwelttechnik GmbH



- kompetent
- nachhaltig
- innovativ
- zukunftsorientiert

Ihr Experte für Umweltmesstechnik

- Beratung
- Planung
- Verkauf
- Service

www.gwu-umwelttechnik.de

Probenahme repräsentativ zu erfassen. Deswegen ist bei der Herstellung einer Feldprobe, also der eigentlichen Entnahme einer Teilmenge aus der örtlichen Grundgesamtheit, vor allem auf eine zeitlich und räumlich repräsentative Erfassung zu achten, beispielsweise durch 24-h-Mischproben sowie Vielpunktprobenahmen in einem Gewässerprofil. Da eine gute Durchmischung die Wahrscheinlichkeit erhöht, enthaltene Partikel ohne selektiven Ausschluss einzelner Partikel erfassen zu können, sind bei der Probenahme turbulente Strömungsverhältnisse zu bevorzugen.

3.4 Probenvorbereitung im Feld

Publizierten Messergebnissen liegen verschiedene Probenahmemethoden mit unterschiedlichen Maschen- und Lochweiten zur Aufkonzentrierung der Feststoffmatrix und damit des Mikroplastiks zugrunde, wodurch die Reproduzier- und Vergleichbarkeit der Ergebnisse ohne entsprechende Kontextinformationen kaum gegeben ist.

Das Probenahmevolumen ist in erster Linie von der gewählten Analyseverfahren und der damit verbundenen Bestimmungsgrenze, der zu untersuchenden Partikelgröße sowie dem zu beprobenden Medium abhängig. Je nach Feststoffgehalt sind für die Mikroplastikbestimmung zum Teil sehr große Probenvolumina (beispielsweise 2–3 m³ im Kläranlagenablauf) notwendig. Diese großen Probenvolumina erhöhen zwar die Repräsentativität der Probenahme, müssen jedoch ohne Kontaminationen und Verluste bis zu einem laborüblichen Volumen aufkonzentriert werden.



Abb. 2: Probenahmeapparatur mit rotierendem Sieb („RoSi“) aus 10- μ m-Tressengewebe (Bild: TU Berlin)

Dazu hat sich die Siebung vor Ort in der Praxis bewährt. Im siedlungswasserwirtschaftlichen Bereich liegt die mit üblichen Sieben technisch realisierbare Untergrenze bei einer absoluten Maschenweite von 10 μ m (minimal 5 μ m). In diesem Zusammenhang wurden innerhalb des BMBF-geförderten Forschungsschwerpunkts „Plastik in der Umwelt“ [8] mehrere Methoden entwickelt (siehe beispielsweise [5, 9, 10]). In dem dieser Publikation zugrundeliegenden REPLAWA-Projekt [6] wurde von der TU Berlin der in Abbildung 2 dargestellte pragmatische Ansatz einer Apparatur zur Probenvorbereitung entwickelt, die im Kern aus einem schräg geneigten, rotierenden Sieb besteht, das kontinuierlich beschickt und mit Filtrat zurückgespült wird, wodurch der Aufbau eines Filterkuchens verhindert wird. Mit der teilautomatisierten Apparatur ist eine Fest-flüssig-Trennung mit einer definierten Untergrenze von 10 μ m (5 μ m) über einen langen Zeitraum (> 24 Stunden) möglich. Die Feldproben werden bis zu einem Volumen von 2 L aufkonzentriert.

3.5 Probenaufbereitung im Labor

Abhängig vom Umweltkompartiment und den damit verbundenen Matrixeffekten müssen die Proben im Labor weiter aufbereitet werden. Zum Teil sind zeitintensive Verfahren (Dauer bis zu zwei Wochen) zur Entfernung von anorganischen und organischen Bestandteilen notwendig.

Um eine schonende Aufbereitung des Analyten zu gewährleisten, werden die Feststoffe der im REPLAWA-Projekt entnommenen Laborproben mittels Gefrier Trocknung separiert, bilanziert und anschließend zur Homogenisierung gemahlen.



ABIONIK

AIR WATER LIFE

Ihr führender Systemanbieter
für **Wasser, Abwasser & Luft**

INDUSTRIE

KOMMUNEN

MARITIM

INDIVIDUELLE
SPEZIALLÖSUNGEN

Getauchte
Module für
Membran-
Bio-Reaktoren
(MBR)

960 m²
Filterfläche
CUBE LFM
20124

über 100.000 Module
weltweit im Einsatz,
als wirkungsvolle Barriere
gegen Bakterien und Viren


MARTIN


STEINHARDT


LIKUTECH


LIKUSTA


GUHONG


MATING MO

MEMBERS OF
→ **ABIONIK GROUP**

ABIONIK GROUP
Friedrichstr. 95 | 10117 Berlin
ABIONIK.com

KA Korrespondenz Abwasser, Abfall · 2021 (68) · Nr. 9

www.dwa.de/KA

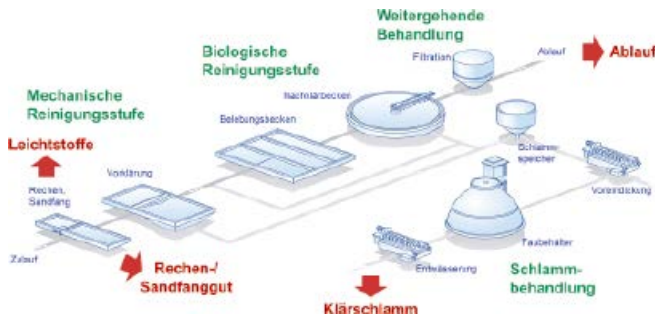


Abb. 3: Austragspfade von Mikroplastik auf Kläranlagen

Durch das Mahlen wird der durchschnittliche Partikeldurchmesser vereinheitlicht und damit der Einfluss massenrelevanter größerer Partikel gegenüber den mengenmäßig deutlich häufiger auftretenden kleinen Partikeln bei der Analyse reduziert.

3.6 Mikroplastik-Analytik

Für die Bestimmung der Massenkonzentration von Mikroplastik werden in der Regel thermoanalytische Methoden angewendet [11]. Im Rahmen des REPLAWA-Projekts kommt die in der Mikroplastik-Analytik zunehmend etablierte TED-GC/MS (Thermal-Extraction-Desorption/Gas-Chromatographie/Massen-Spektrometrie) zur Anwendung. Bei dieser wird die Probe unter Stickstoffatmosphäre bis 600 °C erhitzt. Die Probe und darin vorhandene Kunststoffe zersetzen sich, und die Zersetzungsprodukte werden über einen Gaschromatographen getrennt und anschließend in einem Massenspektrometer detektiert.

Mit dieser Methode lassen sich neben der Masse auch die unterschiedlichen Kunststoffarten bestimmen. Für die in Abbildung 4 dargestellten Ergebnisse wurden beispielsweise mit PE, PP, PS, PMMA und PET fünf Polymere bestimmt, die über 60 % der Kunststoffproduktionsmasse im Jahr 2018 widerspiegeln [12] und somit als repräsentativ angesehen werden können. In den REPLAWA-Untersuchungen der TU Berlin konnten Nachweisgrenzen von 1,1–4,4 µg (0,01–0,04 Massen-% der Analyseprobe) für die verschiedenen Polymere erreicht werden; in der Literatur sind teilweise noch kleinere Werte zu finden [13]. Allgemein zu beachten sind Unterschiede der Messergebnisse in Abhängigkeit der Kalibriermethode (bspw. externe Kalibrierung mit Matrix oder mit Reinstoffen ohne Matrix).

Um wissenschaftlich fundierte Ergebnisse sicherzustellen, sind zweckmäßige Validierungsmethoden anzuwenden. Ein Parameter dabei ist die Reproduzierbarkeit, die auch über die Homogenität der Probe Auskunft gibt – was für feststoffreiche Proben eine besondere Herausforderung darstellt. Zur Überprüfung der Richtigkeit der Ergebnisse sind auch Wiederfindungsmessungen mit aufgestockten Matrixproben unter Zugabe der reinen Polymere durchzuführen. In Abschnitt 4.2 sind beispielhaft Validierungsangaben aus dem REPLAWA-Projekt genannt. Auch die Beteiligung an Ring- oder Vergleichsversuchen wird ergänzend empfohlen.

Da nur diejenigen Kunststoffe detektiert werden, nach denen auch explizit gesucht wird, ist bei Messwerten des nicht standardisierten Summenparameters Mikroplastik immer auch die Nennung der jeweils detektierten Kunststoffarten notwendig.

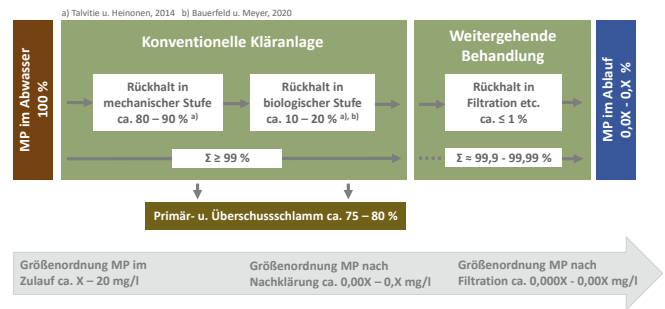


Abb. 4: Größenordnungen von Eliminationsraten und Massenkonzentrationen für Mikroplastik in kommunalen Kläranlagen

4 Rückhalt von Mikroplastik in Kläranlagen

4.1 Kläranlagen als Senke für Mikroplastik

Während des Reinigungsprozesses in der Kläranlage wird auch die Mikroplastikfracht im zufließenden Abwasser schrittweise reduziert. Als Senke wirken das Rechen- und Sandfanggut, das Leichtstoff-/Fettfanggut sowie der Klärschlamm (Abbildung 3 und Abschnitt 5).

Größere Partikel (großes Mikroplastik > 1 mm und Makroplastik > 5 mm) lassen sich in der mechanischen Stufe von Kläranlagen generell besser abscheiden als kleines Mikroplastik. Schätzungsweise 80–90 % der Mikroplastikeinträge, vor allem größere Fraktionen, werden bereits vor der biologischen Stufe zurückgehalten [17] (Abbildung 4).




Schlussfiltration – Mikroplastikrückhalt Vierte Reinigungsstufe – P Elimination

Polstofffiltration ist eine günstige und effiziente Alternative gegenüber der Sandfiltration und Mikrosiebe. Mecana forscht auf diesem Gebiet schon seit 25 Jahren und hat zahlreiche Anlagen weltweit geliefert.

Die Mecana Versuchsanlagen sind dafür konzipiert die Technologie unter realen Bedingungen zu testen um unseren Kunden die maximale Investitionssicherheit zu gewährleisten. Die letzte Generation unserer OptiFiber® eignet sich für die verschiedensten Anwendungen, von Schlussfiltration über Phosphorelimination bis hin zu vierter Reinigungsstufe.




Mecana: kompetente Beratung
kombiniert mit robuster Anlagentechnik!

Mecana Umwelttechnik GmbH
CH-8864 Reichenburg | T +41 55 464 12 00

www.optifibermedia.com
www.mecana.ch | info@mecana.ch

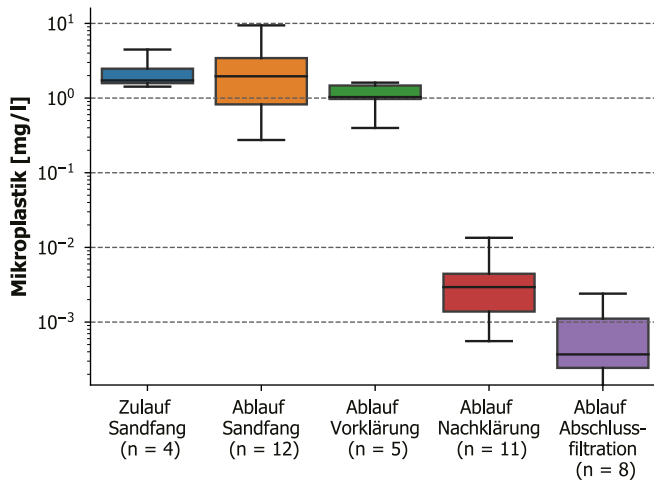


Abb. 5: Mikroplastik-Massenkonzentrationen (PE, PP, PS, PMMA, PET; 10–1000 μm) in den einzelnen Reinigungsstufen von Kläranlagen (erste Ergebnisse)

Kunststofffraktionen mit Partikelgrößen oberhalb des Mikroplastiks (> 5 mm) werden zu rund 100 % zurückgehalten [14]. Austräge größerer Kunststoffpartikel, wie sie 2018 an der Schlei zu beobachten waren, sind Ausnahmefälle, die auf unsachgemäße Betriebszustände oder im genannten Fall auf die unregelmäßige Zuführung von Kunststoffpartikeln über Co-Substrate zurückzuführen sind.

Da Kunststoffpartikel mit größerer Dichte eher durch Sedimentationsprozesse bei der Abwasserreinigung entfernt werden, gelangen Kunststoffpartikel mit einer geringen Dichte eher in den Ablauf. Die Größenverteilung dreht sich zum Ablauf hin nahezu um, insbesondere bei Vorhandensein einer weitergehenden Filtration. Untersuchungen von [15] zeigen beispielsweise im Zulauf für Partikelgrößen von 1–5 mm einen Anteil von 45 % und für < 63 μm von 10 %, jedoch im Ablauf nach einer Sandfiltration Werte von < 10 % für Partikelgrößen von > 1 mm und 40 % für 20–63 μm .

4.2 Quantifizierung des Mikroplastikrückhalts in Kläranlagen

Wie bereits ausgeführt, sind publizierte Messergebnisse von Mikroplastikkonzentrationen wegen fehlender Standards bei der Mikroplastikbestimmung und fehlenden Detailangaben zu Probenahme, -aufbereitung und Analytik meist nicht direkt vergleichbar. Die relativen Eliminationsraten für die gesamte Kläranlage oder einzelne Behandlungsstufen liegen allerdings oftmals in vergleichbaren Größenordnungen.

So deuten frühere Untersuchungen, fast ausschließlich auf Basis von Partikelzahlen, in die Richtung, dass Mikroplastikpartikel im konventionellen Klärprozess (Rechen, Sandfang, gegebenenfalls Vorklärung, Belebungsverfahren) in Größenordnungen von mindestens 90–96 % zurückgehalten werden (zum Beispiel [16–20]). Aktuellere massenbezogene Messwerte unter anderem aus Aachen, Berlin und Braunschweig ([15] und Abbildung 5) zeigen jedoch höhere Eliminationsgrade bei konventioneller mechanisch-biologischer Abwasserreinigung in einer Größenordnung von über 99 % (entspricht Reduzierung um ca. 2–3 Log-Stufen) sowie Größenordnungen um 99,9–99,99 % (ca. 3–4 Log-Stufen) bei nachgeschalteten Filtrationsverfahren (Sand- und Tuchfilter) (Abbildung 4).

Diese Elimination wird durch die in Abbildung 5 dargestellten Werte bestätigt, die auf ersten Untersuchungsergebnissen der TU Berlin zu sieben Kläranlagen (mechanisch-biologische Reinigung, teilweise Sand- und Tuchfiltration) im Rahmen des REPLAWA-Projekts basieren. Die Proben wurden gemäß Abschnitt 3.3 ff. mittels 24-h-Mischproben durch das in Abbildung 2 dargestellte rotierende Sieb mit 10 μm Maschenweite gewonnen und mittels Gefriertrocknung und Mahlen für die Analytik in der TED-GC/MS aufbereitet. Die Quantifizierung erfolgte mittels externer Kalibrierung mit Reinstoffen ohne Matrix. Je nach Kalibrierungsmethode können die Messwerte abweichen (bei Kalibrierung mit Matrix werden höhere Werte erwartet).

Die relativen Mikroplastikeliminationen auf den sieben Kläranlagen unterschiedlicher Größenklassen zeigen jeweils die gleiche Größenordnung und werden durch Untersuchungen von anderen Forschungsvorhaben im BMBF-Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt“ [8] sowie von [15] in Aachen bestätigt. Die Ergebnisse aus dem REPLAWA-Projekt wie auch von [15] ergeben Zulaufkonzentrationen in einer Größenordnung um 10^1 mg/l. Im Ablauf konventioneller Klärprozesse werden Größenordnungen von 10^{-2} bis 10^{-1} mg/l erreicht. PE und PP bilden den größten Anteil unter den untersuchten Kunststoffen, zusammen meist deutlich über 90 %. Von [10] publizierte Vergleichswerte für den Einzelkunststoff PS von 0,072 $\mu\text{g/l}$ im Kläranlagenablauf liegen in ähnlicher Größenordnung wie der REPLAWA-Wert von 0,115 $\mu\text{g/l}$, obwohl erstgenannte mit einem anderen Verfahren analysiert wurden (Py-GC/MS). Dagegen weisen unveröffentlichte Daten aus Berlin große Unterschiede bis zum Faktor 10^3 auf. Dies macht deutlich, dass Messergebnisse, die mit unterschiedlichen Messmethoden ermittelt wurden, oftmals nicht direkt vergleichbar sind. Solche Abweichungen sind auf unterschiedliche Probenahme-, Probenaufbereitungs- und Analysemethoden zurückzuführen. Dies betrifft beispielsweise die Reduzierung der in der Probenmatrix enthaltenen Organik (zum Beispiel über Fenton-Aufschluss). Eine diesbezügliche Klärung mit anderen Projekten ist in Vorbereitung.

Zur Validierung der in Abbildung 5 dargestellten Ergebnisse wurden Wiederfindungsversuche mit synthetischen Proben aus einem Gesteinsmehl-Kunststoffgemisch und mit aufgestockten Matrixproben durchgeführt. Vorläufige Ergebnisse der TU Berlin zeigen eine Wiederfindung von 79–119 % für die synthetischen Proben in anorganischer Matrix und 70–83 % für die Polymere PE und PP in den aufgestockten Matrixproben. Die Blindwerte bei den Messungen lagen durchgängig unterhalb der Nachweisgrenze. Kontaminationen während der Probenvorbereitung können damit als vernachlässigbar angesehen werden. Zusammen mit einer relativen Standardabweichung von 24 % aus neunfacher Analyse einer Beispielprobe werden die Ergebnisse laborintern als plausibel angenommen.

Auch wenn weitere Validierungen und Verdichtungen von Messwerten noch nötig sind, zeigt sich bereits, dass der Kläranlagenablauf als Eintragspfad für Mikroplastik in die aquatische Umwelt nur eine untergeordnete Rolle spielt. Bei üblichen 5–6 mg/L AFS im Kläranlagenablauf entspräche eine Mikroplastikkonzentration gemäß Abbildung 5 einem Anteil von weniger als 0,1 % der Feststoffe im Ablauf – und liegt damit geringer als bisher angenommen.

Ein Abgleich mit den vorliegenden Messwerten zu Mikroplastikfrachten in Gewässern (zum Beispiel aus [1]) ist nicht

möglich, da im Gewässerbereich bisher fast ausschließlich die Partikelanzahlen statt der Massegehalte als Messgröße sowie abweichende Messbereiche der Partikelgröße zur Anwendung kamen.

4.3 Maßnahmen zum weitergehenden technischen Rückhalt von Mikroplastik

Um in Kläranlagen einen weitergehenden Rückhalt von Mikroplastikpartikeln zu erzielen, können Filtrationsverfahren wie Tuchfiltration, Mikrosiebung, Raumfiltration (Sandfilter) und Membranverfahren eingesetzt werden.

Aktuell liegen nur wenige Studien mit Realdaten speziell zur Entfernung von Mikroplastik durch Filtrationsanlagen vor. Beispielsweise berichten [16] für die Kläranlage Oldenburg mit einer Tuchfiltration als nachgeschalteter Verfahrensstufe von einem partikelbezogenem Mikroplastikrückhalt von 97 %. Aktuelle Daten von großtechnischen Kläranlagen aus dem REPLAWA-Projekt und auch [15] zeigen die oben genannten, deutlich höheren massebezogenen Eliminationsraten von rund 99,9–99,99 % (3–4 Log-Stufen). Der Gesamteliminationsgrad für Mikroplastik in der Kläranlage kann durch nachgeschaltete Filtration um rund 1–2 Log-Stufen erhöht werden (vgl. auch Abbildung 5).

Innerhalb des REPLAWA-Verbunds konnten zusätzliche gezielte halbtechnische Untersuchungen zur Nachfiltration über Tuch- und Sandfilter sowie die Mikrosiebung mit Dotierung von fluoreszierendem Mikroplastik und Detektion über Fluoreszenzmikroskopie Abscheidegrade von insgesamt bis zu 99,9 % bzw. bezogen auf den Filterzulauf von 80–98 % bestätigen [21].

5 Mikroplastik im Klärschlamm

5.1 Bilanzierung der Klärschlammfracht

Bilanziert man den Verbleib der Mikroplastikpartikel im Zulauf der Kläranlage über den Gesamtprozess der Abwasserbehand-

lung (Abbildung 4), so lässt sich die in der mechanischen Reinigungsstufe einschließlich Rechen und Sand-/Fettfang entfernte Mikroplastikfracht nach [15] und [17] grob auf 80 bis 90 % des Zulaufs beziffern, für die biologische Stufe auf 10 % [17] bis 20 % [21]. Insgesamt werden rund 75–80 % der Zulauffracht im Rohschlamm inkorporiert. Zu beachten ist, dass diese Werte auf unterschiedlichen Messmethoden beruhen, sodass die absoluten Messwerte teilweise nicht vergleichbar sind; die relativen Größenordnungen korrelieren jedoch zueinander.

Eine zuverlässige Bilanzierung der Mikroplastikfrachten für einzelne Prozessschritte der Klärschlammbehandlung wird durch die Herausforderungen, die die komplexe Klärschlammmatrix an die Probenaufbereitung und Detektion von Mikroplastikpartikeln stellt, erschwert. Auch hier widerspricht die Heterogenität der Untersuchungsansätze und -ziele (internationaler Studien klaren Aussagen zum Mikroplastikverbleib [22]. Nach bisherigem Stand des Wissens scheint die Klärschlammstabilisierung, selbst unter thermophilen Randbedingungen, die Mikroplastikfracht im Rohschlamm nicht signifikant zu verändern, kann aber die Partikelgrößenverteilung beeinflussen. Dieser Zusammenhang lässt sich beispielsweise auch für die Bioabfallvergärung zeigen [23]. Für den Verfahrensschritt der Klärschlamm entwässerung ist davon auszugehen, dass Mikroplastikpartikel aus der Feststoffmatrix entzogen und dem Schlammwasser zugeführt werden. Der Einfluss der Konditionierung und der Art der mechanischen Entwässerung auf den Mikroplastiktransfer in das Schlammwasser sind aktuell Gegenstand anhaltender Untersuchungen.

Neben den grundsätzlichen Überlegungen zum Verbleib des Mikroplastiks bei der Schlammbehandlung lassen bis dato lediglich einige wenige Einzelmessungen zu Massenkonzentrationen eine Einschätzung der Mikroplastikfracht im zu entsorgenden Klärschlamm zu und erlauben damit direkte Rückschlüsse auf eine potenzielle Befruchtung der aufnehmenden Umweltkompartimente. So beschreiben [24] für die Polymere PE, PP und PS Konzentrationen im Klärschlamm von 3,7–3,9 mg MP/g TR. Vorläufige Ergebnisse großtechnischer Beprobungskampagnen auf kommunalen Kläranlagen im REPLAWA-



ZUVERLÄSSIGKEIT,
 LANGLEBIGKEIT,
 EFFIZIENZ

Auslegung, Optimierung und
 Fertigung von Belüftungssystemen
 Austauschbelüfter und -membranen

Environmental Dynamics International

Michael Peter
 Fon +49 9073 921212
 michael.peter@wastewater.com



Projekt liegen vergleichbar im ein- bis zweistelligen Promillebereich der Massenkonzentration. Eine weitaus umfangreichere Datenlage zeigt sich in Studien mit Mikroplastikpartikelzählungen. Diese Daten lassen allerdings keine Rückschlüsse auf die tatsächliche Mikroplastikfracht im Klärschlamm zu.

5.2 Austrag von Mikroplastik über die Klärschlammverwertung

Der Mikroplastikfracht im zu entsorgenden Klärschlamm kommt eine besondere Bedeutung bei der stofflichen Verwertung des Schlammes zu, wenn die Partikel anders als bei der thermischen Verwertung auf landwirtschaftliche Nutzflächen verbracht werden und Prozesse in Bodenökosystemen beeinflussen [25] bzw. in weitere Umweltkompartimente verlagert werden können [26]. Die Entsorgungswege anfallender Klärschlämme blicken dabei in Deutschland auf eine dynamische Historie zurück, die vor allem durch sukzessive Veränderungen im Dünge- und Abfallrecht beeinflusst ist. Lag der Anteil stofflich verwerteten Klärschlammes in den 1990er-Jahren noch bei deutlich über 60 %, hat sich dieser Anteil auf aktuell rund 25 %, entsprechend 0,44 Millionen Mg TR/a, reduziert ([27], Datengrundlage 2018). Legt man die in der Literatur verfügbaren, in Abschnitt 5.1 genannten Angaben zu Massenkonzentrationen an Mikroplastik im Klärschlamm zu Grunde, sind damit im Jahr 2018 insgesamt rund 1700 Mg Mikroplastik auf landwirtschaftlichen Flächen eingetragen worden. Im Zuge der Neuregelung der Klärschlamm Entsorgung nach novelliertem Abfallrecht wird allerdings spätestens 2032 die direkte stoffliche Verwertung für den Großteil des anfallenden Klärschlammes ausgeschlossen. Damit reduziert sich die fortschreibende Akkumulierung von Mikroplastikpartikeln auf den aufnehmenden Böden. Prognosen von [28] ordnen 2032 lediglich 7 % der Klärschlammmasse der stofflichen Verwertung bei insgesamt nahezu gleichbleibendem Klärschlammfall zu. Damit beliefe sich bei gleichbleibender Belastung des Klärschlammes der Jahreseintrag an Mikroplastik für aufnehmende Böden künftig auf rund 480 Mg.

Die Klärschlammverordnung (AbfKlärV [29], § 14) begrenzt die maximal zulässige Klärschlammaufbringung auf landwirtschaftliche Nutzflächen auf 5 Mg TR/(ha · a). Dieser Wert kann abhängig von einer in der Düngeverordnung (DüV [30]) zu erstellenden Nährstoffbilanz für den aufnehmenden Boden geringer ausfallen. Unter Berücksichtigung der oben genannten Mikroplastikkonzentrationen im Klärschlamm ergeben sich somit bei einer landwirtschaftlichen Verwertung rechnerische Mikroplastikeinträge von bis zu 6,5 kg MP/(ha · a).

6 Mikroplastikeinträge über Mischwasserabschläge und Regenüberläufe

Wie in Abbildung 1 dargestellt, stellt der Eintrag von Mikroplastik über den Pfad der Schmutz- oder Mischwasserkanalisation und die Kläranlage nur einen von mehreren siedlungswasserwirtschaftlichen Eintragungspfad in die aquatische Umwelt dar. Wie oben ausgeführt, lassen die derzeit laufenden Untersuchungen erwarten, dass der Eintrag von Mikroplastik über Kläranlagen nur eine untergeordnete Rolle spielt und mit technischen Mitteln weitgehend beherrschbar ist. Überschlägige Abschätzungen zeigen für die Kläranlagenabflüsse einen Anteil von deutlich unter 5 % an den Mikroplastik-Emissionen in die aquatische Umwelt.

Deutlich größeres Potenzial für Emissionsminderungen stellt der Eintrag über Mischwasser- und Regenwasserabschläge oder der direkte Abfluss von Verkehrsflächen dar. Nach [4] sind über 50 % [1548 von 2880 g/(E · a)] der erfassten Mikroplastikemissionen dem Verkehrssektor zuzurechnen (Abrieb von Reifen, Fahrbahnen und Markierungen). Der Niederschlagswasserabfluss von diesen Flächen wird aber nur zu einem Teil den Kläranlagen zugeführt und somit gereinigt, sodass insbesondere im Bereich der Regenwasserbehandlung weiterer Handlungsbedarf zu erwarten ist. Jedoch stehen gerade für diesen Bereich belastbare Daten zu Mikroplastikstoffströmen noch weitgehend aus.

Problematisch im Hinblick auf Emissionsminderungen zeigt sich hier insbesondere die Erfassung der Verkehrsflächen außerhalb der Siedlungsbebauung, deren Abflüsse weder gefasst noch gereinigt werden. Aber auch die große Zahl an einzelnen Austragsquellen aus der Misch- und Regenwasserkanalisation stellt eine besondere Herausforderung für mögliche Maßnahmen zur Verringerung von Mikroplastikeinträgen dar: Während die Anzahl der öffentlichen Kläranlagen mit rund 9105 angegeben wird, gibt es nach offiziellen Zahlen 45 508 erfasste Regenüberlaufbecken, Stauraumkanäle und Regenwasserüberläufe im Mischsystem sowie 4133 Regenklärbecken in der Regenwasserkanalisation (Datengrundlage 2016) [31]. Und viele Abflüsse von Verkehrsflächen gerade im ländlichen Bereich sind dabei noch gar nicht erfasst.

7 Fazit und Ausblick

Mikroplastik wird über Schmutz-, Misch- und Niederschlagswasser in die aquatische Umwelt eingetragen und betrifft daher direkt die Abwasserentsorgung. Für die Bewertung der Mikroplastikemissionen über das Abwasser bestehen jedoch große Herausforderungen aufgrund unterschiedlicher Messgrößen (Partikelzahl/Massengehalt) sowie fehlender Standardisierung der Probenahme, Probenaufbereitung und Analyse von Umweltpfaden auf Mikroplastik. Daher sind Publikationen zu Mikroplastikkonzentrationen in Abwasserströmen und Gewässern nur bedingt miteinander vergleichbar. Solange nicht einheitliche Standards zur reproduzierbaren Bestimmung des Mikroplastikgehalts eingeführt sind, bleibt die Bewertung der Messwerte generell schwierig. Es wird empfohlen, bei der Erstellung eigener Messreihen mit einer identischen Methodik zu arbeiten, um die Ergebnisse untereinander vergleichbar zu halten.

Die aktuellen Untersuchungen zu massenbezogenen Eliminationsraten von Mikroplastik in Kläranlagen zeigen, dass bei der konventionellen mechanisch-biologischen Abwasserreinigung Mikroplastik zu über 99 % (ca. 2–3 Log-Stufen) aus dem Abwasserstrom eliminiert wird. Mit zusätzlichen technischen Maßnahmen wie Filteranlagen werden Eliminationsraten von bis zu 99,99 % (ca. 3–4 Log-Stufen) erzielt. Diese relativen, massebezogenen Eliminationsraten decken sich größenordnungsmäßig mit anderen Literaturdaten, liegen aber über den bisherigen partikelbezogenen Auswertungen. Ein kritischer Punkt sind die teilweise erheblichen Unterschiede in den publizierten Absolutwerten der Massenkonzentrationen, die bis zu drei Zehnerpotenzen betragen können. Diese werden auf unterschiedliche Probenahme- und Probenaufbereitungsmethoden zurückgeführt und befinden sich derzeit in der Klärung.

Auch wenn weitere Validierungen noch ausstehen, kann zusammenfassend davon ausgegangen werden, dass unter den

Eintragspfaden für Mikroplastik in die aquatische Umwelt die Kläranlagen aufgrund der hohen Eliminationsleistungen nur eine untergeordnete Rolle spielen. Für den Bereich der Siedlungswasserwirtschaft sind daher zukünftig verstärkt die Eintragspfade über Mischwasserentlastungen und Regenwasserabflüsse in den Blick zu nehmen.

Mit der Entfrachtung des Mikroplastiks aus dem Abwasserstrom in den Kläranlagen ist eine Belastung des Klärschlammes als Senke der partikulären Polymere unmittelbar verknüpft. Die Aufkonzentration im Klärschlamm wird insbesondere dann relevant, wenn dieser bodenbezogen verwertet wird und Mikroplastikpartikel damit in andere Umweltkompartimente ausgetragen werden. Die noch wenig belastbare Datengrundlage zu Massenkonzentrationen im Klärschlamm erlaubt aktuell nur eine näherungsweise Abschätzung der Verfrachtung von Mikroplastik über Klärschlamm in die Umwelt. Diese Daten gilt es zukünftig auch in den Kontext der Belastung anderer biogener Reststoffe zur bodenbezogenen Verwertung, wie Komposte und Gärreste, zu stellen. Vom besonderen Interesse sollte auch die Qualität der zukünftig steigenden Mengen an Phosphor-Rezyklen in Bezug auf eine mögliche Mikroplastikkontamination sein.

Zu allen Fragestellungen stehen weitere Untersuchungsergebnisse noch aus. Dies gilt insbesondere auch für kleinere Partikel unterhalb des bis dato probenahmetechnisch erfassbaren Bereichs von bis zu 5–10 μm (also Sub-Mikroplastik bzw. Nanoplastik), zumal diesen ein höheres ökotoxikologisches Potenzial zugeschrieben wird. Diese sehr kleinen Partikel sind, wie auch flüssige, gelöste und gelartige Polymere, zudem mit vielen bisher eingesetzten technischen Filtrationssystemen kaum zu eliminieren.

Es besteht also weiterhin vielfältiger Forschungsbedarf zum Verständnis von Mikroplastik in der Siedlungswasserwirtschaft. Ein Zwischenfazit soll mit Handlungsempfehlungen [32] gegeben werden, die Ende 2021 publiziert werden.

Dank

Um dem großen Klärungsbedarf zu den Eintragspfaden von Kunststoffen in die Umwelt gerecht zu werden, ist vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) der Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt“ aufgesetzt worden [8]. Die Autoren danken dem BMBF für die Unterstützung des Forschungsprojekts REPLAWA [6] (Förderkennzeichen 02WPL1445A ff.) im Rahmen dieses Forschungsschwerpunkts.

Literatur

- [1] Umweltbundesamt und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.): *Wasserwirtschaft in Deutschland – Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen*, Dessau-Roßlau, 2017, Download: www.umweltbundesamt.de/publikationen, Kap. 3.8: Einträge von Kunststoffen in die Umwelt
- [2] LUBW, LfU, HLNUG, LANUV, LfU RLP (Hrsg.): *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, https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/6_sonderreihen/Länderbericht_Mikroplastik_in_Binnengewässern.pdf
- [3] Scheer, H., Fuhrmann, T.: Rückhalt von Mikroplastik in Kläranlagen. Vortrag und Beitrag in: *Tagungsband zum 37. Bochumer Workshop Siedlungswasserwirtschaft „Mikroplastik – Herausforderungen und Lösungen für die Siedlungswasserwirtschaft“*, Bochum, 5. September 2019, Schriftreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Bd. 79, S. 41–48
- [4] Bertling, J., Berting, R., Haman, L.: *Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik*, Kurzfassung der Konsortialstudie, Hrsg.: Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen, 2018
- [5] Venghaus, D., Schmerwitz, F., Reiber, J., Sommer, H., Lindow, F., Herper, D., Barjenbruch, M.: Reifenabrieb Hot Spots im urbanen Straßenraum – Möglichkeit zur Identifizierung und Bewertung, *GWF Wasser/Abwasser*, eingereicht
- [6] Broß, L., Badenberg, S. C., Krause S., Schaum, C.: Abfiltrierbare Stoffe als Begleitparameter – Ist die Vergleichbarkeit von Messergebnissen gegeben? *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2020, 67 (1), 28–36
- [7] REPLAWA: Reduktion des Eintrags von Plastik über das Abwasser in die aquatische Umwelt, Website des BMBF-geförderten Verbundprojekts, www.replawa.de
- [8] PlastikNet: Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt – Quellen · Senken · Lösungsansätze“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Website des übergreifenden Vernetzungsprojekts PlastikNet, www.bmbf-plastik.de
- [9] Lenz, R., Labrenz, M.: Small Microplastic Sampling in Water: Development of an Encapsulated Filtration Device, *Water* 2018, 10 (8), 1055
- [10] Funck, M., Yildirima, A., Nickela, C., Schramc, J., Schmidt, T. C., Türk, J.: Identification of microplastics in wastewater after cascade filtration using Pyrolysis-GC-MS, *MethodsX* 2020 (7), <http://dx.doi.org/10.1016/j.mex.2019.100778>
- [11] Braun, U., et al.: *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
- [12] PlasticsEurope (Association of plastic manufacturers), EPRO (European plastics Recycling and Recovery Organisations): *Plastics – the Facts 2019 – An analysis of European plastics production, demand and waste data*, 2019, <https://www.plasticseurope.org/de/resources/publications/1804-plastics-facts-2019>
- [13] Duemichen, E., Eisentraut, P., Celina, M., Braun, U.: Automated thermal extraction-desorption gas chromatography mass spectrometry: A multifunctional tool for comprehensive characterization of polymers and their degradation products, *Journal of Chromatography A* 2019, 1592, 133–142, <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.01.033>
- [14] Breitbarth, M., Urban, A. I.: Kunststoffe in kommunalen Kläranlagen – Eintrag und Verteilung in ausgewählten Kläranlagen, *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2018, 65 (9), 800–807
- [15] Spelthahn, V., Dolny, R., Giese, C., Giebel, K., Leuchthaler, S., Pinnekamp, J., Linnemann, V.: Mikroplastik aus Mischsystemen, Beitrag zur 52. Essener Tagung, 20.–22. März 2019, in: Reihe GWA – Gewässerschutz, Wasser & Abwasser, Bd. 250, Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen, 2019
- [16] Mintenig, S., Int-Veen, I., Löder, M., Gerds, G.: *Mikroplastik in ausgewählten Kläranlagen des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes (OOVV) in Niedersachsen – Probenanalyse mittels Mikro-FTIR Spektroskopie*, Abschlussbericht, 2014
- [17] Talvitie, J., Heinonen, M.: *Preliminary study on synthetic microfibers and particles at a municipal waste water treatment plant*, Hrsg.: HELCOM – Baltic Marine Environment Protection Commission, Helsinki, 2014
- [18] Klasmeier, J., Wissing, M.: *Waschmaschinenablauf als mögliche Eintragsquelle von Textilfasern (Mikroplastik) in Gewässer*, Abschlussbericht, Universität Osnabrück, 2017, https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/presse_und_offentlichkeitsarbeit/pressemitteilungen/neue-studie-kläranlagen-bremsen-mikrofasern-aus-154426.html

[19] Frehland, S., Schmiedgruber, M., Kägi R., Mitrano, D.: Fate and Transport of Particulate Plastics in a Pilot Scale Wastewater Treatment Plant (WWTP), Vortrag bei der Konferenz MICRO 2018, 19.–23. November 2018, Lanzarote

[20] Siegel, H., Thyen, E.: Pilotscreening nach Mikroplastik am Zentralklärrwerk Lübeck – Aufkommen und Verteilung von Mikroplastik in einer kommunalen Kläranlage, *KA Korrespondenz Abwasser Abfall* 2020, 67 (2), 105–111

[21] Meyer, S., Bauerfeld, K.: Mikroplastikverbleib in kommunalen Kläranlagen und im Klärschlamm, DWA Seminar „Mikroplastik im Abwasser – ein Problem?“, 1. Oktober 2020, Kassel

[22] Bauerfeld, K.: Klärschlamm als Senke für Mikroplastik jetzt und in Zukunft? Fachtagung der Kommission Bodenschutz beim UBA (KBU) zum Weltbodentag 2020: Kunststoffe in der Umwelt – Ein Problem für unsere Böden, oder nur falscher Alarm? 3. Dezember 2020, online

[23] Kranert, M.: Mikrokunststoffe in Produkten aus Bioabfall – Einträge in Böden, Fachtagung der Kommission Bodenschutz beim UBA (KBU) zum Weltbodentag 2020: Kunststoffe in der Umwelt – Ein Problem für unsere Böden, oder nur falscher Alarm? 3. Dezember 2020, online

[24] Dierkes, G., Lauschke, T., Becher, S., Schumacher, H., Földi, C., Terne, T.: Quantification of microplastics in environmental samples via pressurized liquid extraction and pyrolysis-gas chromatography, *Anal. Bioanal. Chem.* 2019, 411, 6959–6968, <https://doi.org/10.1007/s00216-019-02066-9>

[25] Büks, F., van Schaik, L., Kaupenjohann, M.: Mikroplastik aus Klärschlämmen hat das Potenzial, Bodenleben zu schädigen, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2020, 13 (9), 471–476

[26] Zhang, B., Yang, X., Chen, L., Chao, J., Teng, L., Wang Q.: Microplastics in soils: a review of possible sources, analytical methods and ecological impacts, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2020, 95, 2052–2068

[27] DESTATIS: *Umweltstatistische Erhebungen, Wasserwirtschaft: Klärschlamm Entsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2013–2016*, <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/Klaerschlammverwertungsart.html>, 15. Januar 2018

[28] Kläser & Langenohl GbR: Statement in: Zukunft der Klärschlamm Entsorgung in vielen Punkten offen, EU-Recycling 06/2020, S. 24, <https://eu-recycling.com/Archive/27750>

[29] Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung – AbfKlärV), Fassung vom 19. Juni 2020

[30] Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngerverordnung – DüV), Fassung vom 28. April 2020

[31] Dettmar, J., Brombach, H.: Im Spiegel der Statistik: Abwasserkanalisation und Regenwasserbehandlung in Deutschland, *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2019, 66 (59), 354–364

[32] REPLAWA: *Mikroplastik-Einträge über das Abwasser in die aquatische Umwelt – Handlungsempfehlungen zur Verringerung von Mikroplastik-Einträgen im Bereich der Abwasserentsorgung*, vorauss. Ende 2021 verfügbar, www.replawa.de

Autoren

Dr.-Ing. Tim Fuhrmann, Dr.-Ing. Ingo Urban,
Prof. Dr.-Ing. Holger Scheer
Emscher Wassertechnik GmbH
Brunnenstraße 37, 45128 Essen

E-Mail: fuhrmann@ewlw.de

Philipp Lau, M. Sc., Luisa Reinhold, M. Sc.,
Prof. Dr.-Ing. Matthias Barjenbruch
Technische Universität Berlin
Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt
Institut Bauingenieurwesen
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

Dr.-Ing. Katrin Bauerfeld, Stefanie Meyer, M. Sc.
Technische Universität Braunschweig
Institut für Siedlungswasserwirtschaft
Pockelsstraße 2a, 38106 Braunschweig



**Ihr Spezialist für
Schlammstapelsilo-
und Fördertechnik**



Kompaktstapelsilos
bis 150 cbm



Unterfahrstapelsilos
bis 350 cbm



Großraumstapelsilos
bis 700 cbm



Temporäre Übergangslösungen
komplett mit Entwässerungstechnik

HUNING
Anlagenbau GmbH & Co. KG
Wellingholzhausener Str. 6
49324 Melle

Tel.: +49 (0) 54 22–60 80
info@huning-anlagenbau.de
www.huning-anlagenbau.de

Qualität in Serie – individuelle Anlagentechnik aus bewährten Standardkomponenten.
Entwicklung, Fertigung, Montage, Inbetriebnahme und 24 Stunden-Service aus einer Hand.
Über 1.500 erfolgreich realisierte Logistiklösungen für Klärschlämme und Biomasse.