



Nachhaltige Entfernung von Mikroplastik aus Abwasser

Die „flüssigen Partikelsammler“ PE-X®

Katrin Schuhen¹ und Michael Sturm^{1,2}

¹ Wasser 3.0 / abcr GmbH,

² Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Engler-Bunte-Institut (EBI), Chair of Water Chemistry and Water Technology

Kläranlagen stellen eine Eintragsquelle von Mikroplastik in die Umwelt dar. Diese Anlagen liefern somit das Anforderungsprofil, um neue Technologien für das Management der Mikroplastik-Verschmutzung zu entwickeln und zu implementieren.

Mehrere Studien untersuchten die Fähigkeit konventioneller und innovativer Klärtechnologien Kunststoffe zu entfernen [1–3]. Diese Studien zeigen, dass konventionelle Klärbehandlungen einen hohen Prozentsatz des im Zulauf vorhandenen Mikroplastiks eliminieren (zwischen 90 und 98%), die meisten Mikroplastik-Partikel jedoch im Klärschlamm ankommen und über den landwirtschaftlichen Nutzpfad wieder ins Ökosystem gelangen [1,4]. Eine Methode zur nachhaltigen Entfernung aus dem Ökosystem bzw. eine schlüssige Sekundärstoffverwertungsmethodik fehlt bisher.

Es bleibt daher festzuhalten, dass Abwasser, insbesondere aufgrund des großen Abwasservolumens, das ständig abgeleitet wird, eine nicht wegdiskutierende Quelle von Mikroplastik in die aquatische Umwelt darstellen [2,3]. Auch das Problem der Akkumulation von Mikroplastik im Klärschlamm birgt ein hohes Risiko. Durch diesen Prozess und die z. B. anschließende landwirtschaftliche Nutzung des mit Mikroplastik kontaminierten Klärschlammes wird das Mikroplastik-Problem nicht eliminiert, sondern sorgt für seine weitreichende Verteilung im Ökosystem.

Für die Verringerung von Mikroschadstoffen im Abwasser stehen sowohl

	Werkstoffe	Dichte [g/cm ³]
Aufschwimmen	Schäume	> 0,005
	Naturkautschuk (NR)	0,92 – 1,0
	Polyethylen (PE)	0,92 – 0,96
	Polypropylen (PP)	0,9 – 1,0
Schweben	Polystyrol (PS)	1,05
	Polycarbonat (PC)	1,0 – 1,2
	Polyamid (PA)	1,0 – 1,2
	Polymethylmethacrylat (PMMA)	1,16 – 1,2
	Polyvinylchlorid (PVC)	1,2 – 1,4
	Polybutylenterephthalat (PBT)	1,3 – 1,32
	Polyoxymethylen (POM)	1,34 – 1,43
	Polytetrafluorethylen (PTFE)	> 1,8
Absinken		

Abb. 1: Verhalten unterschiedlicher synthetischer Polymere in Wasser [8]

quellenorientierte als auch nachsorgende Maßnahmen zur Verfügung, die jeweils ihre spezifischen Vor- und Nachteile haben. Allerdings sind die Maßnahmen unterschiedlich weit entwickelt und konkretisiert. Die Techniken für nachsorgende Maßnahmen der Abwasserreinigung im Rahmen einer 4. Reinigungsstufe (z.B. Einsatz von Aktivkohle, Membranfiltrationen oder Ozon) beinhalten weitreichende verfahrenstechnische und methodologische Limitationen (Desorption bei Aktivkohlen, schlechte Energieeffizienz bei Ozon, kaum reproduzierbare Ergebnisse für komplexe Abwassermatrizes). Die Situation im Bereich Mikroplastik ist darüber hinaus deutlich heterogener und vor allem im Bereich der 4. Reinigungsstufe kaum berücksichtigt [5]. Viele der Ansätze sind wenig entwickelt. Hinzukommt, dass fehlerhaft kommunizierte oder nicht reproduzierbare Entfernungsraten für Mikroplastik innerhalb der drei Reini-

gungsstufen im Klärprozess die Handlungsbereitschaft maßgeblich beeinflussen [6].

Was man bisher weiß ist, dass innerhalb von drei Reinigungsstufen im Abwasserreinigungprozess keine Mikroplastik-Abbaureaktionen oder Transformationen beobachtet werden konnte. Stattdessen finden sich vermehrt Mikroplastikpartikel im Klärschlamm und in der Nachklärung. Die diffuse Verteilung hat mit den unterschiedlichen Dichten der Polymere zu tun, die je nach Eigenschaften und chemischer Grundstruktur eher zum Aufschwimmen oder Absinken neigen [7].

Wie kommt das Mikroplastik in den Wasserkreislauf?

Bedenkt man, dass in Deutschland in der Regel Kunststoffmüll, welcher einer Sekundärquelle für Mikroplastik darstellt, über den Recyclingpfad entsorgt und weiterverarbeitet wird, stellt Starkregen eine wichtige Quelle für den

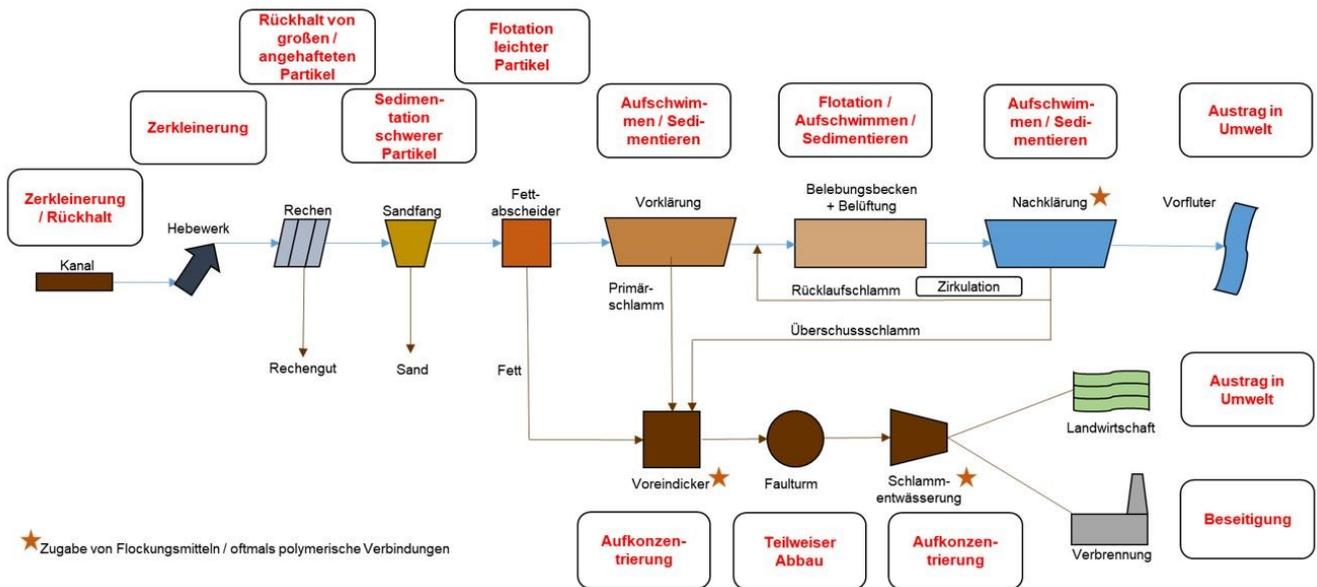


Abb. 2: Plastik und Mikroplastik in der Kläranlage [8]

Plastikeintrag in Oberflächengewässer dar. Hier wird von Zigarettenskippen bis Polystyrol von Baustellen, das bei der Hausdämmung verwendet wird, eine bunte Schar von Plastikpartikeln in die Kanalisation gespült.

Im Idealfall nehmen Speicherbecken die Regenmengen vollständig auf und führen sie der Kläranlage zu. Große Regenmengen führen jedoch dazu, dass die Regenrückhaltebecken das eingeleitete Wasser nicht mehr vollständig aufnehmen können. Bei Starkregen, der durchschnittlich in Deutschland an 50 Tagen anfällt, sind die Aufnahmekapazitäten irgendwann erschöpft. Das Wasser fließt an der Kläranlage vorbei und damit auch das darin enthaltene (Mikro-)Plastik.

Aber auch das Wasser, das in die Kläranlagen gelangt, stellt die Betreiber zunehmend vor Herausforderungen. Immer öfter findet sich im Niederschlagswasser sowie im Abwasser und im Klärschlamm eine wachsende Menge an Mikroplastik, beispielsweise durch Fasern in Synthetikkleidung wie Fleecejacken. Aber auch Kontaktlinsen aus Kunststoffen werden immer wichtiger. Amerikanische Forscher haben festgestellt, dass bis zu 15 Prozent der in den USA pro Jahr verkauften 45 Mio. Kontaktlinsen über das Abwasser entsorgt werden [9].

Innerhalb des Kläranlagenprozesses können Mikroplastikpartikel und Plastikpartikel größer 5 mm an verschiedenen Stellen zurückgehalten werden. Dies zeigt das spezifische Verhalten innerhalb des Klärprozesses in Abhängigkeit von Teilchengröße und Dichte (Abbildung 2) [8,10]. Nach wie vor ist es jedoch so, dass viele Partikel ungefiltert die Kläranlage wieder verlassen und somit wieder in die Umwelt gelangen.

Betrachtet man zusätzlich den Stand der Untersuchungen hinsichtlich der Bilanzierung von Makro- und Mikroplastik innerhalb des Klärprozesses, so ergeben sich Wissenslücken, die nur durch umfangreiche Forschung vorangetrieben werden kann, allen voran steht die Erarbeitung einer validen, analytischen Methode, die die Mikroplastikpartikel in unterschiedlichen Umweltkompartimenten mit reproduzierbaren Daten hinterlegt.

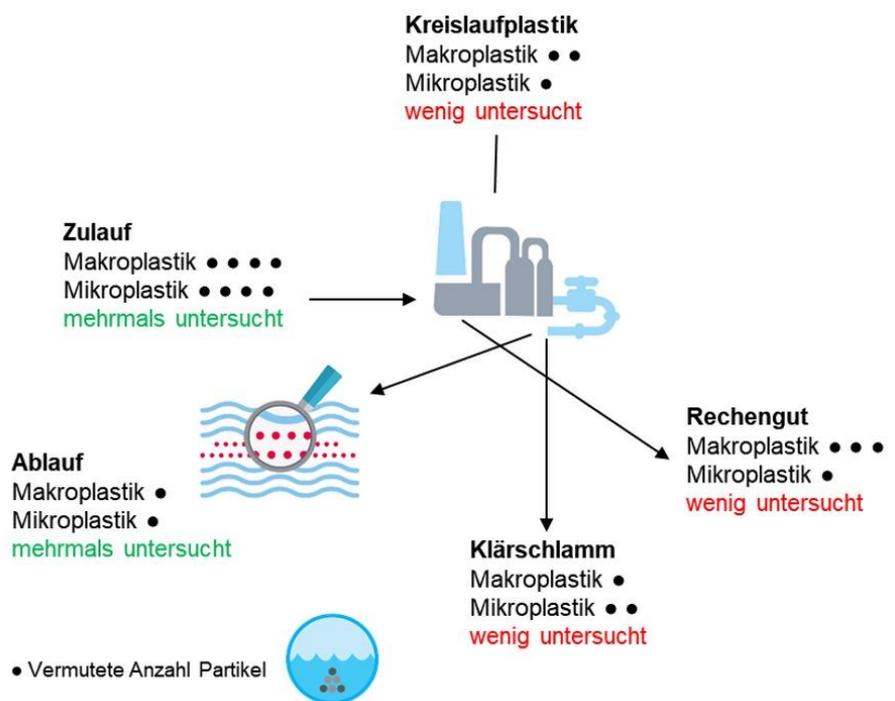


Abb. 3: Stand der Untersuchungen zur Bilanzierung von Makro- und Mikroplastik in Kläranlagen – Anpassung von [8]

Mikroplastikelimination – ja, nur welches Verfahren ist zielführend?

Technologien zur Elimination von Mikroplastik sind bisher nicht politisch verpflichtend. Somit sind auch Handlungs- und Anwendungsspielräume nicht klar definiert. Bei den anfallenden Reinigungsproblemen können innovative End-of-Pipe-Technologien helfen, die dem eigentlichen Prozess der Abwasserreinigung nachgeschaltet sind [11,12]. Viele der Mikroverunreinigungen ließen sich mit einer weiteren Verfahrensstufe, der sogenannten 4. Reinigungsstufe, herausfiltern.

Die am häufigsten verwendeten fortschrittlichen Abwassertechnologien zur Elimination von Mikroplastik sind laut Literatur mittels Membranen, galvanischer Abscheidung und Koagulation möglich. Nimmt man die Meinung einzelner Wissenschaftler aus dem Wassersektor, so ist der Membranbioreaktor (MBR), die Kombination eines Membranverfahrens wie Mikrofiltration oder Ultrafiltration mit einer biologischen Abwasserbehandlung, eines der vielversprechendsten Verfahren zur Elimination von Mikroplastik. Diese Technik zeigte laut einigen Studien eine bessere Entfernungseffizienz von Mikroplastik (99,4%) im Vergleich zu dem herkömmlichen Verfahren auf Basis von Belebtschlamm (98,3%) bezogen auf die Verfahrensstufe, nicht auf den gesamten Klärprozess [3,13].

Das MBR-System bietet, so zeigen die Studienergebnisse, die höchste Abscheiderate (99,4%) und entfernt 0,5 Mikroplastikpartikel pro Liter (MPs L⁻¹). MBRs wurden auch mit anderen innovativen Tertiärbehandlungen verglichen, wie z.B. Sandfiltern mit schneller Schwerkraft und Flotation mit gelöster Luft, die Abscheidungsraten von Mikroplastik > 95% (bezogen auf den Verfahrensschritt) aus primären und sekundären Abwässern liefern.

Der Einsatz von biologisch aktiven Filtern (BAF) (Filter, die das Wachstum von kontaminationsabbauenden Mikroorganismen ermöglichen) zeigten ebenfalls eine hohe Effizienz bei der Entfernung von Mikroplastik [3]. Die Entfernung von



Abb. 4: Entwicklungsstufen des Verfahrens Wasser 3.0 PE-X® „aus klein mach groß“:

Mikroschadstoffen aus Abwasser während verschiedener Behandlungsschritte mechanischer, chemischer und biologischer Behandlungen (Belebtschlamm) gefolgt von BAF in einer großen (umgerechnet 800.000 Einwohner) fortgeschrittenen Kläranlage wies eine Gesamtrückhaltekapazität von über 99% auf [2]. Darüber hinaus wurde die Wirksamkeit der Elektrokoagulation (EC) – ein bekanntes und etabliertes Verfahren zur Entfernung von Mikroplastik aus Abwasserströmen – auch mit künstlichem Abwasser mit PE-Mikrokügelchen in verschiedenen Konzentrationen untersucht. Unter verschiedenen Bedingungen (anfänglicher pH-Wert, NaCl-Konzentration und Stromdichte) wurden Wirkungsgrade bei der Entfernung von Mikrokügelchen von > 90% beobachtet, was darauf hindeutet, dass EC ein wirksames Verfahren zur Entfernung von Mikroplastik aus Abwasserströmen ist. Die optimale Entfernungseffizienz von 99,24% wurde bei einem pH-Wert von 7,5 gefunden. Diese Technik wurde in einem Rührkessel-Chargenreaktor im Labormaßstab (1 l) getestet. Denkbar wäre, dass das Verfahren unter Verwendung einer industriellen EC-Zelle mit einer zweistufigen kontinuierlichen EC-Reaktor-/Absetzanlage im großen Maßstab in der Realität funktionieren, ob jedoch der Gesamtprozess wirtschaftlich ist, ist aus den vorhandenen Daten nicht nachvollziehbar. [14].

Wo ist der Haken?

Für alle bisher vorgestellten Behandlungsmöglichkeiten von Abwasser sind erhebliche bauliche Maßnahmen, Anschaffungs- Wartungs- und Betriebskosten notwendig. Auch der Energiebedarf, der für den Betrieb von Anlagen notwendig ist, ist nicht zu vernachlässigen.

Alle Lösungen beruhen auf dem Versuch, Partikel in ihrer Originalgröße und ihrem Originalhabitus zu entfernen. Kein Verfahren wurden bisher hinsichtlich der Entfernungseffizienz gegenüber variablen Polymerendichten analysiert, kein Verfahren wurde mittels eines normierten analytischen Auswertungsverfahrens zur Bestimmung der Entfernungseffizienzen von Mikroplastik betrieben.

Weiterhin wurden Anschaffungs-, Betriebs- und Wartungskosten nicht gegenübergestellt. Es bleibt demnach offen, ob diese bereits viel diskutierten Verfahren wirkliche Lösungen sind – oder nur Teilbereiche abdecken und somit keine ganzheitliche Lösung darstellen.

Ein neuer Ansatz namens Wasser 3.0 PE-X®: Was können die flüssigen Partikelsammler?

Zu den neueren Verfahren im Bereich der Abwassertechnologien zählt die durch Wasser induzierte Agglomeration und anschließende Entfernung von Partikeln aus Wasser (Verfahrensname: Wasser

3.0 PE-X®) [15–18]. Der zweistufige Prozess umfasst einerseits eine Lokalisierung (Zusammenlagerung) und andererseits eine Aggregation mit chemischer Fixierung von Mikroplastik-Partikeln im Mikrometerbereich über einen physikochemischen Prozess. Dieses Verfahren ist im Bereich Abwässer als auch in anderen Wassersystemen anwendbar und kann neben Mikroplastik auch für die Entfernung anderer Mikroschadstoffe eingesetzt werden. Hierzu kann der Prozess je nach enthaltenen Stoffen und chemischer Zusammensetzung des Wassers speziell auf die gegebenen Umstände abgestimmt werden. Im Fokus stehen neben Mikroplastik derzeit vor allem organische Spurenstoffe wie pharmazeutische Rückstände, polyfluorierte Verbindungen und Organophosphate.

Das Verfahren Wasser 3.0 PE-X® erweist sich nach jetzigem Stand der Arbeiten als übertragbar und liefert skalierbare und reproduzierbare Ergebnisse vom Labormaßstab bis in den industriellen Maßstab. Auch im Salzwassermilieu konnten die ersten Technikumsversuche erfolgreich absolviert werden. 2019 wurde die erste kontinuierlich betriebene adaptive Versuchsanlage für Wasser 3.0 PE-X® in Kläranlagen-Umgebung getestet (Abbildung 4).

Aus dem Laborversuch wurden die Versuche bereits 2017 und 2018 in den Technikumsreaktor der EW Landau transferiert. Die Ergebnisse konnte reproduziert werden. Der gesamte Reinigungsprozess wird in Containern verbaut. Dies ermöglicht neben hoher Variabilität in Ort und Zeit auch hohe Adaptionsfähigkeit und Modularität im gesamten Prozessablauf. Für die Containerlösungen werden in Pilotversuchen der beste Ort für die Durchführung der Wasser-/Abwasserreinigung ermittelt, durch das materialwissenschaftliche Baukastenprinzip passgenaue Lösungen erarbeitet. Der Gesamtprozess wird von Zulauf bis Ablauf analytisch aufgezeichnet und dokumentiert.

Durch diese Herangehensweise und die Bestätigung der Versuche im realen Kläranlagenumfeld im kontinuierlichen



Abb. 5: Container Lösung für das Verfahren Wasser 3.0 PE-X® im Kläranlagenumfeld

Betrieb, ist es nun möglich Prozesswässer aller Arten und Belastungen in Pilotierungen zu untersuchen und die Reinigungsleistungen zu ermitteln. Dies kann sowohl im Umfeld des Anlagenbetreibers stattfinden als auch an jedem anderen Ort. Ergebnisse aus den Versuchen werden innerhalb kurzer Durchlauf-Adaptions- Bearbeitungs- und Auswertungsperioden erhalten. Die Verfügbarkeit und Handlungsschnelligkeit wird durch die Containerbauweise deutlich erhöht. Gleichzeitig wird durch den Belastungs-basierten Lösungsansatz der Weg für adaptive Anlagen fern ab von Standardlösungen geöffnet.

Danksagung

Die Forschungsprojekte von Wasser 3.0 (www.wasserdreinnull.de) werden durch die finanzielle Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie durch die Bereitstellung von ZIM-Fördermitteln (Zentrales Innovationsprogramm für KMU) durchgeführt. Die Autoren danken Dennis Schober, Nils Poppelreiter und Benedikt Ney für ihre Diskussionsfreudigkeit. Michael Sturm dankt an dieser Stelle zusätzlich der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für den Erhalt eines Promotionsstipendiums.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Lares, M.C. Ncibi, M. Sillanpää, M. Sillanpää, *Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology*, *Water Research* 133 (2018) 236–246.
- [2] J. Talvitie, A. Mikola, O. Setälä, M. Heinonen, A. Koistinen, *How well is microlitter purified from wastewater? - A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant*, *Water Research* 109 (2017) 164–172.
- [3] J. Talvitie, A. Mikola, A. Koistinen, O. Setälä, *Solutions to microplastic pollution - Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies*, *Water Research* 123 (2017) 401–407.
- [4] M.R. Michielssen, E.R. Michielssen, J. Ni, M.B. Duhaime, *Fate of microplastics and other small anthropogenic litter (SAL) in wastewater treatment plants depends on unit processes employed*, *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 2 (2016) 1064–1073.
- [5] M. Rudloff, A. Herbort, P. Bimmler, C. Hiller, N. Poppelreiter, K. Schuhen, *Quo vadis Spurenstoffelimination mittels Aktivkohlen Laborpraxis Teil 1-3., 2018*, accessed 3 June 2019.
- [6] EUWID, Eawag: *Nanoplastik bleibt zu 98 Prozent im Klärschlamm*, 2019.

- [7] S.A. Carr, J. Liu, A.G. Tesoro, *Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants*, *Water Research* 91 (2016) 174–182.
- [8] R. Bertling, *Mikroplastik/Plastik in der Umwelt - Übersichtsvortrag*, 2018.
- [9] ACS Newsroom, *The environmental cost of contact lenses*, 2019.
- [10] A.F. Herbort, M.T. Sturm, C. Hiller, K. Schuhen, *Ökologische Chemie von Mikroplastik – Ab wann werden Alltagshelfer zum Umweltproblem? Nachhaltiger Gewässerschutz durch die Implementierung einer Partikelelimination in der Kläranlage*, *GWF Abwasser/Wasser* (2017) 1–9.
- [11] E. Günther, *End-of-the-Pipe-Technologien - Ausführliche Definition*, 2018.
- [12] A.F. Herbort, M.T. Sturm, S. Fiedler, G. Abkai, K. Schuhen, *Alkoxy-silyl Induced Agglomeration: A New Approach for the Sustainable Removal of Microplastic from Aquatic Systems*, *J Polym Environ* 62 (2018) 1–13.
- [13] D. Eerkes-Medrano, H.A. Leslie, B. Quinn, *Microplastics in drinking water: A review and assessment*, *Current Opinion in Environmental Science & Health* 7 (2019) 69–75.
- [14] W. Perren, A. Wojtasik, Q. Cai, *Removal of Microbeads from Wastewater Using Electrocoagulation*, *ACS Omega* 3 (2018) 3357–3364.
- [15] M.T. Sturm, C. Hiller, K. Schuhen, *Ursprung und Auswirkungen synthetischer Polymere in der Umwelt: Teil 1: Plastik und Mikroplastik in der Umwelt*, *GIT Labor-Fachzeitschrift* (2019) 32-35.
- [16] K. Schuhen, M.T. Sturm, A.F. Herbort, *Technological Approaches for the Reduction of Microplastic Pollution in Seawater Desalination Plants and for Sea Salt Extraction*, in: A. Gomiero (Ed.), *Plastics in the Environment*, IntechOpen, 2019.
- [17] M. Sturm, M. Rudloff, P. Bimmler, A. Herbort, B. Ney, N. Poppelreiter, K. Schuhen, *Neue Ansätze zur Reduktion anthropogener Stressoren aus dem aquatischen Umfeld*, *WWT* (2018).
- [18] A.F. Herbort, M.T. Sturm, K. Schuhen, *A new approach for the agglomeration and subsequent removal of polyethylene, polypropylene, and mixtures of both from freshwater systems - a case study*, *Environmental science and pollution research international* (2018) 15226–15234.