

Kunststoffemissionen im Wasserkreislauf

Ilka Gehrke, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT,
Osterfelder Straße 3, 46047 Oberhausen

Ralf Bertling, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT,
Osterfelder Straße 3, 46047 Oberhausen

1 Zusammenfassung

»Mikroplastik« bezeichnet Partikel und Fasern aus Kunststoffen, die durch menschliches Handeln in die Umwelt gelangen. Die Transferraten in die Meere lassen sich äußerst schwer abschätzen. Der Anteil des Abwassers, das der Siedlungswasserwirtschaft zugeführt, aber nicht in Kläranlagen behandelt wird, beträgt ca. 20 Prozent. Mit mehr als 50 Prozent sind die Emissionen von Reifen die größte Quelle für Mikroplastik. Im BMVI-Projekt TyreWearMapping werden Hotspot-Karten für Reifenabrieb entwickelt. Bisher lässt sich das Ausmaß der Wirkung von Mikroplastik auf Organismen, Menschen und Ökosysteme noch nicht abschätzen, aber allein die hohe Persistenz der Kunststoffe rechtfertigt vorbeugende Maßnahmen. Denn letztendlich sind Kunststoffeinträge in der Umwelt nur selten rückholbar und müssen als generationenübergreifendes Problem verstanden und gelöst werden.

2 Einleitung

Vor fast 70 Jahren läutete die ZEIT »Das Zeitalter der Kunststoffe« ein [1]. Seitdem ist die globale Kunststoffproduktion Jahr für Jahr gewachsen. 2018 wurden weltweit 359 Mio. Tonnen Kunststoff produziert, davon 17 % in Europa¹[2]. Obwohl Europa¹ 75,1 Prozent des eigenen post-consumer Kunststoffabfalls thermisch oder stofflich recycelt, wird noch ein großer Anteil auf Mülldeponien abgelagert oder in die Umwelt eingetragen.

Größere Kunststoffabfälle, wie z. B. Plastiktüten, gelangen durch Verwehungen, Littering oder landseitig durch Verschleppungen aus offenen Mülldeponien in den Wasserkreislauf. Dieses »Makroplastik« kann je nach Kunststoff mehrere Jahrhunderte in der Umwelt bestehen und in sogenanntes »Mikroplastik« fragmentieren. Die wesentlichen Quellen für Mikroplastik sind jedoch andere: Mit mehr als 50 Prozent macht Reifenabrieb den größten Anteil aus, aber auch Farben und Lacke, die Abfallentsorgung und Abrieb von Polymerfasern beim Waschen gehören zu den wichtigsten 10 Quellen. Gewichtsmäßig sind schätzungsweise zwei Drittel der Kunststoffemissionen in Deutschland Mikroplastik und nur ein Drittel Makroplastik. [3]

¹ Europa plus Norwegen und Schweiz

Der Begriff »Mikroplastik« wurde erstmalig 2008 auf Basis physikalischer Eigenschaften (Form, Größe, Material) und formaler oder pragmatischer Erwägungen (Abgrenzung zu Nanopartikeln, Inkludierung von Kunststoffrohmaterial, verfügbare Messtechnik etc.) definiert [4]. Die Autoren des vorliegenden Artikels ziehen eine eher problemorientierte, erweiterte Definition vor.

»Mikroplastik« bezeichnet für sie Partikel und Fasern, »Makroplastik« größere Objekte aus thermoplastischen, elastomeren oder duroplastischen Kunststoffen, die unter Standardbedingungen fest sind und direkt oder indirekt durch menschliches Handeln in die Umwelt gelangen. Diese Definition verzichtet auf eine exakte Festlegung und Unterteilung des Größenbereichs im Gegensatz zur üblicherweise in Studien verwendeten »kleiner 5 mm-Definition«.

Primäres Mikroplastik Typ A, wie z. B. Reibkörper in Kosmetik, polymere Strahlmittel, Lasersinterpulver für den 3D-Druck oder Kunststoffpellets, wird gezielt (»intendiert«) hergestellt (Abb. 1). Die Freisetzung von primärem Mikroplastik Typ A kann bewusst in Kauf genommen oder durch einen Unfall verursacht sein. *Primäres Mikroplastik Typ B* entsteht erst in der Nutzungsphase. Beispiele hierfür sind der Abrieb von Reifen, beim Waschen freigesetzte synthetische Fasern oder die Verwitterung von Farben. *Sekundäres Mikroplastik* ist das Ergebnis der Verwitterung und Fragmentierung von größeren Kunststoffteilen (Makroplastik) in der Umwelt.

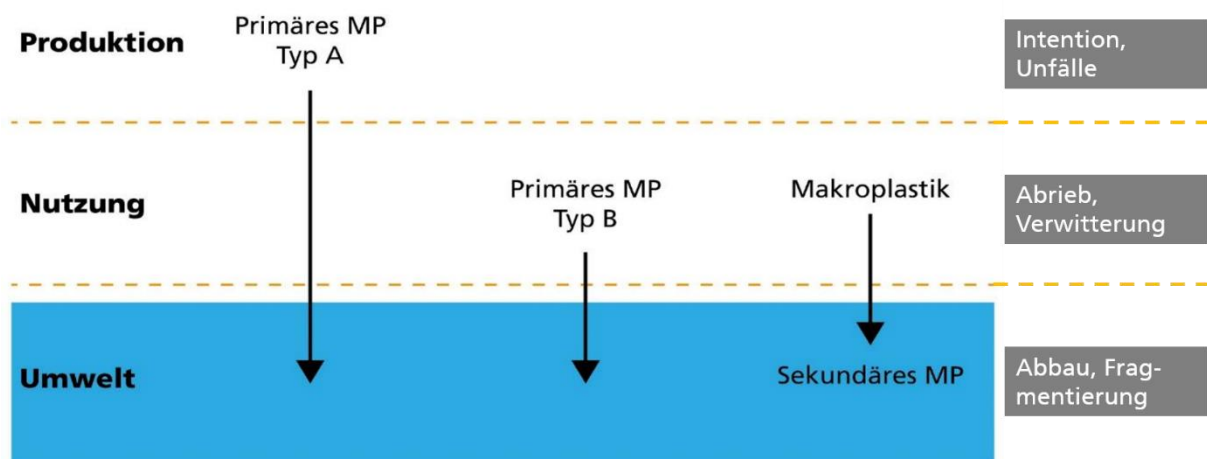


Abbildung 1: Einteilung von Kunststoffemissionen in primäres Mikroplastik vom Typ A und Typ B sowie Makroplastik, das im Laufe der Zeit zu sekundärem Mikroplastik wird [1]. (© Fraunhofer UMSICHT)

3 Kunststoffemissionen im natürlichen und anthropogenem Wasserkreislauf

3.1 Eintragspfade in den Wasserkreislauf

Die Transferraten in die Meere sind nur äußerst schwer abzuschätzen, da die Modellierung und empirische Bestätigung des Übergangs von Kunststoffemissionen in verschiedene aquatische Umweltkompartimente noch ganz am Anfang steht. Je nach Autor variieren sie von 2 bis 47 Prozent (Abb. 2).

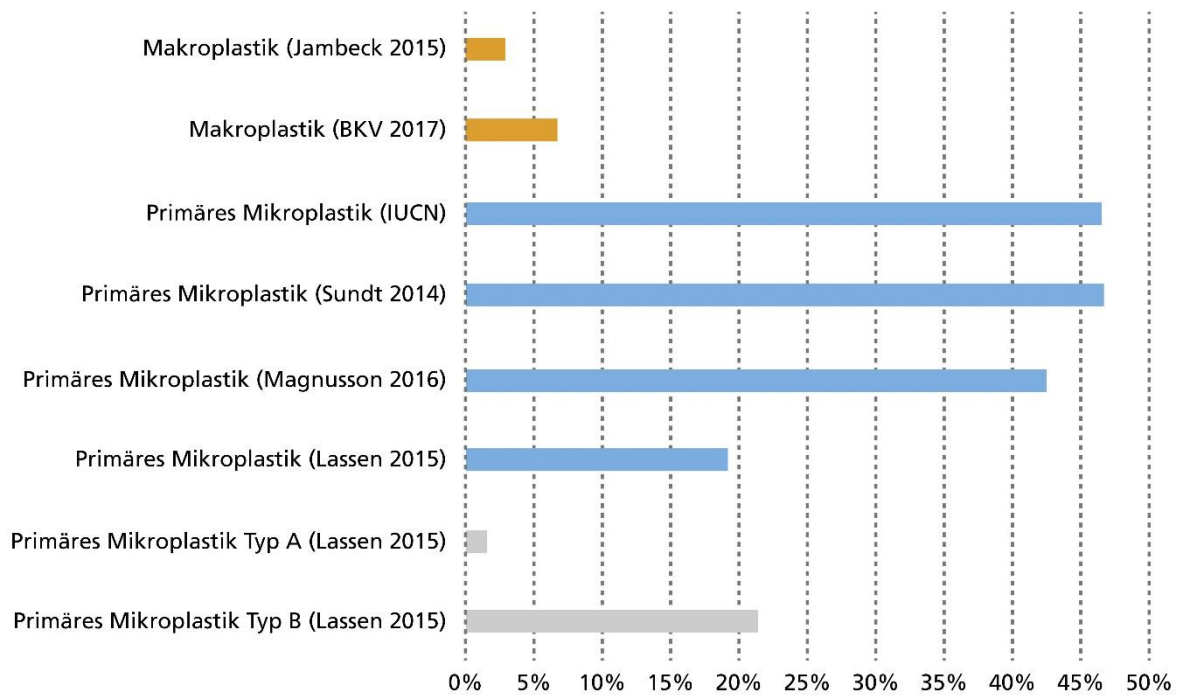


Abbildung 2: Transferraten in das Meer [3]

Grundsätzlich lassen sich *punktueller* und *diffuser* Eintragspfade in die Gewässer unterscheiden (Tab. 1):

Tabelle 1: Eintrag von Kunststoffemissionen in den Wasserkreislauf (adaptiert nach [6])

Art des Eintrags	Stoffquelle	Eintragspfad
punktuell	Industrie (direkt)	Industrielle Direkteinträge
punktuell-diffus	Kommunale Kläranlagen	Kläranlagenabläufe Mischwasserabschläge
diffus	Landwirtschaft (Dünger, landwirtschaftliche Folien)	Hofabläufe und Abdrift, Dränagen, atmosphärische Deposition
diffus	Verkehr und Baumaterialien	Regenwasserkanäle (Trennsystem), unbehandeltes Schmutzwasser
diffus	nicht angeschlossene Haushalte	unbehandeltes Schmutzwasser
diffus	Schifffahrt	Direkteinträge von Schiffen

Insbesondere für die diffusen Einträge liegen heute wenig belastbare Daten vor. In Abschnitt 5 wird die Problematik diffus verteilter Emissionen am Beispiel von Reifenabrieb verdeutlicht.

3.2 Effekte von Kunststoffemissionen in der aquatischen Umwelt

Kunststoffe in der aquatischen Umwelt können eine Vielzahl von negativen Effekten haben:

- Negative Wirkungen auf Organismen durch Strangulation/Verstrickung
- Wirkungen auf Organismen nach Aufnahme und Ausscheidung (Akkumulation, Translokation, Transfer in der Nahrungskette)
- Verschleppung von Arten (Drifting)
- Physikalische Auswirkungen auf ein Ökosystem
- Chemische Gefahren durch Freisetzung von Additiven, Monomeren und kritischen Metaboliten

Allerdings lässt sich das Ausmaß der Wirkung auf Organismen, Menschen und Ökosysteme bisher noch nicht abschätzen. Heutige Ökotox-Testverfahren bilden diese Gefahren nicht ab. Jedoch sind vorbeugende Maßnahmen aufgrund der hohen Persistenz von Kunststoffen in der Umwelt von der ECHA [7] gewünscht.

4 Kunststoffemissionen in der Siedlungswasserwirtschaft

Mikro- und Makroplastik werden mit dem Schmutz- und dem Niederschlagswasser der Siedlungswasserwirtschaft zugeführt. Im Mischsystem gelangen beide Abwasserarten gemeinsam zur Kläranlage; im Trennsystem nur das Schmutzwasser, während das Niederschlagswasser direkt den Gewässern zugeleitet wird. Bei sehr hohen Niederschlagsmengen kann auch in Mischsystemen die Kapazität von Kanälen,

Entlastungsbauwerken und Kläranlagen überschritten werden, so dass das Abwasser unbehandelt in den Vorfluter abgeschlagen wird.

Aus exemplarischen Daten für Berlin, statistischen Daten zur deutschen Abwasserentsorgung und Erfahrungswerten von Experten der Siedlungswasserwirtschaft schätzen die Autoren dieses Beitrags den Anteil des Abwassers, das der Siedlungswasserwirtschaft zugeführt, aber nicht in Kläranlagen behandelt wird, auf 21,5 Prozent [3]. Dies bedeutet aber nicht, dass dieser Anteil völlig ungereinigt in die Gewässer gelangt. Im Trenn- wie im Mischsystem gibt es auch außerhalb der eigentlichen Kläranlagen zahlreiche Senken für Mikro- und Makroplastik, wie z. B. die Sinkkästen (Gullis) an Verkehrsflächen, Versickerungsanlagen, Regenrückhalte- und Regenüberlaufbecken, Retentionsbodenfilter oder Regenklärwerke. Vergleichende Untersuchungen – inner- und außer Orts – zur Belastung von Niederschlagswasser und Schmutzwasser mit Kunststoffen liegen bislang nicht vor. In einer ersten empirischen Studie zeigen Liu et al. [8], dass Anzahl und Masse von Mikroplastik-Partikeln bei hohen hydraulischen Lasten (Verhältnis undurchlässiger Fläche des Einzugsgebiets zur Beckenoberfläche) in Retentionsbecken annähernd linear steigen.

Gelangen Kunststoffemissionen in die Kläranlage, verteilen sie sich auf vier ausgehende Stoffströme: Rechengut (1), Sandfanggut (2), Klärschlamm (3) und gereinigter Kläranlagenablauf (4). Aus Daten zum Anfall und zur Zusammensetzung des Rechenguts lässt sich die aus dem Abwasserstrom entfernte Makroplastikmenge auf ca. 3.000 Tonnen jährlich abschätzen [3]. Im nachgeschalteten Sandfang (oft als Kombination Sand- und Fettfang ausgeführt) dürften vor allem schwere Kunststoffpartikel (Elastomere aus Reifenabrieb, Duroplaste aus Farben und Lacken) durch Sedimentation abgeschieden werden. Ihr mengenmäßiger Anteil ist nicht bekannt. Leichte Kunststoffpartikel (Dichte < 1,0 kg/l) schwimmen tendenziell im Fettfang auf und werden so gemeinsam mit dem Fett in den Faulturm gepumpt, so dass sie letztendlich im Klärschlamm akkumulieren. Rechengut und Sandfanggut werden teilweise thermisch behandelt, weitere Anteile werden einer mechanisch-biologischen Behandlung, Deponierung oder Verwertung zugeführt.

Verschiedene wissenschaftliche Studien [z. B. 9-13] messen eine Abscheideeffizienz von Mikroplastik in den jeweils untersuchten kommunalen Kläranlagen von 98 bis 99 Prozent. Allerdings zeigen sie auch, dass trotz des sehr guten Rückhalts aufgrund der hohen Abwasservolumenströme die täglichen Frachten von Mikroplastik-Partikeln in den Vorfluter signifikant hoch sind. Lares et al. [11] messen z. B. $1,0 \times 10^7$ Mikroplastik Partikel größer 250 μm pro Tag im Ablauf einer finnischen zweistufigen kommunalen Kläranlage mit einem Eingangsvolumenstrom von 10 bis 11.000 m^3/d .

Obwohl Kläranlagen vor allem Mikrofasern, die überwiegend von Waschmaschinen und Textilfabriken in das Abwasser eingetragen werden, deutlich schlechter abscheiden, existiert bis heute kein technisches Verfahren, um die Emission von abgeriebenen Mikrofasern in die Umwelt zu verhindern. Fraunhofer UMSICHT entwickelt aus diesem Grund in dem Forschungsvorhaben fibrEX [14] einen mechanisch wirksamen Filter zur Entfernung von Mikrofasern aus Waschautomaten und anderen textilen Abwässern.

Um das Sedimentationsverhalten der Schlämme in Kläranlagen zu verbessern, kommen wasserlösliche Flockungshilfsmittel zum Einsatz. Flockungshilfsmittel sind oft natürliche, weitaus häufiger aber synthetische Polymere (Polyelektrolyte). Polyelektrolyte werden gegenwärtig von den meisten Autoren nicht dem Mikroplastik zugerechnet. Unter dem Oberbegriff »Anthropogene Polymere« sind sie aber durchaus umweltrelevant.

Die hohen Abscheideraten der Kläranlagen sorgen dafür, dass sich ein Großteil des Mikro- und Makroplastiks im Klärschlamm wiederfindet. Exakte Quantifizierungen von Kunststoffgehalten außerhalb der wässrigen Phase sind aufgrund der Konsistenz von Schlämmen, Rechen- und Sandfanggut schwierig. Magnusson and Noren [15] untersuchten den Klärschlamm einer schwedischen kommunalen Kläranlage und stellten fest, dass sich 99 Prozent des entfernten Mikroplastiks im Klärschlamm akkumuliert hat. Vollertsen et al. 2017 [16] bestätigen in ihrer Beprobung von 10 dänischen kommunalen Kläranlagen das Ergebnis und erhalten ebenfalls eine Anreicherung von 99 Prozent der eingetragenen Mikroplastikpartikeln im Schlamm. In einer ersten Vorstudie von Fraunhofer UMSICHT auf einer kommunalen dreistufigen Kläranlage der Größenklasse 5 wurden 1.000 bis 2.000 Mikroplastikpartikel pro Liter im nicht-entwässertem Klärschlamm (Vergärung mit Co-Fermentation) gefunden. Das sind Orientierungswerte aus zwei Probenahmetagen (jeweils ein Liter Probe und drei Replikate zu 100 mL), die in weiterführenden Forschungsarbeiten systematisch über einen längeren Zeitraum überprüft werden müssen. Es ist zu vermuten, dass auch aufgrund der Zugabe von kunststoffhaltigen Co-Fermenten - zerkleinerten Speise- und Lebensmittelresten, die zur Erhöhung der Gasproduktion direkt in den Faulturm gepumpt werden – diese Werte vergleichsweise hoch sind.

In Deutschland werden noch 24 Prozent der gesamten anfallenden Klärschlammmenge aus kommunalen Kläranlagen in der Landwirtschaft ausgebracht. Neben der landwirtschaftlichen Nutzung ist die Verwendung von Klärschlamm im Landschaftsbau mit ca. 10 Prozent [17] eine zweite stoffliche Verwertungsoption. Zu rund zwei Dritteln wird Klärschlamm thermisch entsorgt. Bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft oder als Material im Landschaftsbau können im Klärschlamm enthaltene Kunststoffe durch Niederschläge ausgewaschen werden und sich durch Windereignisse weiter in der Umwelt verbreiten. Vor der Verbrennung wird der Klärschlamm auf den Kläranlagen üblicherweise mechanisch entwässert. Das entfernte Wasser wird erneut dem Zulauf der Kläranlage zugeführt. Über diesen Weg

gelangt ein Teil der Kunststoffe aus dem Klärschlamm erneut in den Reinigungsprozess und zerkleinert sich durch den kontinuierlichen Kreislauf möglicherweise immer weiter.

Die Mechanismen der mechanischen Fragmentierung und biologischen Degradation von Kunststoffen innerhalb einer Kläranlage sind bisher nicht geklärt. Im Rahmen des kooperativen Forschungsprojekts iMulch [18], das sich mit Kunststoffemissionen in die Umwelt, verursacht durch Mulchfolien, beschäftigt, will Fraunhofer UMSICHT mittels gezielter Parameterstudien an einer Laborkläranlage helfen, diese Wissenslücke zu schließen.

5 Fallbeispiel: Reifenemissionen in der Umwelt

Mehr als ein Kilogramm zinkhaltigen Reifenabrieb produziert jede/r Deutsche durchschnittlich im Jahr [3]. Die EU-Kommission prüft bereits strategische Optionen, um die Freisetzung von Reifenabrieb zu minimieren [19]. Eine Expertengruppe der EU betont die Bedeutung von Reifenemissionen als größten Eintragspfad für Mikroplastik und empfiehlt konkrete Maßnahmen wie Rückhaltesysteme für Reifenabrieb in der Straßenentwässerung [20].

Der Reifenabrieb pro Fahrzeug beträgt 53 bis 200 mg/km (PKW) und 1500 mg/km (Sattelzug); das entspricht einem Masseverlust über die Lebensdauer von 7,6 bis 28 Prozent [21].

Da Reifenemissionen diffus in die Umwelt eingetragen werden, erfordern Reduktionsmaßnahmen, wie die von der EU vorgeschlagenen Rückhaltesysteme, einen hohen Planungsaufwand und eine gesicherte Datenlage, *Wo?* und *Wieviel?* Reifenabrieb anfällt und *Wo?* sich Hotspots mit akutem Handlungsbedarf befinden. Fraunhofer UMSICHT modelliert in dem BMVI-Verbundprojekt TyreWearMapping [22] die lokale Verteilung von Reifenabrieb mittels einer Verteilungsfunktion und eines probabilistischen Modells. Dieses Modell wird in ein geographisches Modell integriert, so dass als Ergebnis *Reifenemissionskarten* für Deutschland vorliegen. In Abbildung 3 sind die mittleren Reifenemissionen vom Saarland in einem Ausschnitt für Homburg dargestellt. An stark befahrenen Autobahnkreuzen werden maximale Emissionen von größer 500 g/(m*a) gemessen.

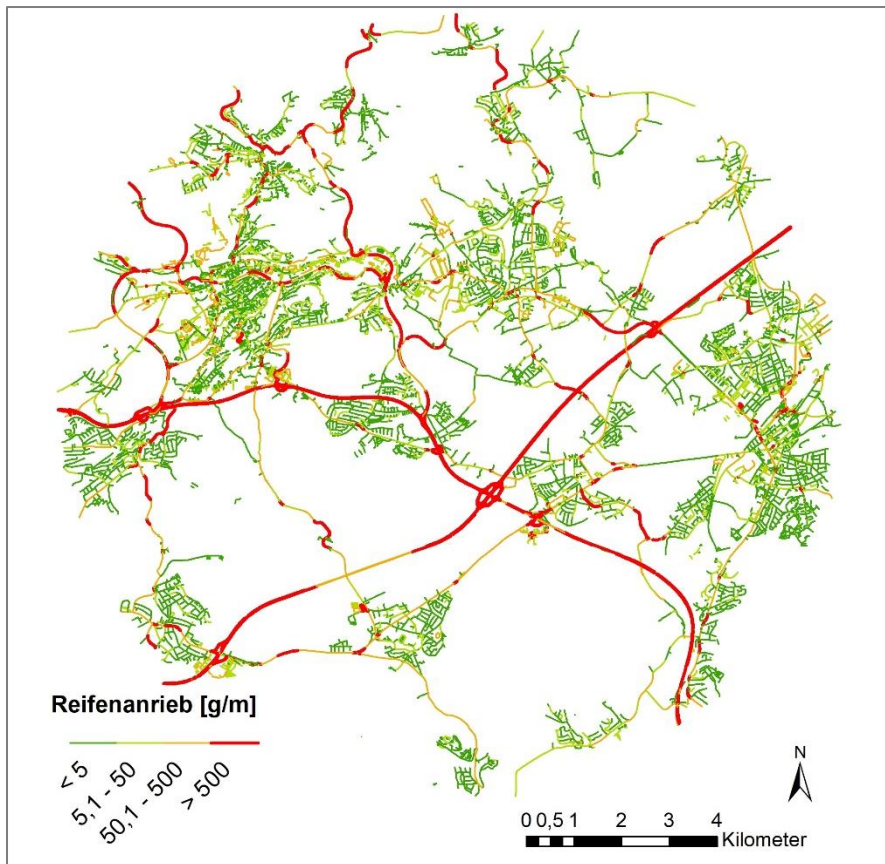


Abbildung 3: Durchschnittliche jährliche Reifenabriebmengen in Gramm Reifenabrieb pro Meter Straße für einen Ausschnitt mit einem Radius von 8 km um Homburg

Außer der Erstellung von Potential-/Hotspotkarten für die Generalentwässerungsplanung lassen sich die Ergebnisse auch zur Erstellung/Überarbeitung von Regelwerken im Verkehrssektor und Wasserversorgungsbereich nutzen. In TyreWearMapping werden auf Grundlage der Modelle die Ausbreitung von Reifenemissionen im Wupper- und Panke- Einzugsgebiet berechnet.

6 Maßnahmen gegen Kunststoffemissionen im Wasserkreislauf

In Bezug auf die Wasserwirtschaft unterscheiden die Verfasser dieses Beitrags technische, infrastrukturelle, planerische und regulatorische Maßnahmen (Tab. 2).

Tabelle 2: Maßnahmen gegen Kunststoffemissionen in den Wasserkreislauf

Maßnahmen	Beispiele
Technisch	Filtersysteme in Kläranlagen oder Regenwasserabläufen, Filter bei textilen Reinigungsprozessen, Klärschlammverbrennung
Infrastrukturell	Regenwasserbehandlung bei Trennkanalisation und Vermeidung von Mischwasserabschlägen bei Mischkanalisation, Straßenreinigung
Planerisch	Identifikation von Hotspots, Reifenabrieb: Anpassung der Verkehrs- und Umweltplanung, Anpassung von Behandlungskapazitäten
Regulatorisch	Verbot von oft gelitterten Kunststoffen, Pfandpflicht, Kennzeichnungspflicht

Vorrangig und ganz allgemein aber müsse das Bewusstsein in der Gesellschaft für die Problematik von Kunststoffemissionen geschaffen und gestärkt sowie die Chancen einer circular (plastics) economy begreifbar gemacht werden. So kann der Konsument eigenmotiviert zur Reduzierung von Kunststoffemissionen beitragen, sei es durch Produkt- oder Verpackungsverzicht, durch weniger und moderates Autofahren oder durch Bevorzugung natürlicher Kleidung. Denn letztendlich sind Kunststoffeinträge in der Umwelt nur selten rückholbar und müssen als generationenübergreifendes Problem verstanden und gelöst werden.

7 Literaturverzeichnis

[1] DIE ZEIT: Das Zeitalter der Kunststoffe, 18. Dezember 1952

[2] PlasticsEurope, Market Research Group, (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH, Published on the occasion of the special show of K 2019

[3] UMSICHT: Konsortialstudie: Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik, 2018

[4] NOAA (2018): What are microplastics? Hg. v. National Oceanic and Atmospheric Administration. Online verfügbar unter <https://oceanservice.noaa.gov/facts/microplastics.html>, Stand: 17.12.2019.

[5] S. Fuchs: Quantifizierung der Schwermetalleinträge aus Deutschland zur Umsetzung der Beschlüsse der Internationalen Nordseeschutzkonferenz. Forschungsvorhaben 200 22 233 im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau, 2002

[6] ECHA: ANNEX XV RESTRICTION REPORT - PROPOSAL FOR A RESTRICTION, SUBSTANCE NAME(S): intentionally added microplastics, 11 January 2019

- [7] F. Liu, K. B. Olesen, A. Reimer Borregaard, J. Vollertsen: Microplastics in urban and highway stormwater retention ponds, *Science of The Total Environment*, Volume 671, S. 992-1000, 2019
- [8] 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, S. 401–407, 2017a
- [9] J. Talvitie et al.: 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, S. 164–172, 2017b
- [10] S. Ziajahromi et al.: Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics. Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics, *Water research* 112, S. 93–99, 2017
- [11] M. Lares et al.: Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR, *Water Research*, 133, S. 236-246, 2018
- [12] B. Quinn, F. Murphy, C. Ewins: Validation of density separation for the rapid recovery of microplastics from sediment, *Anal. Methods* 9 (9), S. 1491–1498, 2017
- [13] <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/referenzen/firbrex.html>, Stand: 17.12.2019
- [14] K. Magnusson, F. Noren: Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant. Available online at www.ivl.se, 2014
- [15] J. Vollertsen, A. A. Hansen, A. S. Krüger: Microplastic in Danish wastewater. Sources, occurrences and fate: The Danish Environmental Protection Agency, 2017
- [16] <https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/klaerschlam/entsorgung-und-verwertung-von-klaerschlam-infografik/>, Stand: 17.12.2019.
- [17] Das Projekt »iMulch« wird mit Mitteln aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) »Investitionen in Wachstum und Beschäftigung« gefördert. <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/referenzen/imulch-kunststoffe-boeden.html>, Stand: 17.12.2019
- [18] European Commission: A European Strategy for Plastics in a Circular Economy, 2018
- [19] SAM-Scientific Advise Mechanism: Environmental and Health Risks of Microplastic Pollution. Scientific Opinion by Group of Chief Advisors, 2019

[20] Hillenbrand et al.: Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden – Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen. UBA-Texte 19/05, Umweltbundesamt 2005

[21] Das Verbundprojekt »TyreWearMapping« wird vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) gefördert.

<https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/referenzen/tyrewearmapping.html>, Stand: 17.12.2019