

EmiStop • Projekt der BMBF Initiative:
Mikroplastik in der Umwelt – Quellen, Senken, Lösungsansätze

Industrielle Mikroplastikemissionen Handlungsempfehlungen

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



FONA
Forschung für nachhaltige
Entwicklungen
BMBF

Eine Initiative des Bundesministeriums
für Bildung und Forschung

Plastik
in der **Umwelt**

Quellen • Senken • Lösungsansätze



Impressum

Autoren:

Barkmann, Luisa; Weber, Felix; Raber, Wolf; Masch, Mark; Wolff, Sebastian; Bitter, Hajo; Bitter, Eva; Kerpen, Jutta; Lackner, Susanne; Engelhart, Markus

Projektpartner:

EnviroChemie GmbH | Roßdorf

Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR, Fachgebiet Abwasserwirtschaft | Darmstadt

Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR, Fachgebiet Abwassertechnik | Darmstadt

Hochschule RheinMain, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik | Rüsselsheim

inter 3 GmbH - Institut für Ressourcenmanagement | Berlin

BS-Partikel GmbH | Mainz

Bildrechte:

Luisa Barkmann und Sebastian Wolff

Förderung:

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Förderkennzeichen: 02WPL1441B

Januar 2022

URN: [urn:nbn:de:tuda-tuprints-202304](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-202304)

Veröffentlicht unter CC-BY 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses>

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis	II
Vorwort	III
1 Leitfaden durch das Dokument/Wer liest was.....	1
2 Mikroplastikemissionen aus der Industrie	2
2.1 Mikroplastik in der Umwelt.....	2
2.2 Industrielle Eintragspfade	2
3 Analytik von Mikroplastik in industriellem Abwasser	4
3.1 Überblick Analyseansätze.....	4
3.2 Bewertung der Ausgangsvoraussetzung, Planung von Probenahme und Analytik	5
3.3 Checkliste Analyse von Mikroplastik	8
4 Industrielle Mikroplastikemissionen verhindern	12
4.1 Übersicht Interventionsmaßnahmen für industrielle Mikroplastikemissionen	12
4.2 Empfehlungen zu produktionsnahen Maßnahmen und Mitarbeiterverhalten	13
4.3 Empfehlungen zum Regenwassermanagement.....	15
4.4 Empfehlungen Abwasseraufbereitungsverfahren	17
4.4.1 Überblick zu möglichen Aufbereitungsverfahren.....	17
4.4.2 Auswahl von Aufbereitungsverfahren.....	18
5 Literaturverzeichnis.....	22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Industrielles Mikroplastik auf Asphalt eines Produktionsstandortes	2
Abbildung 2: Produktionsabfall auf einem Freigelände eines Produktionsstandortes.....	2
Abbildung 3: Austritt von Granulat aus beschädigter Sackware.....	2
Abbildung 4: Industrielles Mikroplastik am Wegrand.....	3
Abbildung 5: Industrielles Mikroplastik am Regenkanal.....	3
Abbildung 6: Delphi-Befragung: Industrievertreter zu Mikroplastikverlusten am Standort (n=43)	3
Abbildung 7: Planung und Dokumentation sind wichtig.....	5
Abbildung 8: Mischproben von Industrieabwässern (1 l)	5
Abbildung 9: Erstellung von Mischproben (1 l)	5
Abbildung 10: Mischprobe (0,2 l) beladenes Abwasser	6
Abbildung 11: Edelstahlkerzenfilter zur Probenahme	6
Abbildung 12: Probenahme mit saugseitigem Edelstahlkerzenfilter und Mischprobe für Begleitparameter.....	6
Abbildung 13: Expert:inneneinschätzung zur Wirksamkeit von Maßnahmen zum Mikroplastikrückhalt (n=44)	12
Abbildung 14: Fallbeispiel Container zur Befüllung von Sackware. Die Masse der Pelletreste in den Absackhilfen wurden vor und nach Implementierung einer Maßnahme ermittelt (Barkmann und Engelhart 2020).	14
Abbildung 15: Hoffläche an Abrollcontainer bei der Leerung vor und nach Erneuerung der Mulde ...	14
Abbildung 16: Beschädigung an Sackware (links) wird durch entsprechende Verpackungen (rechts) vermieden	15
Abbildung 17: Übersicht möglicher Verfahren zur Entfernung von Mikroplastik, gruppiert in Trennoperationen	17
Abbildung 18: Trenngrößen von Filtrationstechniken (Quelle: EnviroChemie GmbH).....	17
Abbildung 19: Standardisierte Relevanz der Bewertungskriterien nach Stakeholder-Befragung (n=54) inkl. Standardabw.....	19
Abbildung 20: Nutzwertanalyse für Verfahren der industriellen Abwasseraufbereitung (Raber und Yildiz 2021)	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile thermoanalytischer und spektroskopischer Analysemethoden für Mikroplastik (Braun et al. 2020).....	4
Tabelle 2: Wirkungsgrade zum Stoffrückhalt technischer Maßnahmen in der Niederschlagswasserbehandlung (mod. nach Sommer 2021)	16

Vorwort

[EmiStop](#) ist ein Projekt, welches in der Initiative „[Plastik in der Umwelt](#)“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung über drei Jahre die Eintragspfade von Mikroplastik (ausgenommen Fasern und Rezyklate) in der kunststoffproduzierenden und -verarbeitenden Industrie sowie der zwischengeschalteten Logistik mit Fokus auf das Wassermanagement und die (Ab)Wasserinfrastruktur untersucht hat. In enger Zusammenarbeit mit einzelnen Betriebsstandorten und Industrieverbänden sowie durch Betriebsbegehungen, Probenahmen und Laboranalysen wurden angepasste Probenahmestrategien und -methoden, analytische Verfahren für Mikroplastik sowie Maßnahmen zur Vermeidung des Eintrags von Mikroplastik in die Umwelt entwickelt.

Expert:innen aus Industrie, Verbänden und Wissenschaft haben in den letzten Jahren eine Reihe von branchenspezifischen Managementansätzen und Selbstverpflichtungen zur Vermeidung von Mikroplastikemission ins Leben gerufen, wie z.B. [Operation clean Sweep](#), [Null Granulatverlust](#) oder [Alliance to end plastic waste](#), die den Protagonist:innen viele gute Hinweise zur Vermeidung und Verminderung von Mikroplastikemissionen in die Umwelt geben. Aufgrund der Neuheit des Themas und der aktuellen Dynamik in Forschung und Normung, insbesondere bei analytischen Methoden zur Bestimmung von Mikroplastik, fehlt es in der Praxis oft an Strategien und Methoden, um die zumeist qualitativen Elemente der industriellen Selbstverpflichtungen im Hinblick auf zukünftige regulative Rahmenbedingungen quantitativ zu untersetzen.

Diese Empfehlungen zur Quantifizierung und Bekämpfung von industriellen Mikroplastikemissionen fassen zentrale Forschungsergebnisse des Projektes EmiStop zusammen und sind eine Orientierung und Leitfaden für Industrievertreter:innen und Praktiker:innen, die sich mit dem Thema Mikroplastik an Ihrem Standort oder Betrieb auseinandersetzen möchten. Ergänzend hierzu haben wir eine [Webkonferenz](#) erstellt, die online zur Verfügung steht. Für jegliche Rückfragen, weitergehende Informationen oder Hilfestellungen stehen wir als [Ansprechpartner](#) gerne zur Verfügung.

1 Leitfaden durch das Dokument/Wer liest was

Hat sich ein Unternehmen dazu entschlossen an einem Standort das Thema Mikroplastik anzugehen, stellen sich zu Beginn meist viele Fragen. Oft reagieren Mitarbeiter:innen mit Skepsis, wissen nicht, wo sie beginnen sollen oder was konkret unternommen werden kann. Dieser Leitfaden soll Klarheit schaffen und als Vorschlag zur strukturierten Untersuchung des eigenen Betriebsstandortes dienen. Jedes Kapitel richtet sich dabei an unterschiedliche Akteur:innen im Unternehmen, weshalb im Folgenden ein möglicher Ablauf mit allen Beteiligten und den passenden Kapiteln exemplarisch dargestellt ist:

Entscheidet sich die **Geschäftsstelle** (Kapitel 2) dazu, die Emissionen an Mikroplastik zu untersuchen, sollte zuerst ein:e Koordinator:in benannt werden. Hierzu bieten sich meist die Umweltbeauftragten eines Standortes an, da diese nicht nur Einblicke in die praktischen Tätigkeiten, sondern auch in die anfallenden Stoffströme und in die Verwaltungsabläufe haben. Ebenfalls wird eine Vertretung von Schichtleitungen, Abwasseringenieur:innen und Analytiker:innen benötigt.

In einem ersten **Kick-off Meeting** sollten alle Beteiligten zusammenkommen. Die Geschäftsstelle benennt den/die Koordinator:in und betont die mit der Verringerung von Mikroplastikemissionen für das Unternehmen verbundenen Ziele. Nun kann die Untersuchung in folgenden Schritten erfolgen:

Der/die **Koordinator:in** (Umweltbeauftragte) sichtet zuerst Daten und führt Betriebsbegehungen durch (Kapitel 2.2, 3.2), um sich einen Überblick zu verschaffen und den Ist-Zustand zu erfassen. Konkrete Mikroplastikkonzentrationen können in einer Messkampagne ermittelt werden. Soll die hierzu benötigte Analytik intern entwickelt werden, sind **Analytiker:innen** aus den vorhandenen Laboren einzubeziehen (Kapitel 3). Anhand der Erkenntnisse aus Begehung, Betriebsdaten und Analysen können Hot-Spots und Eintragspfade identifiziert werden.

Die Akteur:innen können nun gezielt Gegenmaßnahmen intern prüfen und implementieren (Kapitel 4). Für den Erfolg von Maßnahmen ist der Einbezug und die Akzeptanz der Mitarbeiter:innen von elementarer Bedeutung, weshalb hier der **Schichtleitung** unter den Akteur:innen eine wesentliche Rolle zukommt (Kapitel 4.2). Wenn bauliche Maßnahmen im Regen- oder Abwassersystem in Frage kommen, sind für die **Abwasseringenieur:innen** in den Kapiteln 4.3 und 4.4 verschiedene Vorschläge aufgeführt.

Nach Einführung von Maßnahmen ist eine regelmäßige **Evaluierung** essentiell. Hier sind wieder Koordinator:in und Analytiker:innen gefragt, um mit Messdaten die Wirksamkeit der Maßnahmen zu belegen. Dieser Erfolg sollte insbesondere mit Hilfe der Schichtleitung nach innen und von der Geschäftsführung nach außen kommuniziert werden.

2 Mikroplastikemissionen aus der Industrie

2.1 Mikroplastik in der Umwelt

Mikroplastik ist mittlerweile ubiquitär in der Umwelt vorhanden, ob in der Luft (Dris et al. 2015), im Boden, Ozeanen und Flüssen (Law 2017; Wong et al. 2020) oder sogar an den Polkappen (González-Pleiter et al. 2020; Absher et al. 2019). Mikroplastik kann dabei von Organismen aufgenommen werden, es können Schadstoffe an den Partikeln adsorbieren oder sich durch Leaching Additive aus den Mikroplastikpartikeln lösen (Bertling et al. 2021; Ugwu et al. 2021).

Mit dem Begriff Mikroplastik werden Kunststoffpartikel mit einem Durchmesser von 1 – 1000 µm beschrieben. Partikel mit einem Durchmesser von 1 – 5 mm werden als großes Mikroplastik bezeichnet. Je nach Ursprung wird primäres und sekundäres Mikroplastik unterschieden. Primäres Mikroplastik wird als Partikel absichtlich hergestellt, wie z.B. Granulate oder Reibkörper für Kosmetikprodukte. Sekundäres Mikroplastik entsteht durch Abnutzung oder Zerfall von Kunststoffprodukten. Dabei ist zu beachten, dass die Partikelgröße besonders bei sekundärem Mikroplastik keinen Status Quo darstellt, sondern große und kleine Mikroplastikpartikel in der Umwelt immer weiter zu noch kleineren Partikeln zerfallen (Bertling et al. 2021).

2.2 Industrielle Eintragspfade

Mikroplastik kann bei herstellenden oder weiterverarbeitenden Betrieben der Kunststoffindustrie und bei dem Transport von Zwischen- und Endprodukten anfallen. Es kann sich dabei z.B. um Pulver, Granulate oder sekundäres Mikroplastik wie Staub, Späne, Abrieb und Fasern handeln. Austragswege in die Umwelt können über den Boden im Außenbereich, Verwehungen, Abfall, Regenwasserableitung oder anfallendes Prozess- und Abwasser erfolgen. In diesen Handlungsempfehlungen werden nur die Austragswege über den Abwasserpfad detailliert betrachtet.



Abbildung 1: Industrielles Mikroplastik auf Asphalt eines Produktionsstandortes

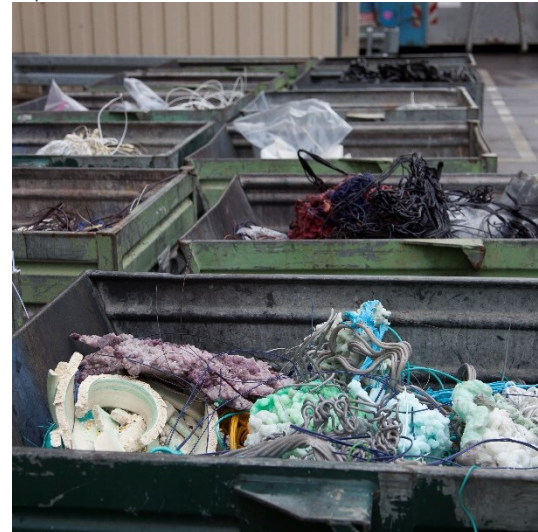


Abbildung 2: Produktionsabfall auf einem Freigelände eines Produktionsstandortes

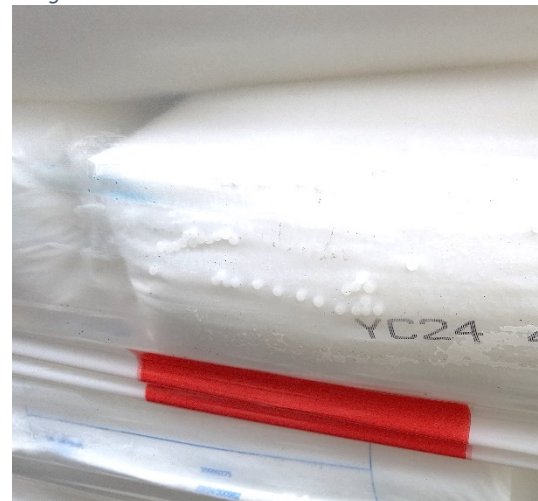


Abbildung 3: Austritt von Granulat aus beschädigter Sackware



Abbildung 4: Industrielles Mikroplastik am Wegrand



Abbildung 5: Industrielles Mikroplastik am Regenkanal

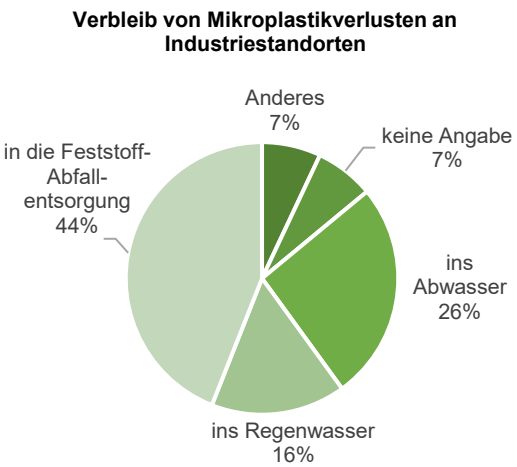


Abbildung 6: Delphi-Befragung: Industrievertreter zu Mikroplastikverlusten am Standort (n=43)

Industrieller Mikroplastikeintrag wird auf 0,1 – 1 % des gesamten, globalen Mikroplastikeintrages in die Umwelt geschätzt, was einer Masse von bis zu 570.000 t pro Jahr entspricht (Bertling et al. 2018; Essel et al. 2015). Aus unternehmerischer Sicht werden Verlustraten von 0,001 - 0,1 % während der Produktion von Kunststoffprodukten angenommen (Peano et al. 2020; Boucher et al. 2020). Diese Verluste können in Unternehmen meist nicht über Einsatzstoff- und Produktwägungen erfasst werden, da sie zu gering sind, um zum Beispiel über die Wägefehler von LKW-Waagen hinauszugehen. Als geeignetes Mittel zur Minimierung von Granulatverlusten haben sich die in Operation Clean Sweep (OCS) bereits genannten Begehungen des Betriebsgeländes und Gespräche mit Mitarbeiter:innen gezeigt. Als wichtige Ergänzung zu OCS sind die Quantifizierung des Erfolges der eingeführten Maßnahmen und ggf. die Implementierung oder Optimierung von Prozess- oder Abwasserbehandlungsanlagen zu sehen.

Eine im Projekt EmiStop durchgeführte Befragung von Expert:innen ergab, dass 45 % der befragten Industriebetriebe einen Anfall von Mikroplastik im sichtbarem Maße feststellen, wobei die Abfallentsorgung, Abwasser und Regenwasser die größten Senken darstellen (siehe Abbildung 6). EmiStop hat bei der Begehung von neun Betrieben aus Herstellung, Logistik und Weiterverarbeitung von Kunststoffen vor allem im Außenbereich genutzte Flächen für Abfallsammlung, Lagerung und Umfüllung von Granulaten oder Pulver als häufige Austragsquellen identifiziert. Anfallendes Prozess- und Abwasser wird meist kontrolliert aufgefangen und behandelt, sodass hier kaum unkontrollierter Austrag in die Umwelt stattfindet. Bei der Abfallentsorgung findet durch Verwehungen und Regenwasserableitung ein Austrag in die Umwelt statt. Zur Vermeidung des Austrages von Mikroplastik in die Umwelt von belasteten Flächen auf Betriebsgeländen ist ein funktionierendes Regenwassermanagement von großer Bedeutung (siehe Kapitel 4.3).

3 Analytik von Mikroplastik in industriellem Abwasser

3.1 Überblick Analyseansätze

Mikroplastik kann spektroskopisch oder thermoanalytisch zuverlässig analysiert werden. Spektroskopische Methoden (v.a. μ -Raman- und μ -FTIR-Spektroskopie) liefern neben der qualitativen Bestimmung der Mikroplastikpartikel und der Partikelanzahlkonzentrationen Informationen über Partikelmorphologie und Größenverteilung. Die Ergebnisse thermoanalytischer Verfahren (v.a. Pyrolyse-GC-MS, TED-GC-MS oder DSC) werden als Massenkonzentrationen angegeben (siehe Tabelle 1). Es gibt noch keine standardisierten Analyseverfahren. Allerdings werden in Dokumenten wie Braun et al. 2020 oder der DIN EN ISO/TR 21960 Analysemethoden vorgestellt, die als erprobt gelten. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf spektroskopische Methoden und die dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) als thermoanalytische Methode und erheben somit keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Partikel- bzw. Massenkonzentrationen können nicht auf Basis des jeweils anderen Werts berechnet werden. Die Analyseansätze sind somit komplementär.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile thermoanalytischer und spektroskopischer Analysemethoden für Mikroplastik (Braun et al. 2020)

Analysemethode		Nachweisgrenze	Vorteile	Nachteile
spektroskopische Methoden	μ -FTIR	10 μm	- zerstörungsfrei - Partikelanzahl, -morphologie - relevant für (Öko-)Toxikologie - bei funktionierender Kontaminationsvermeidung sehr sensitiv	- aufwendige Probenaufbereitung - zeitintensive Messung
	μ -Raman	1 – 5 μm		
thermoanalytische Methoden	DSC	50 μg	- Gehaltsbestimmung - einfache Probenaufbereitung - schnelle Messung - für Monitoring/ Prozessüberwachung geeignet	- ggf. hohe Probenvolumina notwendig, um Nachweisgrenze zu erreichen - kleinste Partikel werden aufgrund geringer Masse ggf. nicht erfasst
	Py-GC-MS	0,01 – 1 μg		
	TED-GC-MS	0,5 – 2,4 μg		

3.2 Bewertung der Ausgangsvoraussetzung, Planung von Probenahme und Analytik

Zur Bewertung der Ausgangssituation vor Ort sollte eine Begehung durchgeführt werden, um vorab potentielle Hotspots zu identifizieren. Die untenstehende **Checkliste** soll als Hilfestellung dienen, um die wässrigen Haupteintragswege Regenwasser und Prozess-/Abwasser zu analysieren.

Überblick verschaffen: Identifizierte potenzielle Eintragswege können zuerst anhand von Schätzungen und vorhandenen Daten nach Relevanz gegliedert werden. So kann aus einem bekannten Prozesswasservolumenstrom und den darin regelmäßig gemessenen abfiltrierten Stoffen oder dem Trockenrückstand eine maximale Mikroplastikfracht abgeschätzt werden. Ebenfalls können kritische Flächen regelmäßig abgekehrt und der Kehrriecht gewogen werden. Anhand dieser Schätzungen können zuerst die potenziellen Eintragswege mit größerer Relevanz untersucht werden.

Probenahme planen: Für jedes zu beprobende Medium müssen vorab Probenahmestelle, Probenahmemethode und Analyseverfahren festgelegt werden. Es muss geklärt werden,

- ob Wasserströme kontinuierlich/periodisch anfallen,
- ob Schwankungen von Konzentrationen oder Volumenströmen zu erwarten sind,
- wo ein geeigneter Zugang für die Probenahme ist,
- was für Strömungsverhältnisse dort herrschen und
- ob eventuell bauliche Maßnahmen getroffen werden müssen, um eine repräsentative Probenahme zu gewährleisten.

Repräsentative Probenahme bedeutet eine turbulente Durchmischung an der Entnahmestelle und eine Entnahmearart und ein Intervall, die alle Zustände des Mediums erfassen. DIN 38402-11 bietet zum Vorgehen detaillierte Informationen.

Probenentnahme festlegen: Vorab wird eine Untersuchung der Zusammensetzung des Mediums empfohlen. Es wird eine repräsentative Stichprobe entnommen und auf Filtrierbarkeit, Verhalten bei der Oxidation (ein Aufbereitungsschritt), generelle Feststoffbelastung und Mikroplastikanteil untersucht.



Abbildung 7: Planung und Dokumentation sind wichtig

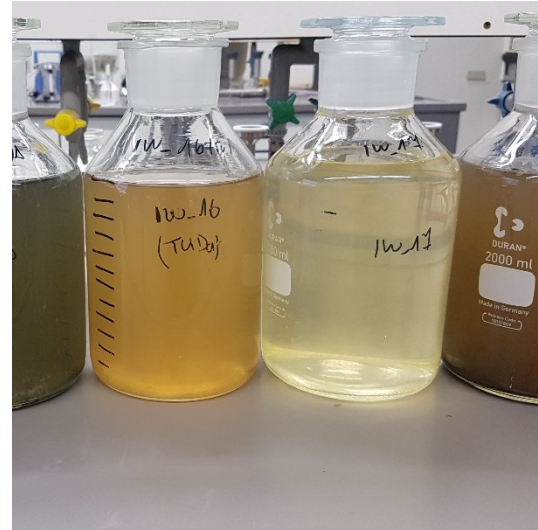


Abbildung 8: Industrieabwasser Mischproben (1 l)



Abbildung 9: Erstellung von Mischproben (1 l)



Abbildung 10: Mischprobe (0,2 l) beladenes Abwasser



Abbildung 11: Edelstahlkerzenfilter zur Probenahme



Abbildung 12: Probenahme mit saugseitigem Edelstahlkerzenfilter und Mischprobe für Begleitparameter

Bei geringer Feststoffkonzentration < 30 mg abfiltrierbare Stoffe (AFS) je Liter wird eine volumenreduzierende Probenahme, z.B. mittels eines Edelstahlkerzenfilters durchgeführt. Dies ist meistens bei gereinigten Prozesswasserströmen oder Spülwässern der Fall. Bei hoher Feststoffkonzentration > 30 mg AFS pro Liter ist eine Probenahme mittels Filter meist nicht möglich, da diese zu schnell verblocken und kein repräsentatives Volumen beprobt werden kann. Hier bieten sich qualifizierte Mischproben an. Ist der Mikroplastikanteil der in der Probe enthaltenen Feststoffe sehr gering, muss das Probenahmevolumen erhöht werden. Dies gilt insbesondere für die thermoanalytischen Verfahren.

Analysemethode auswählen: Für eine gute Probenaufbereitung ist es wichtig, eventuelle Reaktionen mit dem Medium und den einzusetzenden Chemikalien an einer Vorprobe zu testen (siehe Kapitel 3.3). Die Kenntnis über die Feststoffkonzentration und den darin enthaltenen Mikroplastikanteil ist wichtig für den Messerfolg. Es ist sinnvoll, größere Volumina über längere Zeiträume zu beproben und bei zu hoher Mikroplastikkonzentration nach der Aufbereitung z.B. für spektroskopische Verfahren die Probe nach Wolff et al. 2021 zu teilen. Für ein umfassendes Bild ist es sinnvoll eine Analyse zur Anzahl- und eine zur Massenbestimmung pro Volumeneinheit durchzuführen (siehe Kapitel 3.1). Sind mindestens 0,05 mg an Mikroplastik in der Probe vorhanden, kann für schmelzfähige Kunststoffe die dynamische Differenzkalorimetrie als sehr schnelles, kostengünstiges und einfaches Verfahren zur Massenbestimmung eingesetzt werden (Bitter und Lackner 2021). Je nach Medium kann diese Messmethode mit einer verkürzten Aufbereitung (z.B. ohne Dichteseparation, siehe Kapitel 3.3) eingesetzt werden und eignet sich sehr gut zur innerbetrieblichen Kontrolle von Mikroplastikfrachten. Zur Abschätzung des ökotoxikologischen Einflusses werden spektroskopische Methoden zur Bestimmung von Anzahlkonzentrationen mit parallelen Größenmessungen der Mikroplastikpartikel eingesetzt.

Mikroplastikaustrag auf dem Betriebsgelände erkennen

Vorhandene Daten sichten

- ☐ **Abwasserkataster** sichten: Welche Wasserströme fallen an? Gibt es eine Behandlung? Wo werden diese eingeleitet?
- ☐ Sichtung von **Messdaten** zu z.B. Feststoffkonzentrationen der anfallenden Wasserströme. Lassen sich anhand der Daten erste Bilanzen aufstellen?
- ☐ **Produktionsdaten** erfassen: Was sind Arbeitsschritte mit potenziellem Mikroplastikaustrag (z.B. Fräsen, pelletieren)? Wann und wo werden diese durchgeführt, gibt es bestimmte zeitliche Abfolgen?
- ☐ Bilder und Dokumentationen von **Kanalreinigungen** prüfen: Sind charakteristische, am Standort gehandhabte Kunststoffformen erkennbar, wurden besondere Verschmutzungen dokumentiert?

Gespräch suchen

- ☐ Erfragen Sie bei **Fachkräften** und **Schichtleitung** schon vorhandene Konzepte (Operation Clean Sweep, Null Pellet Verlust), deren Umsetzung, Akzeptanz durch Mitarbeiter:innen und allgemeine Erfahrungen.
- ☐ Suchen Sie mit **Mitarbeiter:innen** bei der Begehung vor Ort das ungezwungene Gespräch, binden Sie das Personal aktiv in Prozesse ein und fördern Sie das Verständnis.

Begehung Abwassersystem

- ☐ **Visuelle Untersuchung** aller Betriebsbereiche, Prozess- und Abwasserwege. Besonders relevante Bereiche sind z.B.:
 - Arbeitsplätze und Maschinen mit Wassereinsatz
 - Gerinne, Speicherbecken, Pumpen oder Vorreinigungen von Wässern
 - nass gereinigte Flächen und Wege
- ☐ **Dokumentation** der Form, Farbe, Größe und abgeschätzten Menge der gesichteten Mikroplastikpartikel
- ☐ **Dokumentation** der Art und Intensität der Nutzung der Betriebsbereiche
- ☐ Unterteilung der Betriebsbereiche anhand der visuellen Sichtung in **Belastungskategorien**

Begehung Regenwassersystem

- ☐ **Visuelle Untersuchung** aller abflusswirksamen **Flächen** und anderer möglicher Einzugsgebiete, die in die Regenwasserkanalisation entwässern, auf Mikroplastikpartikel. Besonders zu beachten sind:
 - Wegränder, Rinnsteine und Ecken
 - Wege und Flächen mit starker Nutzung
 - Abfallsammelplätze und Lagerplätze
 - Bereiche für Umfüllung und Umschlag
- ☐ **Visuelle Untersuchung** des **Regenwassersystems**, Schächte, Gulli-Deckel, Siebeinsätze usw.
- ☐ **Dokumentation** der Form, Farbe, Größe und abgeschätzten Menge der gesichteten Mikroplastikpartikel
- ☐ **Dokumentation** von Bodenbeschaffenheit (Asphalt, Beton, Pflaster, gewachsener Boden), Art und Intensität der Nutzung, Bebauung und Größe der Flächen
- ☐ Unterteilung der Flächen anhand der visuellen Sichtung in **Belastungskategorien**
- ☐ **Vergleich** der dokumentierten Flächendaten mit den Belastungskategorien: Lassen sich anhand der Morphologie der gefundenen Mikroplastikpartikel Rückschlüsse auf die Herkunft ziehen?
- ☐ **Kombinierung** aller ermittelten Daten und Abschätzung von räumlichen Hotspots und Emissionspotentialen durch das Regenwassersystem

3.3 Checkliste Analyse von Mikroplastik

Die Checkliste basiert auf den in EmiStop gewonnenen Erfahrungen mit μ -Ramanspektroskopie und DSC sowie aktueller Literatur. Mit Ausnahme der Messeinstellungen kann die Checkliste ebenfalls zur Analyse mittels μ -FTIR verwendet werden. Hinweise zur Kontaminationsvermeidung und Probenaufbereitung können auch für thermoanalytische Methoden herangezogen werden.

Weiterführende Literatur zum Einstieg in die Mikroplastikanalytik: Brander et al. 2020, Cowger et al. 2020, Primpke et al. 2020 sowie das Statuspapier des BMBF von Braun et al. 2020.

Kontaminationsvermeidung

Mikroplastikfreie bzw. -arme Umgebung

- ☐ Probenaufbereitung in **Clean Bench** durchführen. Proben außerhalb der Clean Bench mit **Alufolie** abdecken (v.a. im Abzug).
- ☐ **Nicht im Abzug arbeiten**, dort ist das Kontaminationsrisiko am höchsten.
- ☐ Baumwollkittel tragen.
- ☐ Chemikalien-Schutzhandschuhe können zur Probenkontamination führen (Witzig et al. 2020), daher **Handschuhe für Reinraumanwendungen** verwenden.

Filtrierte Chemikalien

- ☐ Auch hochreine Chemikalien können mit Mikroplastik kontaminiert sein, bspw. durch Schraubverschlüsse der Behälter. **Chemikalien** vor Verwendung **filtrieren** und in Glasflaschen mit Normschliff-Stopfen aus Glas lagern.
- ☐ **Reinwasser** Typ 2 oder **Reinstwasser** Typ 1 für Spülschritte einsetzen. Mittels Ionentauscher oder Umkehrosmose deionisiertes Wasser liefert i. d. R. keine ausreichende Partikelfreiheit.

(Mikro-)Plastikfreie Geräte und Materialien

- ☐ **Glas- und Edelstahlgerätschaften** verwenden.
- ☐ Schwer zu ersetzende Materialien, wie **Silikon** oder **PTFE** nicht in die Analyse einbeziehen oder das Analyseergebnis statistisch gegenüber Blindwert absichern.
- ☐ **PFA-Spritzflaschen** (o. ä.) für Reinstwasser verwenden.
- ☐ **Gerätschaften** mit Probenkontakt vor Verwendung mit Leitungs- und ggf. Reinigungsmittel **reinigen**, anschließend mit Reinstwasser spülen.

Blindwerte

- ☐ Je Probenstet einen **Verfahrensblindwert** erstellen. Je Probenahmeekampagne mindestens drei Verfahrensblindwerte erstellen.
- ☐ **Setup der Probenahme** entweder durch Filtration von Reinstwasser/Leitungswasser (vorher Mikroplastikkonzentration bestimmen!) oder durch einen zweiten Blindwertfilter, der während der Probenahme hinter den Probenfilter geschaltet wird, in Blindwert einbeziehen (Jekel et al. 2020; Marco Pittroff et al. 2021).
- ☐ Analyseergebnisse per **Signifikanztest** mit den Blindwerten vergleichen. Bei geringer Probenzahl das **Limit of Quantification** (LOQ) als $LOQ = \text{mittlerer Blindwert} + 10 * \text{Standardabweichung des Blindwerts}$ berechnen (DIN 32645).

Wiederfindungsraten erstellen

- ☐ Wiederfindungsraten des gesamten Analyseverfahrens mit Referenzpartikel durchführen.
- ☐ Geeignete Partikel: sphärische, fluoreszierende Kunststoffpartikel (Wolff et al. 2021) oder sekundäres Mikroplastik, das nach Esch et al. 2020 hergestellt werden kann.
- ☐ **Wiederfindungsraten einzelner Aufbereitungsschritte** erstellen, um verlustreiche Teilschritte zu erkennen und diese zu optimieren.
- ☐ **Wiederfindungsraten sind eine Näherung**, da sich das Verhalten von Mikroplastik je nach Polymer, Additivanteil, Alterung und Morphologie unterscheidet.

Beständigkeitstests

- ☐ V. a. **beim Einsatz oxidativer Chemikalien** die Beständigkeit von Kunststoffen überprüfen.
- ☐ Beständigkeitstests z. B. in Anlehnung **an DIN EN ISO 175** an Kunststoffpellets vornehmen (Wolff et al. 2019; Weber et al. 2021).
- ☐ Beständigkeitstests sind eine **Näherung**, da die Beständigkeit von Mikroplastik von Polymer, Additiven, Alterung und Morphologie abhängt.

Probenaufbereitung

Aufschluss biologisch-organischer Matrixbestandteile

- ☐ Probenaufbereitung **an die jeweilige Abwassermatrix anpassen** (v. a. bei industriellem Abwasser). Bei unbekannten Abwasserinhaltsstoffen, das Aufbereitungsverfahren an **Vorproben** testen.
- ☐ Mikroplastik in Abwässern ist i. d. R. mit Biofilm bewachsen oder in Flocken eingebunden: **Chemisch-oxidativen oder enzymatischen Aufschluss vor einer Dichteseparation** durchführen, um Flocken und Biofilme zu zerstören und eine saubere Abtrennung des Mikroplastiks zu gewährleisten.
- ☐ Geeignete Verfahren: **Chemisch-oxidativ** mit H_2O_2 (Wolff et al. 2021), ggf. katalysiert mit Fe(III) (Fenton-Reaktion) (Horton et al. 2021), NaClO (Wolff et al. 2021), **enzymatische** Aufschlüsse (Löder et al. 2017) oder Kombinationen aus diesen.

Abtrennung anorganischer Matrixbestandteile

- ☐ Gelöste anorganische Stoffe, die auf Filtern **ausfallen**, mit schwach konzentrierter HCl lösen.
- ☐ **Anorganische Matrixbestandteile** (v. a. Sand, Glas, Metalle) durch eine **Dichteseparation** abscheiden. Dabei Dichte der zu analysierenden Polymere beachten. Lösungen aus **ZnCl_2 oder Natriumpolywolframat (SPT)** eignen sich, um Polymere hoher Dichte (PVC, PTFE) aus der Matrix abzutrennen.
- ☐ Dichteseparation durch **Zentrifugation** beschleunigen.

Teilprobenahme/Aliquotierung

- ☐ Probenteilungen sind notwendig, wenn die Probe **zu viele Partikel** enthält, um spektroskopisch auf einem Analysefilter gemessen werden zu können (Überlagerungen, Agglomerate).
- ☐ Probenteilung **nach** vollständiger **Probenaufbereitung** durchführen, um zu verhindern, dass Biofilm, Flocken etc. das Verhalten des Mikroplastiks negativ beeinflussen. Spektroskopische Messmethoden erfordern eine homogene Partikelverteilung auf Messfiltern.
- ☐ **Keine** Techniken der Teilprobenahme aus der **Gelöststoffanalytik** anwenden. Entnahme einer Teilprobe mittels Pipette oder Abmessen im Messkolben sind bspw. nicht repräsentativ!
- ☐ **Geeignete Verfahren**: Aufteilung der Probe auf mehrere Analysefilter (Messaufwand steigt), Homogenisieren und Aliquotieren nach Wolff et al. 2021, angelehnt an DIN 228131.

Geeignete Methode wählen

- ☐ **Mikroskopische Analyse** von Mikroplastik ist **stark fehlerbehaftet** (Primpke et al. 2020). Manuelle Vorsortierung von Partikeln und Auswahl von qualitativ zu bestimmenden Partikeln in Umweltproben entspricht nicht dem Stand der Technik
- ☐ Sollen **Partikelanzahlen** pro Volumen erfasst werden: Alle in Tabelle 1 genannten **spektroskopischen** Verfahren sind geeignet.
- ☐ Sollen **Massen** pro Volumen erfasst werden: Alle in Tabelle 1 genannten **thermoanalytischen** Verfahren sind geeignet.

Hinweise für spektroskopische Verfahren

- ☐ **Material** des Analysefilters so wählen, dass es bei der Analyse **kein Spektrum erzeugt, das die Spektren der Kunststoffe überlagert**. Geeignete Filtermaterialien sind bspw. Silizium (Wolff et al. 2021), goldbeschichtetes PC (Schymanski et al. 2018) oder PTFE (Müller et al. 2019).
- ☐ Sind **zu viele Partikel** auf einem Analysefilter vorhanden, müssen die zu messenden Partikel durch ein **statistisch abgesichertes Auswahlverfahren** nach Anger et al. 2018, Brandt et al. 2021 oder Schwaferts et al. 2021 ausgewählt werden.
- ☐ **Automatische Partikelerkennung verwenden**, um Messzeit zu reduzieren. Partikelerkennungssoftware kann von Geräteherstellern oder als OpenSource, bspw. nach Anger et al. 2019 oder Brandt et al. 2020 bezogen werden. Ohne Partikelerkennung kann ggf. nur eine Teilfläche gemessen werden, was zu Hochrechnungsfehlern (aufgrund inhomogener Partikelverteilung auf dem Analysefilter) führen kann.

Messeinstellungen Raman-Spektroskopie

- ☐ Proben aus Wässern mit geringem Anteil natürlicher organischer Partikel mit einer **Wellenlänge** von 532 nm messen. Werden Fluoreszenz-Spektren erzeugt (bspw. durch unvollständig oxidierte natürliche Suspensa), 785 nm verwenden. Dadurch verringert sich v. a. bei kleinen Partikeln ggf. die Spektrenqualität.
- ☐ Hohe **Belichtungszeiten** reduzieren das Auftreten von Fluoreszenz (Photobleaching) und erhöhen Signalintensität und Signal-Rauschverhältnis. Pro Messpunkt (=Partikel) 1 – 10 s belichten.
- ☐ Mit zunehmender **Leistung** steigen das Signal-Rauschverhältnis und die Signalintensität, aber auch die Gefahr, den zu messenden Partikel zu beschädigen (Photolyse). Wellenlänge, Belichtungszeit und Laserleistung gemeinsam anpassen. Leistungen im Bereich 2 – 4 mW (532 nm) bzw. 6 – 9 mW (785 nm) verwenden.
- ☐ 20x-**Objektive** mit großem Arbeitsabstand und hoher numerischer Apertur verwenden (Anger 2020).
- ☐ Ein **spektraler Autofokus** verbessert die Spektrenqualität v. a., wenn Partikel unterschiedlicher Größe in einer Probe vorhanden sind.

Hinweise zur DSC-Analyse

- ☐ Für die zu bestimmenden Polymere müssen **Kalibriergeraden** erstellt werden. Zur Berechnung der Masse wird der Quotient aus Peakfläche des spezifischen Messsignals (gemessene Enthalpie) und der Steigung der Kalibriergerade des jeweiligen Polymers gebildet (siehe Bitter und Lackner 2021).
- ☐ Immer im **Temperaturbereich** der zu bestimmenden Polymere arbeiten (spezifische Schmelztemp. + ca. 40 °C) oder mögliche thermische Zersetzung anderer Bestandteile berücksichtigen (in der Regel: 0 – 250 °C).
- ☐ Probe zwei Mal aufheizen und Schmelzpeaks in der **zweiten Aufheizung** bestimmen.
- ☐ DSC-Signal in [mW] zur Massenbestimmung verwenden (nicht [mW/mg]!).
- ☐ Bei abfallender Basislinie mögliche **Korrekturmessungen** überprüfen.
- ☐ Bei Messung eines leeren Tiegels und starken **Schwankungen** im DSC-Signal, Sauberkeit des Ofens überprüfen.

4 Industrielle Mikroplastikemissionen verhindern

4.1 Übersicht Interventionsmaßnahmen für industrielle Mikroplastikemissionen

Bei der Reduktion industrieller Mikroplastikemissionen gilt grundlegend das Prinzip „**Vermeidung vor Reduktion vor technischer Abwasseraufbereitung**“:

1. Die effektivste vermeidende Maßnahme ist die **Sensibilisierung** der Mitarbeiter:innen.
2. **Produktionsinterne Reduktionsmaßnahmen** bedeuten i.d.R. Umbaumaßnahmen. Zielführend sind v.a. Überdachungen oder Einhausungen von Umschlagplätzen (z.B. Abfüllstationen, Be- und Entladezonen), um Verwehungen und Ausspülungen zu verhindern.
3. **Technische Aufbereitung** von Abwasser und/oder Regenwasser sind als End-of-Pipe-Lösung anzusehen, können jedoch die industriellen Mikroplastikemissionen über den Abwasserpfad reduzieren.

In drei Handlungsfeldern können Emissionen von Mikroplastik in Industriebetrieben verringert werden. Ausgehend von identifizierten Emissionsquellen, sind gezielte Umbauten im Produktionsprozess (z.B. Umfüllstationen oder Siebe) sinnvoll. Maßnahmen zur Optimierung des Abwasser- und Regenwassermanagements für einen verbesserten Mikroplastikrückhalt werden ebenfalls als effektiv erachtet, genau wie Aktivitäten zur Sensibilisierung von Mitarbeiter:innen für eine umweltbewusstere Arbeitsweise. In Abbildung 13 sind Expert:inneneinschätzungen zur Wirksamkeit von Industriellen Maßnahmen zum Rückhalt von Mikroplastikemissionen gezeigt.

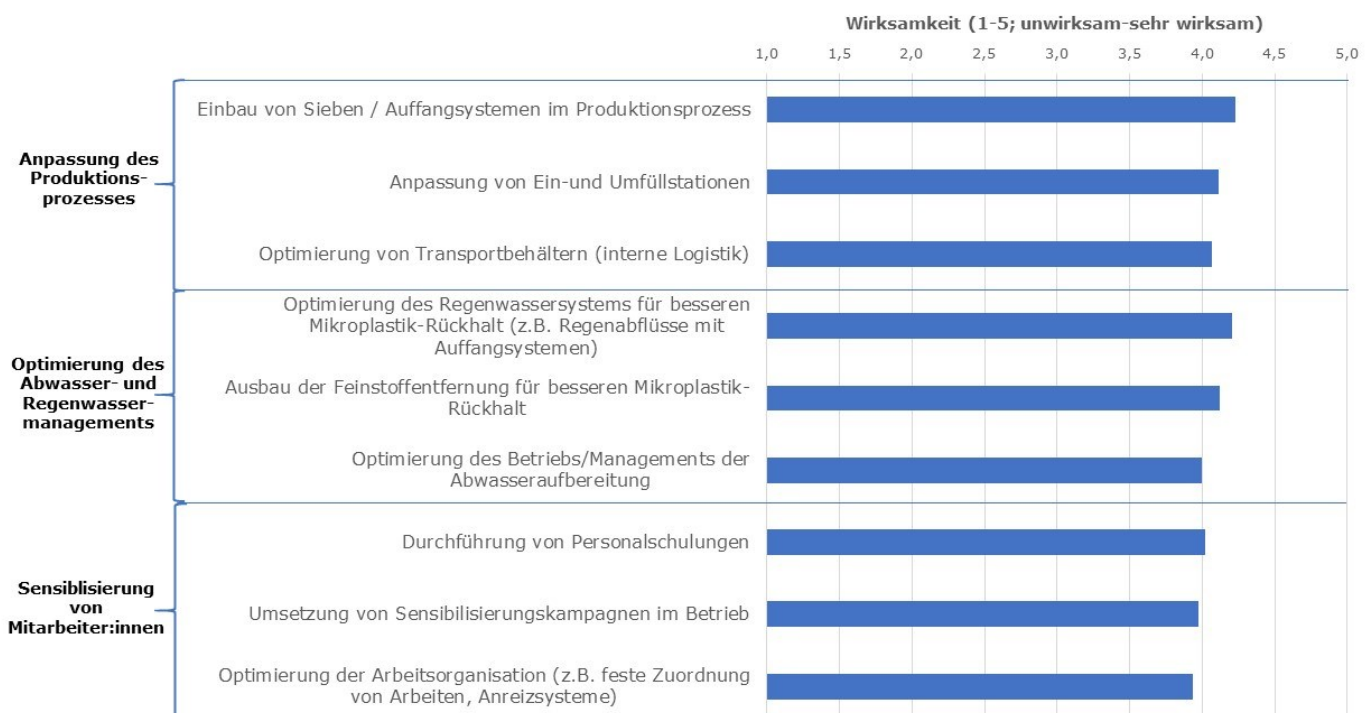


Abbildung 13: Expert:inneneinschätzung zur Wirksamkeit von Maßnahmen zum Mikroplastikrückhalt (n=44)

4.2 Empfehlungen zu produktionsnahen Maßnahmen und Mitarbeiterverhalten

Das grundlegende Prinzip „**Vermeidung** vor **Reduktion** vor **Abwasseraufbereitungsverfahren**“ gilt insbesondere für die Diskussion von produktionsnahen Maßnahmen.

Einbezug und Sensibilisierung von **Mitarbeiter:innen** ist einer der Hauptfaktoren für eine erfolgreiche Umsetzung von Maßnahmen zur Reduktion von Mikroplastikemissionen.

Eine grobe Ermittlung der Verluste/Mikroplastikmassen an den Hotspots ist meist mit einfachen Mitteln und wenig Mehraufwand möglich. **Konkrete Messungen** vor und nach Einführung von Maßnahmen schaffen Transparenz und verdeutlichen die Effektivität.

Viele Initiativen in der Kunststoffindustrie, wie z.B. [Operation clean Sweep](#), [Null Granulatverlust](#) oder [Alliance to end plastic waste](#) geben sinnvolle Hinweise, Informationsmaterial und Maßnahmenkataloge zur Vermeidung und Verminderung von Mikroplastikemissionen in die Umwelt. In *Plastics Europe 2018* sind beispielsweise anwendungsnahe Best Practice Beispiele zur Vermeidung von Pelletverlusten bei Produktion, Verladung und Transport sowie zur Wartung von Siebeinsätzen und Filtrationseinheiten in der Produktion aufgeführt. Zusätzlich ist die Bewertung der Effektivität dieser Maßnahmen wichtig. Dies kann meist mit einfachen Mitteln umgesetzt werden und benötigt nicht immer eine teure Mikroplastikanalyse.

Generell sind die Erarbeitung von Havariekonzepten, regelmäßige Reinigungen von Betriebsflächen und Schulung von Mitarbeiter:innen sinnvoll. Um ein Konzept zur Reduktion und Vermeidung von Mikroplastikeintrag in die Umwelt effektiv zu gestalten, sollten gezielt Maßnahmen ergriffen und überprüft werden. Um diese zu erkennen, sollten zuerst folgende Fragen gestellt werden:

1. Wo sind Mikroplastik Hotspots und **Quellen**? (Siehe Kapitel 3.2)
2. Ist eine **Vermeidung** möglich?
3. Welche **Maßnahmen** zur Verminderung des Mikroplastikeintrags in die Umwelt sind möglich?
4. Kann ich den Mikroplastikaustrag **messen**/quantifizieren und so die Maßnahmen **bewerten**?
5. Wie können die **Mitarbeiter:innen** konkret einbezogen und sensibilisiert werden?

Zur Verdeutlichung dieser Leitfragen sind im folgenden verschiedene Fallbeispiele aufgeführt:

Fallbeispiel 1:

Auf dem Gelände eines weiterverarbeitenden Betriebes wurde bei einer Betriebsbegehung das Regenwasser als Haupteintragsquelle von Mikroplastik in die Umwelt identifiziert. Einer der Hotspots sind hier Abfüllhilfen für Sackware in Containerform. Diese können aus Platzmangel nur im Freien gelagert werden, eine Vermeidung durch Änderung des Lagerortes ist ausgeschlossen. Als Maßnahme zur Verminderung der Mikroplastikemissionen wurde eine zusätzliche Reinigung des benutzten Containers mit einer Absaugung eingeführt, bevor dieser im Freien gelagert wird. Der Erfolg dieser Maßnahme wurde mit einfachen Mitteln gravimetrisch bestimmt, indem die Rückstände aus den Containern gespült, filtriert und dann gewogen wurden (siehe Abbildung 14). Der potentielle Mikroplastikaustrag an diesem Hotspot konnte durch diese Maßnahme um durchschnittlich 99 % reduziert werden. Die teils starken Schwankungen in der ermittelten Partikelmasse vor oder nach Einführung der Maßnahme sind größtenteils auf das Mitarbeiter:innenverhalten zurückzuführen. Die besonders gründliche Leerung der Absackhilfe sowie der später eingeführte, zusätzliche Arbeitsschritt

können nur funktionieren, wenn die beteiligten Fachkräfte die Notwendigkeit verstehen und akzeptieren. Hierzu wurden in diesem Beispiel die Schichtleitung mit einbezogen, in der Kantine wurde ein Aufklärungsfilm zum Thema Mikroplastik mit den Messergebnissen der Maßnahme gezeigt und ein prämierter Ideenwettbewerb zu weiteren Maßnahmen unter den Mitarbeitern ausgerufen.

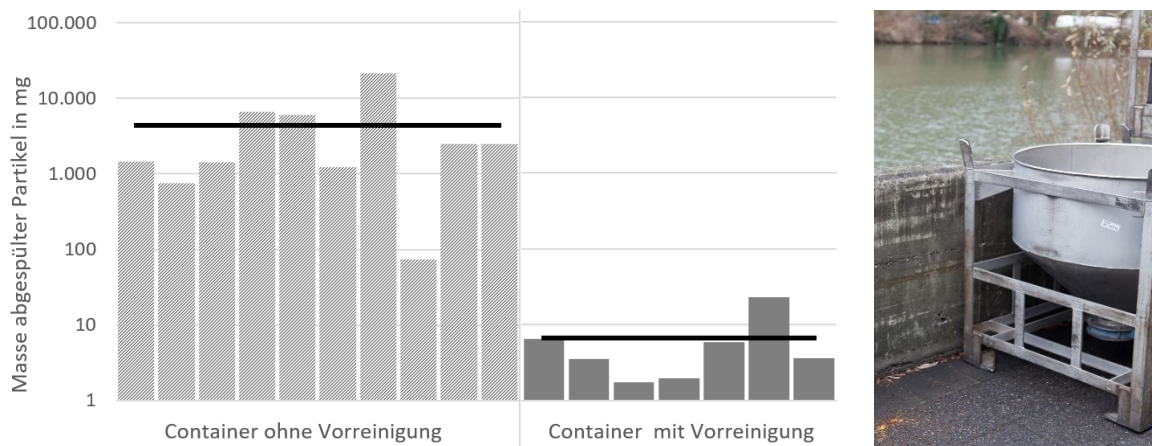


Abbildung 14: Fallbeispiel Container zur Befüllung von Sackware. Die Masse der Pelletreste in den Absackhilfen wurden vor und nach Implementierung einer Maßnahme ermittelt (Barkmann und Engelhart 2020).

Fallbeispiel 2:

Auf dem Gelände eines Betriebes wurde nach einer Betriebsbegehung ebenfalls das Regenwasser als Haupteintragsquelle identifiziert. Als einer der Hotspots wurde hier der Abrollcontainer für die Abfallsammlung aus der Produktion erkannt. Dieser schien vor allem durch das Kippen bei der Aufladung der vollen Mulde durch den zuständigen Versorgungsbetrieb Kleinteile zu verlieren. Dies konnte auf einfache Weise vermieden werden, indem der Abrollcontainer durch ein neueres Modell mit innenliegender Schutzplane ausgetauscht wurde (siehe Abbildung 15). Der Erfolg dieser Investition ist leicht durch das Kehren und Wiegen des Kehrriechts am Stellplatz des alten und neuen Containers nach Aufladung zu quantifizieren.



Abbildung 15: Hofffläche an Abrollcontainer bei der Leerung vor und nach Erneuerung der Mulde

Fallbeispiel 3:

In einem Logistikunternehmen kommt es bei auf Paletten gestapelter Sackware häufiger zu aufgerissenen Säcken und Granulataustritt. Dies liegt teilweise an nicht akkurat gestapelter Ware, sodass beim dichten Aneinanderreihen der Paletten die überstehenden Säcke leicht aufreißen können. Dies sorgt in dem Logistikunternehmen für Zeitverzögerungen im Ablauf durch die zusätzliche Beseitigung der Granulate, bei Kunden für Unzufriedenheit durch beschädigte Ware und bei dem

Verkäufer für geringere Gewinne. Zur Vermeidung dieser für alle beteiligten schlechten Situation kann die Ware, wenn möglich, in eine andere Verpackungsform, wie z.B. „Oktabins“ oder „Big Bags“ vom Hersteller abgefüllt werden. Wenn dies nicht möglich ist, hat sich eine Pappverkleidung oder Pappwanne als Stapelhilfe und Ausreißschutz für Sackware bewährt (siehe Abbildung 16). Das betroffene Logistikunternehmen empfiehlt allen Kunden aktiv diese Verpackungsform der Ware und kann so die Havariefälle im Lager deutlich reduzieren. Der Erfolg der aktiven Ansprache der Kunden kann direkt durch die verringerten Stückzahlen von beschädigter Sackware und Zunahme an mit Pappschutz ausgestatteten Paletten gemessen werden.



Abbildung 16: Beschädigung an Sackware (links) wird durch entsprechende Verpackungen (rechts) vermieden

4.3 Empfehlungen zum Regenwassermanagement

Möglichkeiten der **Vermeidung, Verminderung und Rückhalt** von Partikeln auf abflusswirksamen Flächen und somit in Regenwasser sind zuerst zu betrachten. Es gibt **niederschwellige, dezentrale Rückhaltesysteme**, die jedoch regelmäßig gereinigt werden müssen. Die aufwändigste Möglichkeit zur Reduzierung von Mikroplastik in Regenwasser ist eine eigene **zentrale Behandlung** oder die gemeinsame Behandlung mit anfallendem Abwasser.

Auf Betriebsgeländen von kunststoffherstellenden und -verarbeitenden Betrieben kann es durch Prozessabläufe oder Verschleppungen zu Mikroplastikaustrag auf Freiflächen kommen (siehe Kapitel 2.2). Ebenso kann Mikroplastik auf Verkehrsflächen durch z.B. Abrieb von Reifen erst entstehen. Besonders auf befestigten Verkehrs- und Lagerflächen besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass Partikel bei Niederschlag abgespült werden und in die Kanalisation gelangen.

Der erste Ansatzpunkt sollte die **Vermeidung** und **Verminderung** von Austrag durch z.B. Havariekonzepte, Mitarbeiter:innenschulungen, Überdachungen und Absaugeinrichtungen sein (siehe Kapitel 4.2). Die regelmäßige Reinigung von Flächen reduziert dabei nicht nur Produktionsverluste, sondern auch Verschleppungen und Reifenabrieb. Großes Mikroplastik kann auf glatten Oberflächen mit mechanischen Kehreinrichtungen noch fast vollständig aufgenommen werden. Je kleiner die Mikroplastikpartikel sind, desto größer sind hierbei die Verluste, welche auf der Fläche zurückbleiben. Bei Spänen, Stäuben und anderen kleinen Partikeln wird eine Saugreinigung empfohlen. Gewachsener Boden oder strukturreiche Böden wie z.B. Pflaster lassen sich erfahrungsgemäß schlechter reinigen,

allerdings werden Partikel auch schlecht abgespült. Dies kann zu einem Rückhalt von Mikroplastik, aber auch zu einer Anreicherung auf der Fläche führen. Deshalb werden nach Möglichkeit gut zu reinigende, glatte Oberflächen empfohlen.

Regenwasser kann gegebenenfalls über eine Mischkanalisation der Abwasserbehandlung zugeführt werden oder separat **zentral** behandelt werden (geeignete Verfahren siehe Kapitel 4.4). Ebenfalls kann eine **dezentrale** Behandlung des Regenwassers durch z.B. in situ Siebeinsätze erfolgen. Diese niederschwelligen **Rückhaltesysteme** sind in der Anschaffung und Installation wesentlich günstiger und praktikabler als neue zentrale Behandlungsanlagen, allerdings ist auch hier eine regelmäßige Wartung der Siebeinsätze und somit eine Akzeptanz der Mitarbeiter:innen für eine erfolgreiche Umsetzung entscheidend. Generell ist Mikroplastik Teil der partikulären Fraktion, sodass alle Berechnungen und Maßnahmen in DWA-A 102-2 zur Bewertung und Reduktion von AFS63 auch auf Mikroplastikpartikel ($d > 63 \mu\text{m}$) angewendet werden können. Eine Herausforderung stellt bei der Verwendung dieser Systeme immer die Reinigung/ Regeneration oder sachgerechte Entsorgung der mit Mikroplastikpartikeln beladenen Substrate und Filtermaterialien dar. Eine unvollständige Liste zu Rückhaltesystemen für Partikel in Regenwasser ist Tabelle 2 zu entnehmen. Nach der Vermeidung, der Verminderung und dem Rückhalt von Emissionen von abflusswirksamen Flächen kann an individuellen Standorten eine Anpassung des **Regenwassermanagements** zu einem verminderten Mikroplastikeintrag in die Umwelt führen.

Zum Rückhalt von **Reifenabrieb** sind besonders dezentrale Ansätze geeignet. Diese wurden unter anderem in einem gesonderten Projekt [RAU](#) in der BMBF-Initiative „Plastik in der Umwelt“ untersucht. Für weitere Informationen zu Reifenabrieb und Regenwasserbehandlungen werden die Veröffentlichungen dieses Partnerprojektes empfohlen.

Maßnahmen	Wirkungsgrade Stoffrückhalt		Quelle
	η_{AFS} in %	$\eta_{AFS < 63 \mu\text{m}}$ in %	
Retentionsbodenfilter	95	95	(RISA 2015)
Mulde	99	99	(RISA 2015)
Versickerungsrinne mit Substrat	95	60 - 70	(Sommer 2021)
Schacht mit Wirbelabscheider und Filter	95		
Schacht mit Filter	95		
Sedimentationsstrecke	88		
Straßenablauf mit Filter und Sedimentation	70	55	(Sommer 2021)

Tabelle 2: Wirkungsgrade zum Stoffrückhalt technischer Maßnahmen in der Niederschlagswasserbehandlung (mod. nach Sommer 2021)

4.4 Empfehlungen Abwasseraufbereitungsverfahren

4.4.1 Überblick zu möglichen Aufbereitungsverfahren

Es gibt in der Abwasseraufbereitung etablierte Verfahren **zur Abtrennung von Partikeln**. Diese sind aber nicht uneingeschränkt geeignet für die Entfernung von Mikroplastik, weil Mikroplastik auch in Form feinsten Partikel vorliegen kann und der Dichteunterschied zwischen Kunststoffen und Wasser oft sehr gering ist. Durch **chemisch-physikalische Flockung** können Mikroplastikpartikel aggregiert werden, was deren Entfernung erleichtert.

Zur Entfernung von Mikroplastikpartikeln sind verschiedene Aufbereitungsverfahren zur Abtrennung von partikulären Stoffen geeignet. Dies sind einerseits Verfahren zur Partikelabscheidung über Dichte (Sedimentation und Flotation) und andererseits Filtrationsverfahren, wozu im erweiterten Sinne auch die Membrantechnik zählt (siehe Abbildung 17).

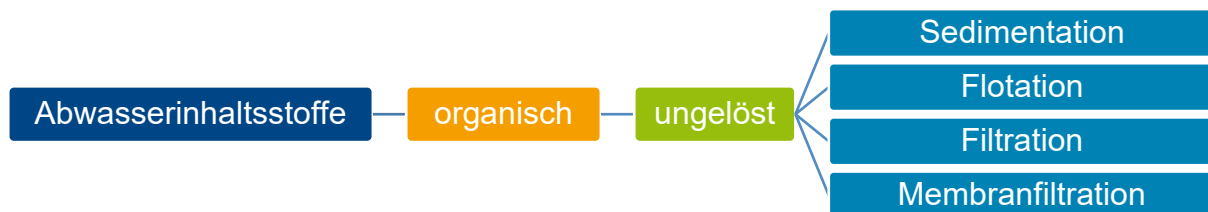


Abbildung 17: Übersicht möglicher Verfahren zur Entfernung von Mikroplastik, gruppiert in Trennoperationen

Diese Verfahren sind aber nicht uneingeschränkt zur Entfernung von Mikroplastik einsetzbar. Per Definition liegt Mikroplastik (auch) in Form kleinster Partikel bis 1 µm Durchmesser vor. Diese untere Grenze macht die Entfernung aufwändig: Kleine Partikel lassen sich, wenn überhaupt, nur langsam sedimentieren. Zudem ist die Dichte von Kunststoffen häufig etwas niedriger, als die von Wasser. Eine Flotation der leichten Partikel ist einfacher, allerdings wirkt auch hier die geringe Größe der Partikel erschwerend. Bei der Wahl eines entsprechend feinen Filtermaterials können auch sehr kleine Partikel entfernt werden, allerdings muss das Wasser dann mit entsprechend hohem Druck durch den Filter gepresst werden, wodurch der Energieverbrauch des Reinigungssystems steigt. Für den weitestgehenden Rückhalt von Mikroplastik müssen aufgrund der Partikelgröße mindestens Mikrofiltrationsmembranen, besser Ultrafiltrationsmembranen zum Einsatz kommen (siehe Abbildung 18).

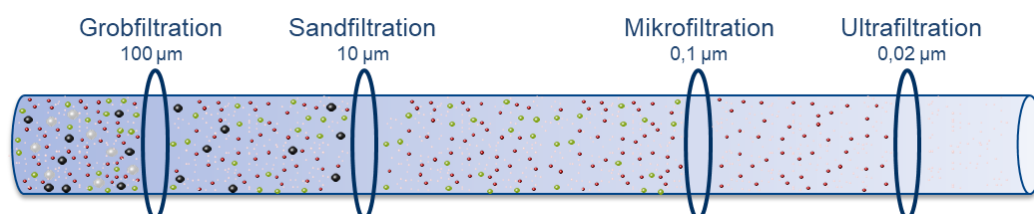


Abbildung 18: Trenngrößen von Filtrationstechniken (Quelle: EnviroChemie GmbH)

Durch eine chemisch-physikalische Flockung können kleine Mikroplastikpartikel zu größeren Flockenverbünden aggregiert werden. Dies ermöglicht eine effiziente Entfernung mittels Sedimentation, Flotation oder größeren Filtersystemen und reduziert gleichzeitig gelöste Stoffe im Abwasser. Je nach Kunststoffsorte und Abwasservolumenstrom kann ein optimales Abwasseraufbereitungsverfahren ausgewählt werden.

4.4.2 Auswahl von Aufbereitungsverfahren

Bei der Auswahl eines geeigneten Aufbereitungsverfahrens für industrielle Abwässer spielen diverse Faktoren eine Rolle: Neben den **Eigenschaften** des zu entfernenden Kunststoffes, wie der Kunststoffsorte, Größe und Konzentration der Mikroplastikpartikel im Wasser muss z.B. auch berücksichtigt werden, ob weitere **Abwasserinhaltsstoffe** (z.B. gelöste Stoffe) entfernt werden sollen. Auch die anfallende **Abwassermenge** und die Verfügbarkeit von qualifiziertem **Fachpersonal** für den Betrieb der Abwasseraufbereitung sollte bei der Auswahl eines geeigneten Verfahrens berücksichtigt werden.

Wenn neben technischen, auch **betrieblische und ökonomische Aspekte** bei der Verfahrensauswahl berücksichtigt werden, sind besonders ausgewogene Verfahren wie **Flotation** oder **Sedimentation** mit Flockungsmittelzugabe oder Mehrschichtfilter empfehlenswert. Für maximalen Mikroplastikrückhalt eignen sich **Membranverfahren**, aber auch die Verfügbarkeit von **Platz** auf dem Betriebsgelände kann ein wichtiges Auswahlkriterium für diese Technologie sein.

Als Orientierung für die Auswahl eines passenden Verfahrens zur industriellen Abwasseraufbereitung wurden sieben mögliche Technologien auf entscheidungsrelevante Kriterien hin verglichen: Ein (1) Mehrschichtfilter, (2) keramische (cross-flow) und (3) organische (getauchte) Ultrafiltrationsmembranen, Kombinationen aus Flockungsmitteln mit (4) Bandfiltration, (5) Flotation und (6) Absetzbecken sowie (7) Schrägklärer und Tuchfilter als Nachbehandlungsstufe.

Die Erhebung basiert auf experimentellen Daten, Praxisbeispielen und Expert:innenwissen und berücksichtigt ökonomische (Investitionen, Betriebskosten), ökologische (Entfernungsleistung Mikroplastik und gelöste Stoffe sowie Ressourcenverbrauch) und betriebliche (Betriebsaufwand, Platzbedarf und Autarkie der Systeme) Aspekte. Durch Stakeholder-Befragungen von Vertreter:innen der Kunststoffindustrie (n=25), planenden Ingenieur:innen (n=18) und Wissenschaftler:innen (n=11) nach der Relevanz dieser Bewertungskriterien, konnte ermittelt werden, dass Kosten und Entfernungsleistung der Verfahren die größte Rolle für den Entscheidungsprozess spielen (siehe Abbildung 19).

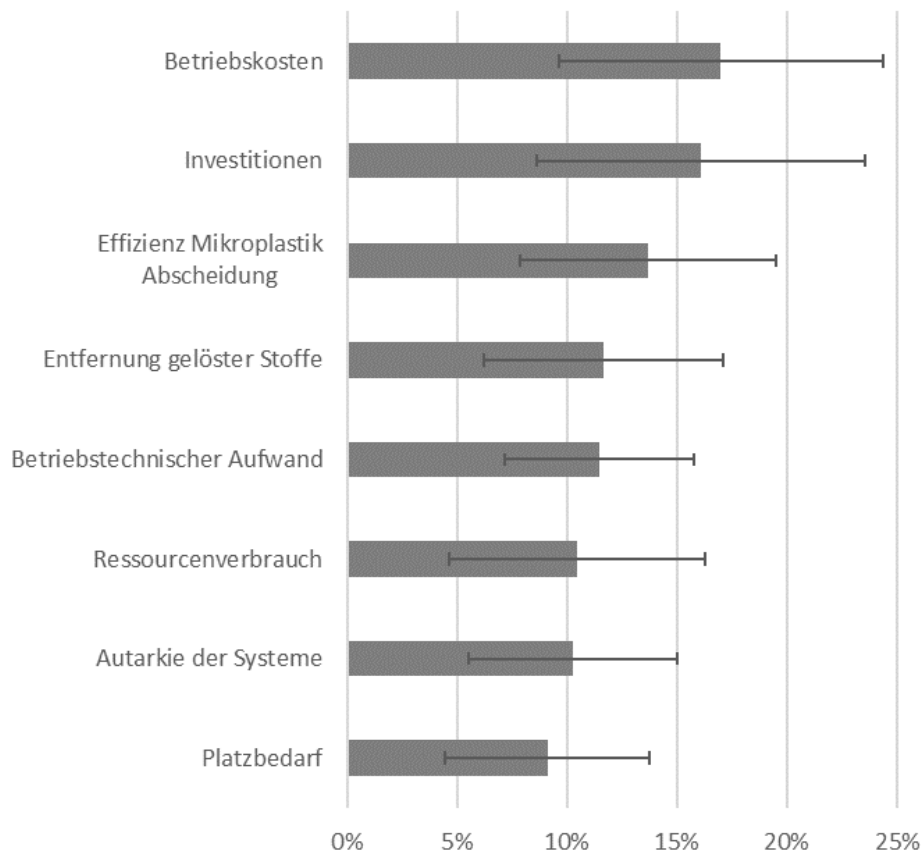


Abbildung 19: Standardisierte Relevanz der Bewertungskriterien nach Stakeholder-Befragung (n=54) inkl. Standardabw.

Mit Hilfe der Nutzwertanalyse wurden die Leistungsdaten (Bewertung der Kriterien) der einzelnen Verfahren für einen typischen Referenzfall¹ mit der ermittelten Relevanz der Kriterien kombiniert und analysiert.

In Abbildung 20 sind die entscheidungsrelevanten Aspekte mit Hilfe einer Nutzwertanalyse zusammenfassend dargestellt. Die dargestellte Analyse soll eine erste Orientierung für Neu- und Ausbau von Abwassertechnik in der kunststoffproduzierenden und -verarbeitenden Industrie bieten, muss aber im weiteren Verlauf von einer Einzelfallprüfung flankiert werden. Die fallbezogene Auswahl eines Aufbereitungsverfahrens würde unter anderem die spezifischen Abwasserströme (Volumenströme, Schwankungen, Temperatur), Abwasserinhaltsstoffe (Kunststoffsorten und Partikelgrößen sowie andere Abwasserinhaltsstoffe wie Feststoffe, Tenside, etc.) sowie die Verfügbarkeit von Energieversorgung, Platz und qualifiziertem Personal berücksichtigen.

¹ Angenommener Referenzfalls mit industriellem Abwasserstrom von 100 m³ pro Tag mit 1.000 mg Feststoffgehalt (TSS) und 1.000 mg CSB pro Liter.

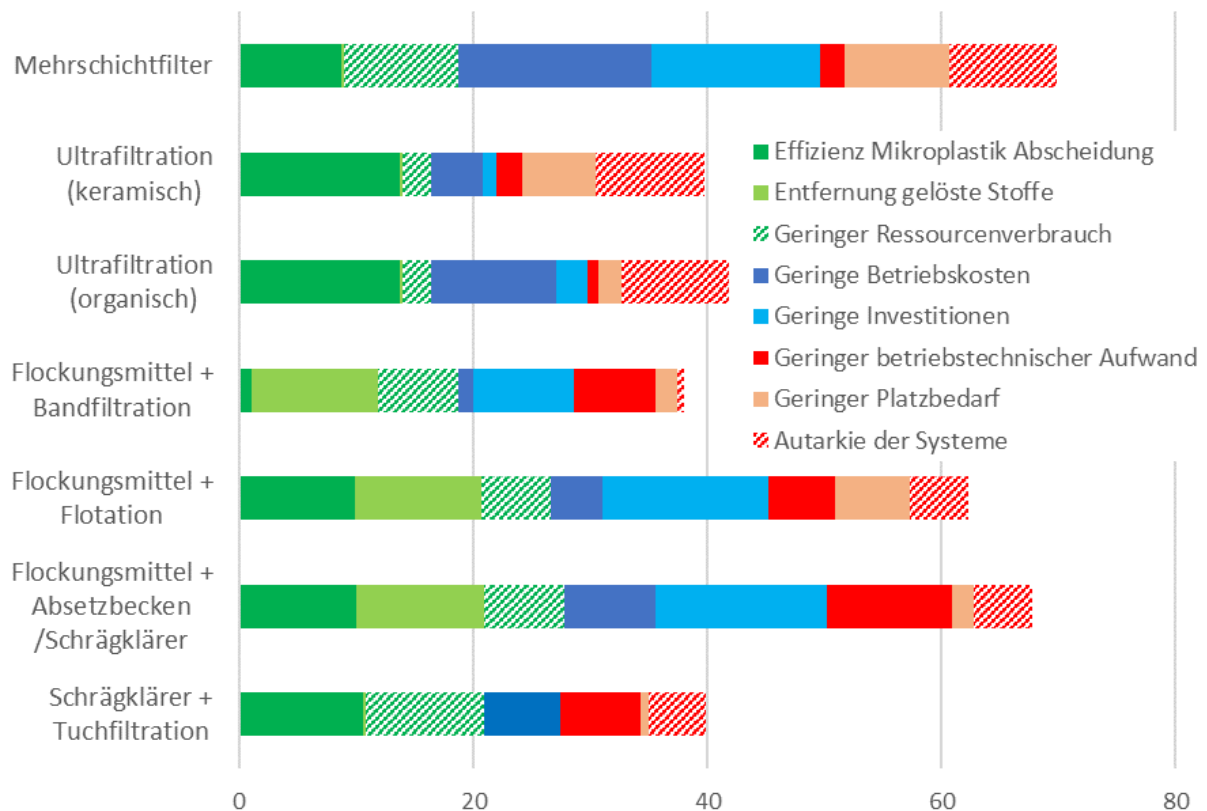


Abbildung 20: Nutzwertanalyse für Verfahren der industriellen Abwasseraufbereitung (Raber und Yildiz 2021)

Unter Berücksichtigung aller Bewertungen und Stakeholder-Präferenzen stellt sich der Mehrschichtfilter, insbesondere aus Kostengründen, als besonders attraktiv (hoher Nutzwert) dar. Flockungsmittel mit Flotation oder Sedimentation zeichnen sich durch ein ausgewogenes Verhältnis von Effizienz, Entfernung anderer Abwasserinhaltsstoffe, Kosten und Betriebsaufwand aus.

Wird eine besonders **hohe Abscheideleistung für Mikroplastik** im Abwasser benötigt, sind die Ultrafiltrationsmembranen mit bis zu 100 % Rückhalt von $> 0,05 \mu\text{m}$ großen Partikeln besonders geeignet, gefolgt von einer Kombination aus Schräglärer und Tuchfilter mit etwa 99 % Rückhalt von $> 1 \mu\text{m}$ großen Partikeln. Müssen **zusätzlich gelöste Stoffe aus dem Abwasser entfernt** werden, sind Verfahren mit Fällungs- und Flockungsmitteln vergleichsweise wirksam. Für einen **geringen Ressourcenverbrauch** (Energie- und Chemikalienbedarf) haben Mehrschichtfilter und die Kombination aus Schräglärer und Tuchfilter Vorteile gegenüber den anderen Verfahren.

In der **ökonomischen Betrachtung** benötigen die Membranverfahren die höchsten Investitionen (2-3 mal teurer als die anderen Verfahren). Verfahren mit Flockungsmitteln sind in der Investition günstiger, bringen aber mit den Kosten für Flockungsmittel hohe Betriebskosten (doppelt so hoch wie Mehrschichtfilter) mit sich. Bei der rein ökonomischen Betrachtung liegen Mehrschichtfilter vorne. Die **Betriebssicherheit** ist bei allen Systemen hoch, jedoch ist der Aufwand und **Zusatzbedarf an Know-How** für den Industriebetrieb beim Einsatz von Flockungsmitteln mit Absetzbecken besonders gering. Auch Bandfiltration, Flotation und der Schräglärer sowie Tuchfilter schneiden hinsichtlich des betrieblichen Aufwands gut ab.

Für Abwasserströme abweichend vom betrachteten Referenzfall gibt es Einschränkungen der Einsatzfähigkeit. So ist z.B. bei hohen Stofffrachten (TSS) die Leistungsfähigkeit von Mehrschichtfiltern und Membranen eingeschränkt. Zudem sind Membranverfahren für große Partikel ($> 5 \text{ mm}$) nicht zu empfehlen. Bandfilter sind dahingegen für geringe Frachten ($< 100 \text{ mg TSS/l}$) ungeeignet. Sind im Abwasser Tenside enthalten, muss die Einsatzfähigkeit der Verfahren auch in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur gesondert geprüft werden. Ergänzend ist anzumerken, dass Absetzbecken (Sedimentation) ohne vorgeschaltete Fällung und Flockung nur bei relativ großen Partikeln mit einer Dichte größer 1 kg/m^3 einsetzbar sind und Bandfilter mit hohen Volumenströmen ($> 1.000 \text{ m}^3/\text{d}$) Probleme haben. Bei großen Volumenströmen ist auch der hohe Platzbedarf, insbesondere von Sedimentationsbecken, als möglicher limitierender Faktor zu berücksichtigen.

5 Literaturverzeichnis

- Absher, Theresinha Monteiro; Ferreira, Silvio Luiz; Kern, Yargos; Ferreira, Augusto Luiz; Christo, Susete Wambier; Ando, Rômulo Augusto (2019): Incidence and identification of microfibers in ocean waters in Admiralty Bay, Antarctica. In: *Environmental science and pollution research international* 26 (1), S. 292–298. DOI: 10.1007/s11356-018-3509-6.
- Anger, Philipp (2020): Strategien zur Analyse von Mikroplastik mittels RAMAN-Mikrospektroskopie. Dissertation. Technische Universität München, München. Fakultät für Chemie, Institut für Wasserchemie und Chemische Balneologie, Lehrstuhl für Analytische Chemie und Wasserchemie. Online verfügbar unter <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1531347>, zuletzt geprüft am 31.03.2021.
- Anger, Philipp M.; Esch, Elisabeth von der; Baumann, Thomas; Elsner, Martin; Niessner, Reinhard; Ivleva, Natalia P. (2018): Raman microspectroscopy as a tool for microplastic particle analysis. In: *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 109, S. 214–226. DOI: 10.1016/j.trac.2018.10.010.
- Anger, Philipp M.; Prechtel, Leonhard; Elsner, Martin; Niessner, Reinhard; Ivleva, Natalia P. (2019): Implementation of an open source algorithm for particle recognition and morphological characterisation for microplastic analysis by means of Raman microspectroscopy. In: *Anal. Methods* 11 (27), S. 3483–3489. DOI: 10.1039/C9AY01245A.
- Barkmann, Luisa; Engelhart, Markus (2020): Industrielle Eintragspfade von Mikroplastik - Zwischenbilanz des Projektes EmiStop. In: *Mikroplastik - Herausforderungen und Perspektiven in der Abwasser- und Abfallbehandlung*. Darmstadt: Institut IWAR, TU Darmstadt (Schriftenreihe IWAR, 257), S. 46–53.
- Bertling, J.; Bannick, C. G.; Brinkmann, L.; Barkmann, L.; Braun, U.; Knoblauch, D. et al. (2021): Kunststoff in der Umwelt – ein Kompendium. Online verfügbar unter https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-03/Kompendium_Kunststoff-in-der-Umwelt_26Mar2021.pdf.
- Bertling, Jürgen; Hamann, Leandra; Bertling, Ralf (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie. Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT. Oberhausen.
- Bitter, Hajo; Lackner, Susanne (2021): Fast and easy quantification of semi-crystalline microplastics in exemplary environmental matrices by differential scanning calorimetry (DSC). In: *Chemical Engineering Journal*, S. 129941. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129941.
- Boucher, Juilien; Billard, Guillaume; Simeone, Eleonora; Sousa, Joao (2020): The marine plastic footprint: IUCN, International Union for Conservation of Nature.
- Brander, Susanne M.; Renick, Violet C.; Foley, Melissa M.; Steele, Clare; Woo, Mary; Lusher, Amy et al. (2020): Sampling and Quality Assurance and Quality Control: A Guide for Scientists Investigating the Occurrence of Microplastics Across Matrices. In: *Applied spectroscopy* 74 (9), S. 1099–1125. DOI: 10.1177/0003702820945713.

- Brandt, Josef; Bittrich, Lars; Fischer, Franziska; Kanaki, Elisavet; Tagg, Alexander; Lenz, Robin et al. (2020): High-Throughput Analyses of Microplastic Samples Using Fourier Transform Infrared and Raman Spectrometry. In: *Applied spectroscopy* 74 (9), S. 1185–1197. DOI: 10.1177/0003702820932926.
- Brandt, Josef; Fischer, Franziska; Kanaki, Elisavet; Enders, Kristina; Labrenz, Matthias; Fischer, Dieter (2021): Assessment of Subsampling Strategies in Microspectroscopy of Environmental Microplastic Samples. In: *Front. Environ. Sci.* 8. DOI: 10.3389/fenvs.2020.579676.
- Braun, Ulrike; Stein, Ulf; Schmitt, Hannes; Altmann, Korinna; Claus Gerhard, Bannick; Roland, Becker et al. (2020): Statuspapier im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Plastik in der Umwelt. Mikroplastik-Analytik Probenahme, Probenaufbereitung und Detektionsverfahren. Online verfügbar unter https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2020-11/Statuspapier_Mikroplastik%20Analytik_Plastik%20in%20der%20Umwelt_2020.pdf.
- Cowger, Win; Booth, Andy M.; Hamilton, Bonnie M.; Thaysen, Clara; Pimpke, Sebastian; Munno, Keenan et al. (2020): Reporting Guidelines to Increase the Reproducibility and Comparability of Research on Microplastics. In: *Applied spectroscopy*, 3702820930292. DOI: 10.1177/0003702820930292.
- DIN 38402-11, Februar 2009: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Allgemeine Angaben (Gruppe A) - Teil 11: Probenahme von Abwasser (A 11).
- Dris, Rachid; Gasperi, Johnny; Rocher, Vincent; Saad, Mohamed; Renault, Nicolas; Tassin, Bruno (2015): Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris. Hg. v. CSIRO Publishing Environmental Chemistry (10.1071/EN14167, hal-01134553). Online verfügbar unter <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01134553/file/dris2015.pdf>.
- Esch, Elisabeth von der; Lanzinger, Maria; Kohles, Alexander J.; Schwaferts, Christian; Weisser, Jana; Hofmann, Thomas et al. (2020): Simple Generation of Suspensible Secondary Microplastic Reference Particles via Ultrasound Treatment. In: *Frontiers in chemistry* 8, S. 169. DOI: 10.3389/fchem.2020.00169.
- Essel, Roland; Engel, Linda; Carus, Michael; Ahrens, Ralph Heinrich (2015): Quellen für Mikroplastik mit Relevanz für den Meeresschutz in Deutschland. Hg. v. Umwelt Bundesamt. nova-Institut GmbH (Texte, 63/2015). Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/quellen-fuer-mikroplastik-relevanz-fuer-den>, zuletzt geprüft am 01.12.2015.
- González-Pleiter, Miguel; Velázquez, David; Edo, Carlos; Carretero, Olga; Gago, Jesús; Barón-Sola, Ángel et al. (2020): Fibers spreading worldwide: Microplastics and other anthropogenic litter in an Arctic freshwater lake. In: *The Science of the total environment* 722, S. 137904. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137904.
- DWA-A 102-2, 2020: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen.
- Horton, Alice A.; Cross, Richard K.; Read, Daniel S.; Jürgens, Monika D.; Ball, Hollie L.; Svendsen, Claus et al. (2021): Semi-automated analysis of microplastics in complex wastewater samples. In:

- Environmental pollution* (Barking, Essex : 1987) 268 (Pt A), S. 115841. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115841.
- Jekel, Martin; Dittmar, Stefan; Ruhl, Aki Sebastian; Anger, Philipp; Bannick, Claus Gerhard; Barthel, Anne-Kathrin et al. (2020): Mikroplastik im Wasserkreislauf: Probenahme, Probenaufbereitung, Analytik, Vorkommen und Bewertung (MiWa). Abschlussbericht.
- DIN CEN ISO/TR 21960, 2021: Kunststoffe in der Umwelt – Aktueller Wissensstand und Methodik (ISO/TR 21960:2020).
- Law, Kara Lavender (2017): Plastics in the Marine Environment. In: *Annual review of marine science* 9, S. 205–229. DOI: 10.1146/annurev-marine-010816-060409.
- Löder, Martin G. J.; Imhof, Hannes Klaus; Ladehoff, Maike; Löschel, Lena A.; Lorenz, Claudia; Mintenig, Svenja et al. (2017): Enzymatic purification of microplastics in environmental samples. In: *Environmental science & technology*. DOI: 10.1021/acs.est.7b03055.
- Marco Pittroff; Yanina K. Müller; Cordula S. Witzig; Marco Scheurer; Florian R. Storck; Nicole Zumbülte (2021): Microplastic analysis in drinking water based on fractionated filtration sampling and Raman microspectroscopy. In: *Environmental Science and Pollution Research*. DOI: 10.1007/s11356-021-12467-y.
- Müller, Yanina K.; Wernicke, Theo; Pittroff, Marco; Witzig, Cordula S.; Storck, Florian R.; Klinger, Josef; Zumbülte, Nicole (2019): Microplastic analysis-are we measuring the same? Results on the first global comparative study for microplastic analysis in a water sample. In: *Analytical and bioanalytical chemistry*. DOI: 10.1007/s00216-019-02311-1.
- Peano, Laura; Kounina, Anna; Magaud, Violaine; Chalumeau, Sophie; Zgola, Melissa; Boucher, Julien (2020): Plastic Leak Project. Methodological Guidelines. Hg. v. Quantis und EA.
- Plastics Europe (2018): PlasticsEurope Operation Clean Sweep. Report 2018. Online verfügbar unter http://www.opcleansweep.eu/wp-content/uploads/2019/03/OCS_A4_Report_2018_ONLINE.pdf.
- Primpke, Sebastian; Christiansen, Silke H.; Cowger, Win; Frond, Hannah de; Deshpande, Ashok; Fischer, Marten et al. (2020): EXPRESS: Critical Assessment of Analytical Methods for the Harmonized and Cost Efficient Analysis of Microplastics. In: *Applied spectroscopy*, 3702820921465. DOI: 10.1177/0003702820921465.
- Raber, Wolf; Yildiz, Özgür (2021): Was tun gegen Mikroplastik im Abwasser? Experten fordern Maßnahmenmix zur Vermeidung des Mikroplastikeintrags durch industrielle Abwässer. In: *CHEManager* (9). Online verfügbar unter <https://www.chemanager-online.com/news/was-tun-gegen-mikroplastik-im-abwasser>.
- RISA (2015): RISA Strukturplan Regenwasser 2030. Ergebnisbericht des Projektes RISA – RegenInfraStrukturAnpassung. Hg. v. Hamburger Stadtentwässerung AÖR (HSE) und Behörde für Umwelt und Energie (BUE).
- Schwaferts, Christian; Schwaferts, Patrick; Esch, Elisabeth von der; Elsner, Martin; Ivleva, Natalia P. (2021): Which particles to select, and if yes, how many? : Subsampling methods for Raman microspectroscopic analysis of very small microplastic. In: *Analytical and bioanalytical chemistry*. DOI: 10.1007/s00216-021-03326-3.

- Schymanski, Darena; Goldbeck, Christophe; Humpf, Hans-Ulrich; Fürst, Peter (2018): Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy. Release of plastic particles from different packaging into mineral water. In: *Water research* 129 (2), S. 154–162. DOI: 10.1016/j.watres.2017.11.011.
- Sommer, Harald (2021): Stoffstrommodellierung von Reifenabrieb. Webinar #1: Reifenabrieb in der Umwelt - Neue Erkenntnisse aus drei Jahren Forschung. Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker GmbH. BMBF - Plastik in der Umwelt, 21.06.2021. Online verfügbar unter <https://youtu.be/9MEddBWGkJI>.
- Ugwu, Kevin; Herrera, Alicia; Gómez, May (2021): Microplastics in marine biota: A review. In: *Marine pollution bulletin* 169, S. 112540. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112540.
- Weber, Felix; Kerpen, Jutta; Wolff, Sebastian; Langer, René; Eschweiler, Vanessa (2021): Investigation of microplastics contamination in drinking water of a German city. In: *The Science of the total environment* 755 (Pt 2), S. 143421. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143421.
- Witzig, Cordula S.; Földi, Corinna; Wörle, Katharina; Habermehl, Peter; Pittroff, Marco; Müller, Yanina K. et al. (2020): When Good Intentions Go Bad-False Positive Microplastic Detection Caused by Disposable Gloves. In: *Environ. Sci. Technol.* 54 (19), S. 12164–12172. DOI: 10.1021/acs.est.0c03742.
- Wolff, Sebastian; Kerpen, Jutta; Prediger, Jürgen; Barkmann, Luisa; Müller, Lisa (2019): Determination of the microplastics emission in the effluent of a municipal waste water treatment plant using Raman microspectroscopy. In: *Water Research X* 2, S. 100014. DOI: 10.1016/j.wroa.2018.100014.
- Wolff, Sebastian; Weber, Felix; Kerpen, Jutta; Winklhofer, Miriam; Engelhart, Markus; Barkmann, Luisa (2021): Elimination of Microplastics by Downstream Sand Filters in Wastewater Treatment. In: *Water* 13 (1), S. 33. DOI: 10.3390/w13010033.
- Wong, Johnny Kee Hong; Lee, Kek Kin; Tang, Kuok Ho Daniel; Yap, Pow-Seng (2020): Microplastics in the freshwater and terrestrial environments: Prevalence, fates, impacts and sustainable solutions. In: *The Science of the total environment* 719, S. 137512. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137512.