

Technologische Möglichkeiten zur Reduktion von Kunststoffabfällen in den Meeren

Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundestages
vorgelegt dem Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim
Deutschen Bundestag

A decorative graphic on the left side of the page consists of several overlapping geometric shapes: a large grey triangle pointing right, a smaller grey triangle pointing left, and a blue triangle pointing right, all partially overlapping each other.

Mandy Hinzmann
Doris Knoblauch
Hannes Schritt
R. Andreas Kraemer
(Ecologic Institut)

Dr. Melanie Bergmann
(Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für
Polar- und Meeresforschung)

31. Januar 2025



Kontakt

Mandy Hinzmann

Fellow

Ecologic Institut

Pfalzburger Straße 43/44

10717 Berlin

E-Mail: mandy.hinzmann@ecologic.eu

Danksagung

Die Autor:innen danken den engagierten Interviewpartner:innen dafür, dass sie sich Zeit genommen haben für ein Gespräch mit uns und Informationen geteilt haben. Wir danken außerdem Hannah Brunkhorst für ihre Unterstützung bei der Recherche.

Ecologic Institut: Wissenschaft und Forschung für eine nachhaltige Welt

Das Ecologic Institut ist ein unabhängiger Think Tank für umweltpolitische Forschung, Analyse und Beratung. Seit seiner Gründung 1995 bringt das Institut neue Erkenntnisse und Ideen in die Umweltpolitik ein. Es fördert nachhaltige Entwicklung und trägt zur Verbesserung der umweltpolitischen Praxis bei. Seine Forschung zielt dabei auch auf die Integration von Umweltbelangen in andere Politikfelder. Ein besonderes Anliegen ist es darüber hinaus, die europäischen und internationalen Dimensionen in Forschung, Bildung und dem umweltpolitischen Diskurs zu stärken. Das Ecologic Institut ist mit Büros in Berlin, Brüssel und Washington DC präsent.

Heute arbeiten ca. 100 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für das Ecologic Institut. Sie kommen aus über 25 Ländern. Mit ihrer vielfältigen Expertise decken sie die gesamte Bandbreite der Umweltpolitik, nachhaltigen Entwicklung und sozial-ökologischen Forschung ab. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Ecologic Instituts forschen in inter- und transdisziplinären Projekten. Sie beforschen, begleiten und evaluieren nationale, europäische und internationale Politikprozesse und bringen Akteure aus Wissenschaft, Politik und Praxis zusammen. Das Ergebnis sind fundierte Analysen und praktische Empfehlungen. In Zusammenarbeit mit führenden US-amerikanischen und deutschen Universitäten ist das Institut in der Lehre aktiv.

Das Ecologic Institut finanziert sich als privates, gemeinnütziges Institut durch Projekte. Geldgeber sind u.a. die [Europäische Kommission](#), das [Europäische Parlament](#), das [Bundesumweltministerium](#), das [Bundesforschungsministerium](#), das [Umweltbundesamt](#) sowie diverse Stiftungen.

Das Ecologic Institut ist Mitglied des [Ecological Research Network](#) (Ecornet).

Das Ecologic Institut ist gemeinnützig.

Weitere Informationen: www.ecologic.eu



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iv
1 Einleitung	1
1.1 Die Problemstellung: Der Ozean ist möglicherweise die größte Mülldeponie unseres Planeten	1
1.2 Kontroverse um Technologien zur Rückholung von Plastikmüll	2
1.3 Zielsetzung, Methodik und Aufbau des Gutachtens	2
2 Technologien zur Entfernung von Plastikmüll aus Gewässern: Typologisierung und Überblick	4
2.1 Plastikentfernung aus Abwässern	6
2.1.1 Technologietyp: Netze und Filter	7
2.1.2 Technologietyp: Regenrückhalte- oder Sedimentationsbecken	8
2.1.3 Technologietyp: Membranverfahren.....	9
2.1.4 Technologietyp: Sandfilter	10
2.1.5 Technologietyp: Agglomerations-Fixierungsreaktion	11
2.2 Stationäre Technologien zur Entfernung von Plastik aus Gewässern	12
2.2.1 Technologietyp: Schwimmende, fest installierte Barrieren (Trash Booms)	12
2.2.2 Technologietyp: Fest installierte Gitter-Barrieren und Maschennetze (Trash Racks).....	14
2.2.3 Technologietyp: Müllräder (Trash Wheels)	14
2.2.4 Technologietyp: Schwimmende Mülleimer (Sea Bins).....	16
2.2.5 Technologietyp: Luftblasenvorhang	18
2.3 Mobile Technologien zur Entfernung von Plastik aus Gewässern	19
2.3.1 Technologietyp: Müllsammelboote mit Netzen oder Körben	19
2.3.2 Technologietyp: Müllsammelboote mit Förderbandtechnik.....	20
2.3.3 Technologietyp: Müllsammelroboter und -drohnen.....	21
2.3.4 Technologietyp: Tauchroboter zur Müllsammlung	21
2.3.5 Technologietyp: Schleppnetze	24
2.3.6 Technologietyp: Von Schiffen gezogene schwimmende Barrieren	24
2.4 Risiken und unbeabsichtigte ökologische Auswirkungen	25
2.4.1 Akkumulationszonen und generelle unbeabsichtigte ökologische Auswirkungen	25
2.4.2 Risiken und unbeabsichtigte ökologische Auswirkungen bei stationären Technologien	27
2.4.3 Risiken und unbeabsichtigte ökologische Auswirkungen bei mobilen Technologien	28
2.5 Einschätzung der Effizienz und optimale Einsatzbedingungen	29



2.5.1	Effizienz von Technologien zur Plastikentfernung aus Abwässern	29
2.5.4	Übergreifende Erkenntnisse zur Effizienz von TEK, Kosteneffizienz und optimalen Einsatzbedingungen	31
2.6	Verwertung der eingesammelten Kunststoffabfälle	33
3	Mögliche Einsatzszenarien und Bewertung von Technologien	38
3.1	Einsatzszenarium Bereich Abwasser	38
3.1.1	TEK für Kanalisation	39
3.1.2	TEK für Kläranlagen	40
3.2	Einsatzszenarium Bereich Flüsse und Flussmündung	41
3.2.1	Reinigung an Häfen und Flussmündungen mit Trash Wheels	41
3.2.2	Flexible Reinigung von Plastikmüll-Akkumulationszonen mit Müllsammelbooten 43	
3.3	Einsatzszenarium Bereich Meere	47
3.3.1	TEK für Geisternetze und -leinen	48
3.3.2	Initiativen „Fishing for Litter“	49
3.4	Vergleich zu Vermeidungsstrategien	51
4	Fazit und Ausblick	54
5	Literaturverzeichnis	57
6	Liste der Interviews	65

Abkürzungen

EUR	Euro
FFL	Fishing For Litter
HDPE	High-Density Polyethylen
HTP	Hochtemperaturkunststoffe (engl.: H igh- T emperature P lastics)
LTP	Niedrigtemperaturkunststoffe (engl.: L ow- T emperature P lastics)
MBR	Membranbioreaktoren
OEEO	One Earth – One Ocean e.V.
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PFOA	Perfluorooctansäure
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (<i>per- and polyfluoroalkyl substances</i>)
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure
TEK	Technologien zur Entfernung von Kunststoffen aus Gewässern
TOC	The Ocean Cleanup
TRL	Technology Readiness Level
USD	US-Dollar

Zusammenfassung

Die Plastikverschmutzung trägt zur Verstärkung der globalen Dreifachkrise bei – Klimawandel, Biodiversitätsverlust und Plastikmüll verstärken sich jeweils gegenseitig. Die Meere und der Ozean sind für Plastikmüll eine zentrale Senke, landet doch der Eintrag vom Land über die Flüsse schließlich dort, auch wenn ein großer Teil dann auch wieder an den Stränden angespült wird.

In der Umwelt – v.a. in den empfindlichen aquatischen Ökosystemen – richtet der (Plastik-)Müll Schäden für Flora und Fauna sowie das gesamte Ökosystem an. Verschiedene Unternehmen, Vereine oder Organisationen versuchen, den Müll wieder aus den Meeren und dem Ozean herauszuholen oder aus Abwässern oder Flüssen abzufangen, noch bevor er ins Meer gelangen kann. Daher werden im vorliegenden Gutachten die Potenziale und Auswirkungen von Technologien dargestellt, mit denen Kunststoffabfälle aus aquatischen Ökosystemen und Abwässern entfernt werden können.

Neben der Sichtung und Auswertung von wissenschaftlicher und grauer Literatur wurden auch Informationen der Technologieanbieter selbst ausgewertet. Zudem wurden acht qualitative Interviews mit verschiedenen Expert:innen geführt, darunter sowohl Expert:innen für Kläranlagen/Abwassertechnik, als auch für Flüsse, für Meere/den Ozean, für Kreislaufwirtschaft, für Recycling sowie Technologie-Anbieter selbst.

Da es sehr unterschiedliche Technologietypen zur Entfernung von Plastik aus aquatischen Ökosystemen gibt, werden diese zunächst vorgestellt. Dabei werden sowohl Techniken berücksichtigt, die in Abwässern ansetzen, als auch solche, die in Flüssen, in Hafent, an Küsten oder auch im offenen Meer ansetzen. Anschließend werden ökologische Risiken bewertet, die Effizienz und optimalen Einsatzbedingungen ebenso wie die Verwertung des geborgenen Mülls. Darauf aufbauend werden mögliche Einsatzszenarien für diese Technologien skizziert und deren Wirksamkeit ins Verhältnis zu Vermeidungsstrategien gesetzt.

Im Fazit und Ausblick werden folgende Empfehlungen gegeben:

- Eine Kombination aus vorbeugenden Maßnahmen und der gezielten Anwendung von Technologien zur Entfernung von Kunststoffen bietet das größte Potenzial, die Belastung der Gewässer nachhaltig zu reduzieren.
- Dabei sollte der Fokus insbesondere auf Abwasser, Flüssen, Flussmündungen und Häfen liegen, wo Plastikmüll effizienter gesammelt und größere ökologische Schäden vermieden werden können.
- Die Entfernung von Plastikmüll aus dem offenen Ozean sollte hingegen aufgrund ihrer potenziell schädlichen Auswirkungen nur in Ausnahmefällen durchgeführt werden, z. B. zur Bergung von Geisternetzen oder im Falle von Havarien.

Wichtig ist dabei der Hinweis, dass alle Technologien vorhandenen Müll zwar beseitigen, nicht aber die eigentlichen Ursachen der Meeresverschmutzung. Ohne eine systemische Änderung wird (Plastik-)Müll weiter in die Meere gelangen, die Mengen werden sogar zunehmen.

1 Einleitung

1.1 Die Problemstellung: Der Ozean ist möglicherweise die größte Mülldeponie unseres Planeten

Im Jahr 2021 veröffentlichte das UN-Umweltprogramm den Bericht *Frieden schließen mit der Natur*. Darin wird das Konzept der globalen Dreifachkrise vorgestellt, welches die enge Verknüpfung zwischen der vom Menschen verursachten Klimakrise, dem globalen Verlust an Biodiversität und der zunehmenden Umweltverschmutzung verdeutlicht. Steigende Temperaturen und Extremwetterereignisse bedrohen zahlreiche Tier- und Pflanzenarten und tragen maßgeblich zu ihrem Aussterben bei. Gleichzeitig beeinträchtigen Verschmutzungen wie Plastikmüll und Chemikalien ihre Lebensräume. Der daraus resultierende Verlust an Biodiversität verringert die Widerstandsfähigkeit von Ökosystemen gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels und schwächt die natürliche Filterung von Schadstoffen, was die Umweltverschmutzung weiter verstärkt (United Nations Environment Programme 2021).

Der Schutz der Gewässer ist ein zentrales Anliegen, denn unsere Flüsse, Seen, Meere und der Ozean sind essenziell für das Leben auf der Erde. Jedoch gelangt jährlich eine Menge zwischen schätzungsweise 8 und 23 Millionen Tonnen Plastikmüll in aquatische Ökosysteme (Borrelle et al. 2020; Jambeck und Walker-Franklin 2023; Lau et al. 2020). Plastik baut sich nur sehr langsam ab und kann jahrzehnte-, oder jahrhundertlang im Wasser bleiben. Es zerfällt in kleine Teile, sogenanntes Mikro- und Nanoplastik, das von Meerestieren aufgenommen wird und über die Nahrungskette auch den Menschen erreichen kann. Es wird geschätzt, dass sich bereits etwa 150 Millionen Tonnen Plastik im Ozean befinden (PEW & Systemiq 2020). Vor diesem Hintergrund haben Forschende den Ozean als „möglicherweise größte Mülldeponie unseres Planeten“ bezeichnet (Schneider et al. 2018, S. 163), wobei sich der Müll teilweise in Akkumulationszonen sammelt.¹ Für die nächsten Jahrzehnte wird eine Verdreifachung der weltweiten Kunststoffproduktion und damit auch der Erzeugung von Plastikmüll vorhergesagt. Infolgedessen wird sich der Eintrag von Plastik in den Ozean bis 2040 schätzungsweise verdreifachen, sofern keine ambitionierten Gegenmaßnahmen ergriffen werden (UNEP & IRP 2021).

Plastikverschmutzung trägt zur dreifachen planetaren Krise bei, und es gibt zahlreiche Belege dafür, dass sich Plastikmüll negativ auf aquatische Ökosysteme auswirkt (Rochman et al. 2016; Tekman et al. 2022). Beispielsweise verfangen sich Organismen im Plastikmüll oder halten ihn für Nahrung; durch die Wanderung von Plastikmüllteilen in Gewässern können anhaftende Schadstoffe, Pathogene und invasive Arten in empfindliche Ökosysteme gelangen; Plastikmüll kann den Sauerstoff- und Nährstofffluss in Gewässern beeinträchtigen und schädliche Inhaltstoffe auslaugen (Napper und Thompson 2020; UNEP 2021). Somit bestehen eine Reihe von Risiken für Lebensräume, Wildtiere und verschiedene Ökosystemfunktionen durch die Plastikverschmutzung. Letztlich kann sich dies auch auf die menschliche Gesundheit (z. B. über die Nahrungskette oder durch Einatmen) und auf wirtschaftliche Aktivitäten (z. B. Tourismus, Fischerei und Schifffahrt) auswirken (Hohn et al. 2020; PEW & Systemiq 2020). Diese Problemstellung veranlasste Technologieentwickler:innen und Innovator:innen dazu, technische Lösungen zu entwickeln, die Gewässer und aquatische Ökosysteme von Plastikmüll

¹¹ Wir vermeiden bewusst die Begriffe „Hotspots“ und „Garbage Patch“, da es dafür (noch) keine klaren Definitionen gibt, auf die man sich geeinigt hat (keine Standards). Akkumulationszonen könnten bessere Anhaltspunkte für den Einsatz von TEK sein, vgl. dazu Kapitel 2.4.

befreien sollen. In den letzten etwa zehn Jahren fand rund um den Globus eine intensive Phase der Entwicklung solcher Technologien statt; zahlreiche Start-Ups haben sich gegründet und Patente wurden angemeldet (Dijkstra et al. 2021; Moulaert et al. 2021).

1.2 Kontroverse um Technologien zur Rückholung von Plastikmüll

Inzwischen gibt es eine Vielzahl an Technologien zur Entfernung von Kunststoffen aus Gewässern, die sich bereits auf dem Markt befinden oder kurz vor der Marktreife stehen. Dabei sind diese Technologien in ihrer Funktionsweise, ihrem Design und ihren Anwendungsbereichen sehr unterschiedlich (vgl. Bellou et al. 2021; Falk-Andersson et al. 2020; Leone et al. 2022; Rechlin et al. 2024; Winterstetter et al. 2021). Sie reichen von festen Installationen zum Auffangen von Plastikmüll in Flüssen über komplexe Konstruktionen, die von Schiffen durch die Meere oder den Ozean geschleppt werden, bis hin zu Vorhängen aus Luftblasen, die das Plastik an die Wasseroberfläche treiben und dann als Barriere für Plastikmüll dienen sollen. Informationen über diese Technologien sind über Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Regionen verstreut.

Sowohl im öffentlichen Diskurs als auch innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft wird der mögliche Einsatz solcher technischen Lösungen kontrovers diskutiert. Es gibt Bedenken hinsichtlich der Eignung und Effizienz dieser Technologien. Hier bestehen derzeit Wissenslücken und Unsicherheiten zur Wirkung, Skalierbarkeit, Effizienz und den assoziierten Kosten von Rückholtechnologien (Bergmann et al. 2023). Vor allem aber besteht die Sorge, dass ein zu starker Fokus auf die Entfernung von Plastikmüll aus Gewässern gelegt wird – und dadurch die Bemühungen geschwächt werden, die Ursachen der Plastikmüllverschmutzung anzugehen und notwendige Veränderungen im System anzustoßen (z. B. Bergmann et al. 2023; Hohn et al. 2020; Leone et al. 2023).

Trotz der Komplexität der Problematik, die mit keiner einfachen regulativen Logik zu fassen ist, haben die Staaten der Welt die Bedeutung erkannt und internationale Verhandlungen mit dem Ziel angestoßen, ein globales Plastikabkommen zu erarbeiten und zu vereinbaren. Hierbei sind u.a. Technologien zur Rückholung von Plastikabfällen aus Gewässern in den Fokus gerückt, was wiederum das Interesse an der Entwicklung eben solcher Technologie beflügeln kann. So werden auch Bestandsaufnahmen von einschlägigen Technologien und ihren Entwicklungsvektoren sowie Technikfolgenabschätzungen oder Kosten-Nutzen-Analysen zunehmend wichtig für sowohl einzelstaatliche politische Entscheidungen als auch die internationalen Verhandlungen.

1.3 Zielsetzung, Methodik und Aufbau des Gutachtens

Mit dem Kurzgutachten wird eine Bestandsaufnahme zu den aktuellen technologischen Entwicklungen zur Entfernung von Kunststoffen aus Wasser und aquatischen Ökosystemen durchgeführt. Ziel dabei ist, einen systematischen Überblick für den Bundestag zu erstellen, der die Potenziale und Auswirkungen der technologischen Entwicklungen prägnant und wissenschaftlich robust abbildet.

In der wissenschaftlichen Literatur sowie in der öffentlichen Debatte werden unterschiedliche Begriffe für diese Technologien verwendet, u. a. Clean-Up-Technologien, Müllauffangsysteme für Gewässer, Ozeanreinigungstechnologien oder Plastikfänger. Um deutlich zu machen, auf was wir uns in diesem Gutachten beziehen, verwenden wir die Bezeichnung *Technologien zur Entfernung von Kunststoffabfällen aus Gewässern und Abwasser*, die wir zur besseren

Lesbarkeit mit *TEK* abkürzen. Wir verstehen darunter Technologien, die zur Entfernung von Makro- und/oder Mikroplastik in den folgenden Bereichen konzipiert sind:

- a) Abwasser
- b) Binnengewässer und Flussmündungen
- c) Küstengewässer, Meere und der Ozean

Nicht im Fokus dieses Gutachtens sind Technologien zur Reinigung von Stränden oder Uferabschnitten. Ferner wird auch die Entfernung von Mikroplastik aus Trinkwasser nicht in diesem Gutachten behandelt. Der aktuelle Erkenntnisstand legt nahe, dass Plastik in den menschlichen Körper vor allem durch den Verzehr von Lebensmitteln gelangt, die in Plastik verpackt oder stark verarbeitet sind (Hartmann et al. 2024). Auch Lebensmittel, die selbst einen hohen Anteil an Mikroplastik enthalten, wie beispielsweise Muscheln, tragen zur Aufnahme bei. Leitungswasser hingegen kann als Quelle weitgehend vernachlässigt werden, da es kaum zur Mikroplastikbelastung beiträgt.² Bei Trinkwasser aus Plastikflaschen ist die Aufnahme von Mikroplastik zwar erhöht, jedoch ist hier die Verpackung des Wassers und nicht das Trinkwasser selbst die Hauptursache.³

Folgende Datenquellen wurden für das Gutachten herangezogen: einschlägige wissenschaftliche Literatur, Projektberichte, Online-Medienberichte, Websites von Technologieanbietern sowie Informationen aus frei zugänglichen Forschungsförderungsdatenbanken. Zusätzlich wurden acht Interviews mit Expertinnen und Experten aus der Forschung und Wirtschaft geführt. Diese fanden im Zeitraum von Mitte November 2024 bis Mitte Januar 2025 statt. Eine Übersicht der Interviewpartner:innen findet sich unter Kapitel 6.

Das Gutachten ist folgendermaßen aufgebaut. Zunächst wird in Kapitel 2 ein systematischer Überblick zum aktuellen Stand der technologischen Entwicklungen anhand von Steckbriefen gegeben. Daran anschließend werden übergreifend die Risiken und unbeabsichtigten ökologischen Nebenwirkungen dieser Technologien beleuchtet, ihre Effizienz diskutiert und Verwertungsmöglichkeiten für die eingesammelten Kunststoffabfälle betrachtet.

Im nächsten Schritt werden in Kapitel 3 bestimmte Technologien genauer betrachtet, die hinsichtlich ihres Gesamtkonzepts vielversprechend erscheinen. Für die drei Anwendungsbereiche Abwässer, Flüsse und Meere werden jeweils konkrete Technologien oder Projekte vorgestellt und potenzielle Einsatzszenarien skizziert. Zudem wird in Kapitel 3.4 der Versuch unternommen, den erwarteten Beitrag der TEK zur Bewältigung Plastikverschmutzung der Meere ins Verhältnis zu setzen zu Vermeidungsstrategien, die an der Ursache der Verschmutzung ansetzen.

Abschließend werden in Kapitel 4 die zentralen Ergebnisse zusammengefasst, Empfehlungen abgeleitet und ein Ausblick gegeben.

² <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516198> (24.01.2025).

³ <https://www.lgl.bayern.de/lebensmittel/chemie/kontaminanten/mikroplastik/> (26.11.2024).

2 Technologien zur Entfernung von Plastikmüll aus Gewässern: Typologisierung und Überblick

In den letzten Jahren gab es viele Innovationen und Entwicklungen im Bereich der Technologien zur Entfernung von Kunststoffen aus Gewässern (TEK). Dies zeigt sich unter anderem an dem starken Wachstum von Start-ups, die zwischen 2016 und 2019 gegründet wurden und sich auf die Bekämpfung von Plastikverschmutzung in den Meeren spezialisiert haben, sowie an der steigenden Anzahl an Patenten, die in diesem Bereich angemeldet wurden (Dijkstra et al. 2021; Moulaert et al. 2021; Schmaltz et al. 2020). In einer aktuellen Übersichtsstudie wurden mehr als 100 verschiedene Technologien zur Entfernung von Plastikmüll aus Gewässern oder Abwässern gezählt (Griffin et al. 2024). TEK werden von einer Vielzahl von Einrichtungen weltweit entwickelt, gebaut und finanziert, z. B. von gemeinnützigen Organisationen und technischen Start-ups. Oftmals werden Aktivitäten dieser Einrichtungen von multinationalen Unternehmen finanziert, die zu den größten Plastikverschmutzern der Welt gehören (Blettler et al. 2023; Environmental Investigation Agency & Ocean Care 2023).

Eine große Anzahl an Technologien hat bereits die Marktreife erreicht und befindet sich im Einsatz. Eine aktuelle wissenschaftliche Studie zeigt, dass TEK in Ländern auf allen Kontinenten (außer der Antarktis) eingesetzt werden, die meisten in den Vereinigten Staaten, gefolgt von Australien und Indonesien (Griffin et al. 2024).

Die einzelnen Technologien unterscheiden sich in ihrer Funktionsweise, ihrem Design und ihren Einsatzmöglichkeiten (vgl. Winterstetter et al. 2021; Falk-Andersson, Haarr und Havas 2020; Leone et al. 2022). Das liegt vor allem daran, dass verschiedene Faktoren berücksichtigt werden müssen, um die Beseitigung von Plastikmüll durch Technologien zu ermöglichen – beispielsweise die Breite und Tiefe des Gewässers, Strömungen und Einfluss von Gezeiten, die Zugänglichkeit vom Land und vom Wasser aus, möglicher Schiffsverkehr, oder die Wanderung von aquatischen Organismen (Moulaert et al. 2021).

Im Folgenden werden wir bereits angewendete sowie weit ausgereifte, sich in der Entwicklung befindliche Technologien zu Technologietypen gruppieren und diese näher in ihrer Funktionsweise und ihren Merkmalen beschreiben. Jeder Technologietyp kann dabei mehrere Hersteller, Anwendungsfälle bzw. Prototypen umfassen. Zur Illustration werden jeweils Anwendungsbeispiele pro Technologietyp aufgezeigt.

Um die Technologien zu systematisieren, orientieren wir uns in diesem Kurzgutachten an einer Typologisierung von Moulaert et al. (2021), wie in Abbildung 1 dargestellt. Demnach können die technologischen Lösungsansätze zunächst darin unterschieden werden, ob sie mobil (wie beispielsweise Boote) oder fest installiert sind und stationär Kunststoffabfälle einfangen (z. B. in Kläranlagen). Des Weiteren können die Technologien nach ihrer Operationsart charakterisiert werden. Stationäre Technologien können aktiv betrieben werden oder passiv Plastikmüll einfangen (z. B. fest installierte Netze unter Nutzung von Strömungen). Mobile Technologien werden lassen sich außerdem darin unterscheiden, ob sie von einer Crew gesteuert werden, autonom fahren oder ferngesteuert werden.

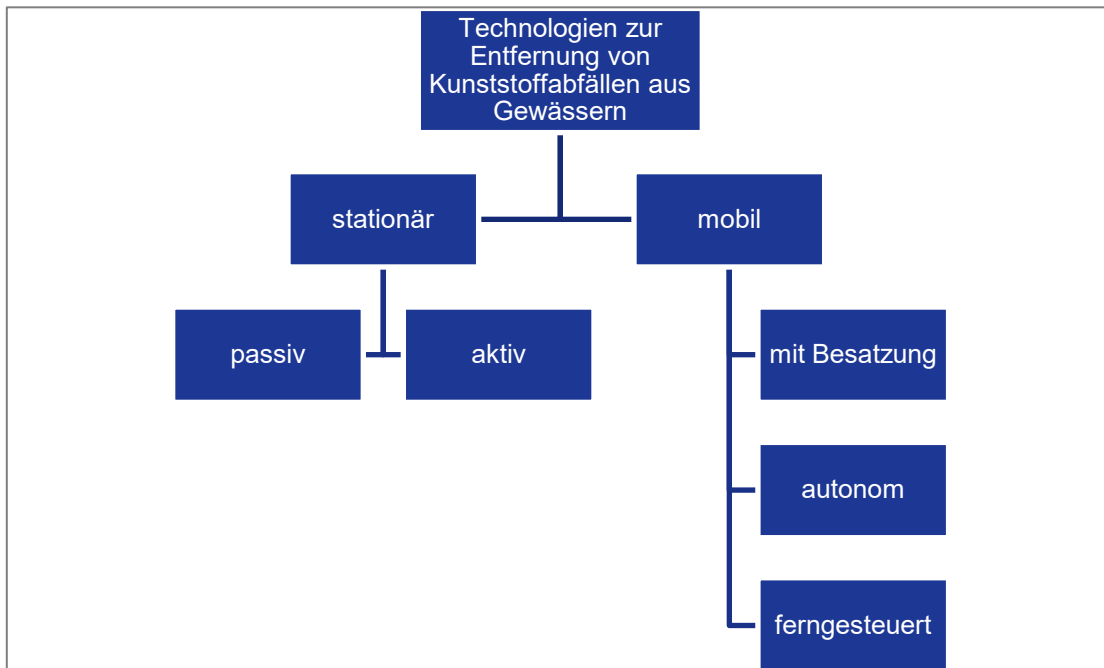


Abbildung 1: Typologie von Technologien zur Entfernung von Kunststoffabfällen aus Gewässern, adaptiert von Moulart et al. (2021).

Im Folgenden werden identifizierte Technologietypen und ihre relevanten Kerndaten als Steckbriefe dargestellt. Da es sich um ein sehr dynamisches Feld handelt, können wir keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, sondern wollen einen strukturierten Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand von TEK geben. Anschließend diskutieren wir Technologietyp-übergreifend die Risiken und unbeabsichtigte ökologische Auswirkungen, sowie die Effizienz und Verwertungsoptionen für Kunststoffabfälle, die aus Gewässern gesammelt wurden.

Die Steckbriefe sind in drei Bereiche unterteilt:

1. Plastikentfernung aus Abwässern
2. Stationäre Technologien zur Entfernung von Plastik aus Gewässern
3. Mobile Technologien zur Entfernung von Plastik aus Gewässern

In allen Steckbriefen wird zunächst unter „Anwendungsgebiet“ spezifiziert, für welche Abwasser- bzw. Gewässertypen der jeweilige Technologietyp konstruiert wurde.

Bei den Gewässertypen unterscheiden wir:

- **Fließgewässer:** Flüsse, Bäche
- **Binnengewässer:** neben Fließgewässern auch stehende Gewässer wie Seen oder Teiche
- **Küstengewässer:** küstennahe Bereiche des offenen Meeres sowie mit dem offenen Meer in wechselseitiger Verbindung stehende Gewässer, die an mehreren Seiten von Land umschlossen sind (z. B. Buchten)
- **Meere:** kleiner als der Ozean und oft teilweise von Land umgeben; kann mit dem Ozean verbunden sein (z. B. das Mittelmeer, Nordsee als Teil des Atlantiks)
- **Ozean:** der globale Ozean verbindet die unterschiedlichen Meere oder Ozeanbecken mit den Randmeeren; wir beziehen uns im vorliegenden Gutachten insbesondere auf die Hochsee, die außerhalb der Küstengewässer liegt

Für den Bereich der Plastikentfernung aus Gewässern wird zudem der „Zielbereich“ innerhalb des Gewässers genannt (Wasseroberfläche, Wassersäule, Gewässergrund). Für TEK im Abwasserbereich trifft diese Zuordnung nicht zu, daher wird die Kategorie „Zielbereich“ nicht in den Steckbriefen betrachtet. Da viele Abwasserbegriffe sehr spezifisch sind und die Einordnung im Abwassersystem ohne Erläuterung nicht immer eindeutig ist, enthält das folgende Kapitel als erstes ein Glossar der zentralen Begriffe.

2.1 Plastikentfernung aus Abwässern

Tabelle 1: Glossar Abwasserbegriffe⁴

Begriff	Definition	Lage im Abwassersystem
Schmutzwasser	Abwasser aus Haushalten, Industrie oder Gewerbe, das Fäkalien, Chemikalien und andere organische oder anorganische Stoffe enthält.	In Trennsystemen über eigene Schmutzwasserkanäle zur Kläranlage oder ins Mischwassersystem.
Oberflächenabfluss	Regen-, Schnee- oder Hagelwasser, das in die Kanalisation oder direkt in Gewässer geleitet wird.	In Trennsystemen (separate Regenwasserkanäle) oder im Mischwassersystem mit Schmutzwasser.
Mischwasser	Kombination aus Schmutzwasser und Oberflächenabfluss, das gemeinsam in einem Kanal gesammelt und zur Kläranlage geleitet wird.	In Mischwassersystemen, die beide Abwasserarten in einem Kanal führen (bspw. im Zentrum Berlins).
Mischwasserentlastungsanlagen	Bauwerke zur kontrollierten Ableitung von überschüssigem Mischwasser bei Starkregen, um die Kläranlage zu entlasten.	Zwischen dem Mischwassersystem und einem Gewässer, z. B. als Regenüberlaufbecken.
4. Reinigungsstufe	Die 4. Reinigungsstufe in Kläranlagen ist eine zusätzliche Behandlungseinheit, die gezielt Mikroverunreinigungen wie Arzneimittelrückstände, Hormone und Pestizide (meist) mittels Aktivkohle, Ozonung oder Membranverfahren entfernt, um die Wasserqualität weiter zu verbessern.	Nachgeschaltet an eine kommunale Kläranlage.

⁴ <https://www.selh.de/aufgaben/lexikon-der-abwasserbegriffe.html> (17.2.2025).

2.1.1 Technologietyp: Netze und Filter

Anwendungsgebiet: Mischwasserentlastungsanlagen, Oberflächenabfluss, jeweils Kanalisation

Einsatzort und Operationsweise: Stationär, passiv

Technische Funktionsweise: Netze filtern Makroplastik, während Filter, wie Tuchfilter, Mikroplastik aus dem Abwasser entfernen. Die Technologien verhindern, dass Plastik bei Starkregen ungeklärt in Gewässer gelangt.

Anwendungsbeispiele: TrashTrap (Netze), SABA (Tuchfilter), Gullyfilter (URBANFILTER: Pilotprojekte an der Clayallee, Berlin)⁵.

Bisherige Einsatzorte und Kontexte:

- **Netze:** Mehrere Einsätze in US-Abwassersystemen. Für Deutschland weniger relevant aufgrund geringeren Makromüllaufkommens in Kanalisation. Potenziell nützlich für den Einsatz an Bypässen⁶ deutscher Kläranlagen (Interview 7).
- **Filter (z. B. Tuchfilter, Mikrosiebe, Gullyfilter):** Tuchfilter werden in der Schweiz erfolgreich im SABA-System für die Reinigung von Oberflächenabfluss in Trennsystemen eingesetzt, bevor es in die Gewässer eingeleitet wird. Filter sind auch in Deutschland gut einsetzbar, insbesondere als nachgeschaltete Ergänzung zu Regenrückhaltebecken in stark belasteten Mischwasserentlastungsanlagen und Straßen⁷. Lamellenfilter stellen eine weitere Option dar und finden bereits Anwendung bei der Reinigung von Oberflächenabfluss, beispielsweise an Autobahnen (Interview 7).

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9, Gullyfilter: TRL 8/9 – Die Technologie ist weit fortgeschritten, wird jedoch weiter optimiert, um Effizienz und Wartungsfreundlichkeit zu verbessern.

Effizienz: 97%⁸ bei TrashTrap, 97%⁹ Tuchfilter, Bis zu 90% im Labor¹⁰ ; ca. 50% bei Test an Straße¹¹

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Makroplastik (Netze), Mikroplastik bis 10µm¹² (Filter)
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Relevant vor allem bei Starkregen in Trennsystemen.
- **Energiebedarf:** Der Einsatz von Netzen benötigt keine Energie. Der Einsatz von Filtern erfordert Strom für die Rückspülung.
- **Komplexität der Technologie:** Einfacher Aufbau und Bedienung.

⁵ <https://www.tu.berlin/news/berichte/out-of-the-gully> (27.11.2024).

⁶ Bei drohendem Rückstau aufgrund außergewöhnlicher Wetterbedingungen, technischen Störungen, Wartungsarbeiten oder anderer unvorhersehbarer Ereignisse kann ein Notfall-Bypass aktiviert werden. Über Bypässe kann das Abwasser unaufbereitet umgeleitet und ungeklärt ins Gewässer eingeleitet werden.

⁷ <https://www.deutsches-ingenieurblatt.de/fachartikel/artikeldetail/regenwasserfilter-fuer-mikroplastik> (31.01.2025).

⁸ <https://nicholasinstitute.duke.edu/plastics-technologies/stormtrap-trashtrap> (27.11.2024).

⁹ <https://www.umweltwirtschaft.com/news/wasser-und-abwasserbehandlung/Abwasserbehandlung-Effiziente-Mikroplastikentnahme-im-Strassenabwasser-19335> (31.01.2025).

¹⁰ <https://www.deutschlandfunkkultur.de/kampf-gegen-mikroplastik-fegen-fuer-die-forschung-100.html> (27.11.2024).

¹¹ Entfernung von AFS (ungleich Plastik, aber vergleichbar). Quelle: https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-05/Session-B_Venghaus_RAU.pdf (27.11.2024).

¹² <https://www.umweltwirtschaft.com/news/wasser-und-abwasserbehandlung/Abwasserbehandlung-Effiziente-Mikroplastikentnahme-im-Strassenabwasser-19335> (31.01.2025).

Kosten (Installation und Wartung):

- **Netze:** Mittlere Installationskosten, aber eher geringe Wartungskosten für die Entsorgung des Makromülls (u.a. Anfahrt).
- **Filter:** Aufwendigere Wartung, insbesondere durch die Entsorgung des rückgespülten Retentats bzw. des Filtrerrückstands.¹³ Gullyfilter ca. 7.000–10.000 EUR pro Einheit (Venghaus et al. 2021).
- **Besonderheit:** Die Technologien sind dezentral einsetzbar, d.h. sie werden nicht einmalig in der Kläranlage installiert, sondern an mehreren Orten innerhalb der Kanalisation, oder Straßen. Die Kosten hängen stark von der Anzahl und Lage der zu installierende Systeme ab. Eine Erfassung von Akkumulationszonen und der Einsatz an diesen Stellen ist essenziell, um Kosten und Nutzen zu optimieren.

Risiken für Tiere und Lebensräume: Keine bekannten Risiken.

2.1.2 Technologietyp: Regenrückhalte- oder Sedimentationsbecken

Anwendungsgebiet: Oberflächenabfluss im Trennsystem, Mischwasserentlastungsanlagen im Mischsystem, jeweils Kanalisation

Einsatzort und Operationsweise: Stationär, passiv

Technische Funktionsweise: Regenrückhaltebecken sind stationäre Anlagen, die den Wasserabfluss verlangsamen und so Sedimente und Partikel durch Schwerkraft abscheiden. In deutschen Städten werden diese Becken bereits häufig eingesetzt, um Verschmutzungen aus Oberflächenabfluss (z. B. von Straßen und Parkplätzen) zu reduzieren. Sie sind auch für den Rückhalt von Plastik relevant, da viele Plastikarten wegen einer höheren Dichte als Wasser sedimentieren und in den Becken abgeschieden werden können (Rasmussen et al. 2024).

Anwendungsbeispiele: Regenrückhaltebecken in Städten wie Berlin¹⁴ und Hamburg¹⁵ dienen der Filtration des Oberflächenabflusses und der Reduzierung der Schadstoffbelastung von Gewässern.

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: Einsatz zwischen Kanalisation und Gewässern, insbesondere an stark frequentierten Straßen und Industriegebieten.

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9

Die Technologie ist ausgereift, jedoch besteht Entwicklungspotenzial in der Kombination mit weiterführenden Technologien wie Tuchfiltern, um die Rückhaltequote für Mikroplastik weiter zu verbessern.

Effizienz:

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Vor allem Makroplastik, teilweise auch Mikroplastik (abhängig von der Partikelgröße, der Dichte, der chemischen Eigenschaften des Plastiktyps und der Verweildauer im Becken).
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Effektivität kann bei Starkregen durch zu hohe Abflussmengen verringert werden, die die Sedimentationszeit verkürzen.

¹³ Das Retentat ist die Flüssigkeit, die von der Membran zurückgehalten wird und die abgetrennten Stoffe enthält.

¹⁴ https://de.wikipedia.org/wiki/Regen%C3%BCckhaltebecken_im_Bezirk_Marzahn-Hellersdorf (17.2.2025)

¹⁵ <https://www.hamburg.de/politik-und-verwaltung/behoerden/bukea/themen/wasser/abwasser/regenwasserableitung-160474> (17.2.2025)

- **Energiebedarf:** Keine direkte Energieversorgung erforderlich.

Kosten (Installation und Wartung):

- **Installation:** Mittlere bis hohe Kosten, abhängig von der Größe und Lage der Becken.
- **Wartung:** Regelmäßige Entfernung der abgeschiedenen Sedimente erforderlich, was die Betriebskosten erhöht.

Risiken für Tiere und Lebensräume:

Keine direkten Risiken für Tiere und Lebensräume, wenn die Becken fachgerecht betrieben und gewartet werden.

Relevanz für Plastikrückhalt:

- **Makroplastik:** Effektiver Rückhalt durch Sedimentation großer Partikel.
- **Mikroplastik:** Eine sinnvolle Ergänzung zu Regenrückhaltebecken wären nachgeschaltete Filtersysteme, um feinere Partikel effizient zurückzuhalten. Je nach Dichte des Plastiks werden in Regenrückhaltebecken 77 bis 99% zurückgehalten (Rasmussen et al. 2024).

2.1.3 Technologietyp: Membranverfahren

Anwendungsgebiet: Industrielles und kommunales Abwasser, jeweils Kläranlage

Einsatzort und Operationsweise: Stationär

Technische Funktionsweise: Membranbioreaktoren und andere Membranverfahren filtern Abwasser, indem die Membranen als sehr feine Filter dienen, wodurch selbst kleinste Partikel effektiv zurückgehalten werden können. Während Membranbioreaktoren die biologische Abwasserreinigung direkt mit einer Membranfiltration kombinieren, gibt es auch rein physikalische Membranverfahren, die meist nachgeschaltet an andere Reinigungsstufen eingesetzt werden (mögliche Variante einer 4. Reinigungsstufe).

Anwendungsbeispiele: Envopur®, Membranbioreaktor in Berlin-Margaretenhöhe¹⁶

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: Membranbioreaktoren werden weltweit für die Behandlung von Industrie- und kommunalem Abwasser eingesetzt. In Deutschland findet die Technologie zunehmend Anwendung, insbesondere bei stark verunreinigtem Abwasser (Pinekamp et al. 2009), in Bereichen mit hohen Anforderungen an die Abwasserqualität¹⁷, oder in abgelegenen Siedlungen¹⁸.

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9

Effizienz: Bis zu 99,9% (Ahmed et al. 2024)

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Mikro- und Makroplastik (bis zu 0,1 µm¹⁹)
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Kein Einfluss bekannt, da die Technologie stationär in Kläranlagen betrieben wird.

¹⁶ https://www.bwb.de/de/pressemitteilungen-2000-2004_2208.php (27.11.2024).

¹⁷ https://www.umweltinnovationsprogramm.de/projekte/energetische-optimierung-der-membranklaeranlage-am-beispiel-des-gruppenklaerwerks?utm_source=chatgpt.com (17.2.2025).

¹⁸ https://www.bwb.de/de/pressemitteilungen-2000-2004_2208.php (17.2.2025).

¹⁹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Membranbelebungsreaktor> (31.01.2025).

- **Energiebedarf:** Der Energieverbrauch ist 2- bis 4-mal höher als bei konventionellen Kläranlagen, was die Betriebskosten erhöht.
- **Komplexität der Technologie:** Aufgrund der Integration biologischer und physikalischer Prozesse als mittel bis hoch einzuschätzen.

Kosten (Installation und Wartung): Die Technologie verursacht hohe Installations- und Wartungskosten. Insbesondere der Austausch und die Reinigung der Membranen sowie die Entsorgung des konzentrierten Retentats sind kostenintensiv.

Risiken für Tiere und Lebensräume: Das Retentat, das aus belebtem Schlamm und gesammelten Kunststoffen besteht, muss fachgerecht entsorgt werden, um Umweltbelastungen zu vermeiden.

2.1.4 Technologietyp: Sandfilter

Anwendungsgebiet: Kommunales Abwasser (Kläranlage), Oberflächenabfluss (z. B. von versiegelten Flächen wie Straßen oder Parkplätzen, Kanalisation)

Einsatzort und Operationsweise: Stationär; als nachgeschaltete Filtereinheit in Kläranlagen (mögliche Ergänzung zur 4. Reinigungsstufe), in der Industrie oder als Teil von Regenrückhaltebecken in Trenn- oder Mischsystemen.

Technische Funktionsweise: Sandfilter arbeiten durch physikalische Filtration und entfernen Feststoffe, einschließlich Mikroplastik, aus dem Wasser. Das Wasser durchläuft eine Sandschicht, die Partikel durch Sedimentation und Filtration zurückhält. Effizienzsteigerungen können durch Kombination mit Tuchfiltern oder Mikrosieben erreicht werden.

Anwendungsbeispiele: Kommunale Kläranlagen (bspw. Weißenburg in Bayern²⁰).

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: Kläranlagen für kommunales Abwasser, Plastikindustrie (Wolff et al. 2020)

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9 – ausgereifte Technologie, die bereits in der Praxis angewendet wird. Weiterentwicklungen zur Effizienzsteigerung, z. B. in Kombination mit Tuchfiltern, sind möglich.

Effizienz: 99% bei Sandfilter als 4. Reinigungsstufe in kommunaler Kläranlage, 99% bei einem PVC-Hersteller (Wolff et al. 2020)

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Mikroplastik ($>10\mu\text{m}^{21}$)
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Keine Relevanz, da nachgeschaltet an eine Kläranlage.
- **Energiebedarf:** Gering im Vergleich zu Membrantechnologien, Rückspülung und Wartung erfordern jedoch zusätzlichen Energieaufwand.
- **Komplexität der Technologie:** Vergleichsweise niedrig, regelmäßige Wartung erforderlich.

Kosten (Installation und Wartung):

²⁰ <https://www.stmuv.bayern.de/themen/wasserwirtschaft/abwasser/spurenstoffe> (17.02.2025).

²¹ Nachweisgrenze der angewandten Analytik. Aussagen zu kleineren Partikeln daher nicht möglich (Wolff et al. 2020).

- Installations- und Wartungskosten sind mittel bis hoch, abhängig von der Größe der Anlage und der spezifischen Anpassung. Rückspülung des Sandfilters notwendig, daher hoher Aufwand bei mengenmäßig umfassender, dezentraler Installation.

Risiken für Tiere und Lebensräume:

- Keine direkten Risiken.

2.1.5 Technologietyp: Agglomerations-Fixierungsreaktion

Anwendungsgebiet: Industrielles Abwasser (Kläranlage)

Einsatzort und Operationsweise: Stationärer Einsatz in industriellen Kläranlagen.

Technische Funktionsweise: Die Agglomeration basiert auf der Dosierung von Hybridkieselgel-Kompositionen, die gezielt Mikroplastikpartikel zu größeren Aggregaten verbinden. Im Gegensatz zur herkömmlichen Anwendung von Fällungs- oder Flockungsmitteln erfolgt die Dosierung nicht pro Kubikmeter Abwasser, sondern belastungsabhängig. Ermöglicht wird dies durch eine standardisierte Mikroplastik-Messung, die schon im Anwendungsbereich der Technologie präzise Entfernungsdaten berechnet. Die Agglomerate können durch nachgelagerte Verfahren wie Filtration oder Sedimentation effizient entfernt werden. Die Technologie eignet sich besonders für Abwässer mit hoher Partikelbelastung, wie sie häufig in der Industrie vorkommen.

Anwendungsbeispiele: Wasser 3.0 PE-X²²; Pilotprojekte auf der Kläranlage Landau, in einer Papierfabrik²³ und bei einem Kunststoffhersteller.

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: Eingesetzt in Pilotanlagen und industriellen Kläranlagen, teilweise auch in kommunalen Kläranlagen zur Erprobung.

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9 (Industrie), TRL 8 (kommunale Kläranlagen)

Effizienz: 95-98% Industrieabwasser (Wasser 3.0 gmbH 2024) (Sturm et al. 2024)

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Mikroplastik (potenziell auch Nanoplastikpartikel).
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Keinen Einfluss. Prozess findet in abgeschlossenen Einheiten statt.
- **Energiebedarf:** Geringer zusätzlicher Energieaufwand für die Behandlung sowie den Einsatz von Chemikalien.
- **Komplexität der Technologie:** Mittel bis hoch; erfordert spezifisches Know-how in Mikroplastikanalytik für die belastungsabhängige Dosierung der Chemikalien.

Kosten (Installation und Wartung): Installations- und Wartungskosten variieren je nach Skalierung und Anwendungsbereich. Konkrete Zahlen sind abhängig von der eingesetzten Chemikalienmenge und der Anlagenkonfiguration.

Risiken für Tiere und Lebensräume: Laut Hersteller sind die Wasser 3.0 PE-X Materialien nach Tests als ökotoxikologisch unbedenklich eingestuft worden.²⁴

²² <https://wasserdreinull.de/blog/entfernung-von-mikroplastik-aus-dem-abwasser/> (26.11.2024).

²³ <https://www.chemanager-online.com/news/mikroplastik-aus-abwasser-mit-kieselgelen-entfernen> (26.11.2024).

²⁴ <https://analyticalscience.wiley.com/content/article-do/mikroplastik-entfernung-aus-industriellem-prozess-wasser#was.auth.SchuhenK> (12.02.2025).

2.2 Stationäre Technologien zur Entfernung von Plastik aus Gewässern

2.2.1 Technologietyp: Schwimmende, fest installierte Barrieren (Trash Booms)

Anwendungsgebiet: Fließgewässer

Zielbereich: Wasseroberfläche

Einsatzort und Operationsweise: stationär, passiv

Technische Funktionsweise: Die schwimmende Barriere ist zusammengesetzt aus miteinander verbundenen, schwimmfähigen Segmenten (oftmals aus Kunststoff). Sie wird über einen Fluss gespannt oder an strategischen Stellen platziert, um an der Wasseroberfläche treibenden Müll aufzufangen und zu verhindern, dass dieser weiter flussabwärts treibt und ins Meer gelangt. Die Barriere kann so positioniert werden, dass der aufgefangene Müll mit Hilfe der Strömung zu einer zentralen Sammelstelle geleitet wird. Die Entnahme des Mülls kann manuell oder mit Hilfe weiterer Technologie erfolgen (z. B. Boote, Kräne). Die Technologie ist variabel in ihrer Größe und im Design (Brouwer et al. 2023; Leone et al. 2023; Nikiema und Asiedu 2022).

Anwendungsbeispiele: Plastic Fischer GmbH (DE)²⁵, Orion Trash Boom (US)²⁶, Trash and Debris Booms der Firma Elastec (US)²⁷

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: Trash Boom von Plastic Fischer kam bis Ende 2022 an 29 Orten zum Einsatz, darunter Indien und Indonesien²⁸. Trash Booms werden in Europa z. B. in Belgien eingesetzt.²⁹

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9, werden kommerziell eingesetzt und sind auf globaler Ebene bereits recht weit verbreitet (Silva et al. 2021); Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Wirksamkeit unter verschiedenen Einsatzbedingungen (Blettler et al. 2023; vgl. Griffin et al. 2024).

Effizienz: Stark abhängig von den lokalen Bedingungen. Eine aktuelle Studie testete schwimmende Barrieren unter realen Bedingungen und ermittelte eine durchschnittliche Rückhaltung von 37 % des Makroplastiks. Dabei wurden unterschiedliche Abfallartikel unterschiedlich gut zurückgehalten: Styroporabfälle zu 100%, Lebensmittelverpackungen zu 40-20% und sinkender, unter der Wasseroberfläche treibender Müll gar nicht (Blettler et al. 2023).

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Makroplastik, genaue Größe nicht explizit angegeben
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Nicht bekannt
- **Energiebedarf:** Keiner
- **Komplexität der Technologie:** technisch einfache Lösung

Kosten (Installation und Wartung): Kosten für die Installation variieren je nach Flussbreite und eingesetzten Materialien. Die Barrieren bestehen meist aus Kunststoffelementen. Installationskosten können je nach Anbieter zwischen 2.000 und 30.000 USD liegen. Ingenieursfirmen wie Elastec aus den Vereinigten Staaten vertreiben die Trash Booms und bieten zudem die Installation, Instandhaltung und regelmäßige Entfernung des Plastikmülls an (Brouwer et al. 2023). Das US-Unternehmen „Osprey Initiative“ bietet Wartungsverträge für ca. 2.000

²⁵ <https://plasticfischer.com/> (09.01.2025).

²⁶ <https://www.solhutec.com/trashboom.html> (21.11.2024).

²⁷ <https://www.elastec.com/products/floating-boom-barriers/trash-debris-boom/> (12.02.2025)

²⁸ <https://plasticfischer.com/pages/story> (22.11.2024).

²⁹ <https://smartwatermagazine.com/news/ecocoast/longest-river-barrier-europe-removes-plastic-waterways> (21.11.2024).

USD monatlich für seine schwimmende Abfallbarrieren³⁰ an und übernimmt dabei auch zweimal pro Monat die Entfernung des Mülls (International Trash Trap Network 2024). Das Unternehmen „Plastic Fischer“ dagegen fokussiert sich explizit darauf, eine kostengünstige Lösung für Entwicklungsländer anzubieten und verwendet lokal verfügbare Materialien und lokal hergestellte Bauelemente (International Trash Trap Network 2024).

Nach einer wissenschaftlichen Einschätzung liegen die Kosten dieses Technologietyps bei 22,50 bis 30,10 USD pro Kilogramm entfernter Kunststoff (Nikiema und Asiedu 2022).

Risiken für Tiere und Lebensräume: Lebewesen können unter der Barriere durchschwimmen. Bei regelmäßiger Wartung und Leerung werden die Risiken gering eingeschätzt. Wenn sich viel Plastikmüll oder organisches Material über einen längeren Zeitraum ansammelt, können sich Lebewesen in der Barriere verfangen (Silva et al. 2021). Passiv an der Oberfläche treibende Organismen sowie Neuston und Pleuston könnten mitgefangen werden und sterben, wenn sie entfernt werden und dem Nahrungsnetz fehlen. Organisches Material wird mitgefangen und wenn es entfernt wird, fehlt es dem Ökosystem als Habitat oder Nahrung (vgl. Leone et al. 2022, 2023).



Abbildung 2: Schwimmende Müllbarriere an der Hanwell Bridge im Fluss Brent, Großbritannien. Foto von Nigel Cox, CC BY-SA 2.0, Quelle: Wikimedia Commons³¹

³⁰ <https://osprey.world/litter-boom> (09.01.2025).

³¹ <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9317454> (27.01.2025).

2.2.2 Technologietyp: Fest installierte Gitter-Barrieren und Maschennetze (Trash Racks)

Anwendungsgebiet: Fließgewässer

Zielbereich: Wasseroberfläche, Wassersäule

Einsatzort und Operationsweise: stationär, passiv

Technische Funktionsweise: Gitterkonstruktionen aus Metall (teilweise auch aus Kunststoff), die den Abfall blockieren und in eine fest installierte Vorrichtung leiten, bevor er flussabwärts fließt. Angesammelte Abfälle werden in der Regel manuell oder mechanisch durch Harken entfernt (Nikiema und Asiedu 2022).

Anwendungsbeispiele: Adelaide, Australien³²

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: In Deutschland eingesetzt als vor Wasserkraftanlagen installierte Rechen.³³

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9

Effizienz: Eine einfache Gitter-Barriere entfernt durchschnittlich schätzungsweise 2,55 kg Plastik pro Tag. Diese Zahl wurde im U.S.-amerikanischen Kontext erhoben (Nikiema und Asiedu 2022, S. 24568).

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Abhängig von der Gitter- bzw. Maschenweite.
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Bei Stürmen und höherem Wellengang können Kunststoffabfälle über die Gitterkonstruktionen gelangen (Nikiema und Asiedu 2022).
- **Energiebedarf:** Die mechanische Entfernung der Abfälle kann hohe Mengen an Energie erfordern (Nikiema und Asiedu 2022).
- **Komplexität der Technologie:** technisch einfache Lösung; erfordert den (möglicherweise aufwendigen) Einbau von festen Strukturen in das Wasserbett

Kosten (Installation und Wartung): Ca. zwischen 5 und 9 USD pro Kilogramm entfernter Plastikmüll (Nikiema und Asiedu 2022)

Risiken für Tiere und Lebensräume: Ein Gitter oder Maschennetz aus Metall oder Kunststoff, das von der Flussoberfläche bis zum Grund des Flussbettes reicht, kann die Bewegung von Fischen und größeren Wasserorganismen verhindern (Silva et al. 2021) und ihre Sterblichkeit erhöhen. Neben Abfällen bleibt viel organisches Material hängen, was den natürlichen Zustand des Flusses als Lebensraum verändern kann (Bergmann et al. 2023).

2.2.3 Technologietyp: Müllräder (Trash Wheels)

Anwendungsgebiet: Häfen, Flussmündungen, Ausläufe von Fließgewässern

Zielbereich: Wasseroberfläche

Einsatzort und Operationsweise: stationär, aktiv, ferngesteuert

Technische Funktionsweise: Den Fluss hinuntertreibende Abfälle werden mit Hilfe von Absperrungen zu einem fest installierten „Müllrad“-Schiff geleitet. An einem großen Wasserrad installierte Rechen heben die Abfälle auf ein Förderband, das diese dann aus dem Wasser

³² <https://www.greenadelaide.sa.gov.au/projects/removing-trash-gross-pollutant-traps> (09.01.2025).

³³ <https://www.zfk.de/entsorgung/abfallwirtschaft/wasserkraftanlagen-entsorgen-viel-plastikmuell-aus-gewaessern> (26.11.2024).

auf die Müllcontainer der Barge befördert. Das Wasserrad wird von der Flussströmung angetrieben und bei Bedarf zusätzlich durch Solarpaneele.³⁴

Anwendungsbeispiele: Baltimore Trash Wheel (US), CirCleaner (NL; etwas anderer Aufbau und Funktionsweise)³⁵

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: Eingesetzt im Hafen von Baltimore, USA, sowie in Panama.³⁶ Der CirCleaner wurde in den Niederlanden u. a. in Rotterdam installiert.³⁷

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9

Effizienz: Im Hafen von Baltimore entfernen 4 Anlagen ca. 500 Tonnen Abfälle pro Jahr.³⁸

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Das Baltimore Trash Wheel kann große und schwere Gegenstände aus dem Gewässer heben, wie Autoreifen oder Baumstämme. Die Technologie entfernt Makroplastik aus Gewässern, inklusive kleiner Teile wie Zigarettenfilter.³⁴ Der CirCleaner entfernt neben Makroplastik von 5 mm bis 90 cm auch Granulat von 2 – 5 mm Größe.³⁹
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Baltimore Trash Wheels sind so gebaut, dass sie starken Stürmen widerstehen. Die größten Mengen an Abfällen sammeln die Anlagen bei starken Regenfällen. An sonnigen Tagen kommt es häufig vor, dass die Anlagen ruhen und ihre Energiespeicher mit Sonnenenergie aufladen.⁴⁰
- **Energiebedarf:** Betrieben mit erneuerbaren Energien (Wasserkraft und Solarenergie)
- **Komplexität der Technologie:** Mittel

Kosten (Installation und Wartung): Bau und Installation kosten ca. 850.000 USD; Betrieb pro Jahr ca. 10.000 USD (International Trash Trap Network 2024).

Risiken für Tiere und Lebensräume: Risiken werden als gering eingestuft (Griffin et al. 2024). Rechen und Förderband des Baltimore Trash Wheels bewegen sich in einer sehr langsamen Geschwindigkeit, die es Tieren ermöglicht, auszuweichen bzw. zu entkommen⁴¹ (Silva et al. 2021). Passiv an der Oberfläche treibende Organismen sowie Neuston und Pleuston könnten mitgefangen werden und sterben, wenn sie entfernt werden und dem Nahrungsnetz fehlen. Organisches Material wird mitgefangen und wenn es entfernt wird, fehlt es dem Ökosystem als Habitat oder Nahrung (vgl. Leone et al. 2022, 2023).

³⁴ <https://www.mrtrashwheel.com/technology> (14.01.2025).

³⁵ <https://www.noria.earth/circleaner/> (09.01.2025).

³⁶ <https://www.ecowatch.com/renewable-energy-powered-wheel-trash-panama.html> (25.11.2024).

³⁷ <https://inspire-europe.org/solutions/circleaner-to-remove-nurdles-pellets-from-the-water/> (21.11.2024).

³⁸ <https://www.mrtrashwheel.com/trash-interception> (23.11.2024).

³⁹ <https://inspire-europe.org/solutions/circleaner-to-remove-nurdles-pellets-from-the-water/> (09.01.2025).

⁴⁰ <https://www.mrtrashwheel.com/trash-interception> (14.01.2025).

⁴¹ <https://www.mrtrashwheel.com/frequently-asked-questions> (14.01.2025).



Abbildung 3: Das Müllrad „Mr. Trash Wheel“ an der Mündung des Jones Falls River im inneren Hafen von Baltimore. Foto von Dicklyon, CC BY-SA 4.0, Quelle: Wikimedia Commons⁴²

2.2.4 Technologietyp: Schwimmende Mülleimer (Sea Bins)

Anwendungsgebiet: Häfen, Küsten, Binnengewässer

Zielbereich: Wasseroberfläche

Einsatzort und Operationsweise: stationär, aktiv

Technische Funktionsweise: Die schwimmenden Abfallbehälter können in ruhiger, geschützter Umgebung in Häfen oder Jachthäfen aufgestellt werden. Über einen Pumpmechanismus wird Wasser in die Vorrichtung gesaugt und dort gefiltert. Dadurch werden schwimmende Abfälle, einschließlich Plastik, von der Wasseroberfläche eingefangen. Neben Abfällen können mit der Technologie auch Öl, Brennstoffe und Reinigungsmittel abgefangen werden.⁴³

Anwendungsbeispiele: SeaBin Smart Tech (AUS)⁴⁴, SpillTech PortBin (NOR)⁴⁵

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: Wird in vielen Häfen weltweit bereits eingesetzt (Bergmann et al. 2023); über 860 SeaBins sind in 52 Ländern installiert (Winterstetter et al. 2021). Ein typischer Einsatzort sind kleinere Häfen (z. B. Yacht- und Sporthäfen), wo die

⁴² https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mr._Trash_Wheel--Baltimore_MD.jpg (27.01.2025).

⁴³ <https://www.weforum.org/stories/2022/09/seabin-how-these-floating-garbage-bins-can-help-clean-up-our-waters/> (10.01.2025).

⁴⁴ <https://seabin.io/how> (20.11.2024).

⁴⁵ <https://businessnorway.com/solutions/spilltech-portbin-for-floating-waste-collection-at-ports> (21.11.2024).

schwimmenden Mülleimer aus ästhetischen Gründen eingesetzt werden und weil Plastikabfälle den Kühlwassereinlass von Schiffen blockieren können (Parker-Jurd et al. 2022).

Inzwischen kommen SeaBins auch in vielen deutschen Häfen zum Einsatz. So sind in Bremerhaven zwei SeaBins im Einsatz. Der Einsatz des Geräts wurde mit Bildungsmaßnahmen kombiniert: Schülerinnen und Schülern haben die Müllteile aus der SeaBin und mögliche -quellen untersucht und mit diesem Projekt am Wettbewerb „Jugend forscht“ teilgenommen.⁴⁶

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9, wird kommerziell eingesetzt; der Einsatz der schwimmenden Mülleimer wird in Australien mit Bildungsprojekten und einer wissenschaftlichen Datenanalyse kombiniert.⁴⁷

Effizienz: Durchschnittlich 3,9 kg Abfälle pro Tag entfernt bzw. 1,4 Tonnen pro Jahr (Winterstetter et al. 2021). In einer Fallstudie im Südwesten Großbritanniens wurden durchschnittlich 58 Abfallteile pro Tag aus dem Gewässer entfernt (Parker-Jurd et al. 2022). Das Modell SeaBin V5 kann 600.000 Liter Wasser pro Tag filtern.⁴⁸ Das Auffangbehältnis umfasst ca. 20 kg Plastikmüll und sollte täglich geleert werden.

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Makro- und Mikroplastik, einschließlich Kunststoffpellets und -fragmente, von ca. 0,1 bis 90 cm (Parker-Jurd et al. 2022)
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Konzipiert für den Einsatz in geschützten und ruhigen Gewässern. Zu starke Strömungen und zu hohe Wellen können die Filterleistung beeinträchtigen.
- **Energiebedarf:** Für die Pumpe wird Strom benötigt. Beim Modell V5 der SeaBin liegt der Stromverbrauch bei etwa 3,40 AUD pro Tag⁴⁴; für Deutschland wird er auf 3,60 € geschätzt.⁴⁹ Sofern die entsprechende Infrastruktur vorhanden ist, kann die Pumpe mit Solarenergie betrieben werden.
- **Komplexität der Technologie:** Gering

Kosten (Installation und Wartung): Ein SeaBin kostet ca. 6.000 USD (wird inzwischen nicht mehr für den kommerziellen Verkauf hergestellt, stattdessen Vermietung/Dienstleistung) (International Trash Trap Network 2024). Eine wissenschaftliche Studie stuft den Wartungsaufwand als unverhältnismäßig ein, auch da viel organisches Material wie Blätter und Äste eingesaugt werden (Parker-Jurd et al. 2022). Bei einer hohen Verschmutzung des Gewässers mit Plastikmüll müsste der relativ kleine Behälter sehr häufig geleert werden, daher wären in diesem Fall andere Technologien geeigneter. Nach bisherigen Erfahrungsberichten erscheinen die eingesetzten schwimmenden Mülleimer geeignet für das Müllaufkommen in deutschen Häfen und der Arbeitsaufwand für die Leerung handhabbar.⁵⁰

Risiken für Tiere und Lebensräume: Für die SeaBins wurde eine hohe Beifangrate nachgewiesen (Griffin et al. 2024). In einer Fallstudie wurde im Durchschnitt 13 aquatische Lebewesen pro Tag von dem Pumpmechanismus eingefangen, wovon etwa die Hälfte zum Zeitpunkt der Entleerung bereits tot waren (Parker-Jurd et al. 2022). Eine Fallstudie in Fidji zeigte, dass über 90 % des gesammelten Materials organischen Ursprungs war, einschließlich Mangrovensamen, die für die Aufforstung der ökologisch wichtigen Mangrovenwälder benötigt werden (Paris et al. 2022).

⁴⁶ <https://www.bremenports.de/magazin/seabin> (10.01.2025).

⁴⁷ <https://seabinfoundation.org/programs-citizen-science/> (10.01.2025).

⁴⁸ <https://storymaps.arcgis.com/stories/632a03486d7b4913896e71231de06c4d> (10.01.2025).

⁴⁹ nports.nachhaltigkeit-projekt-seabin-broschuere.pdf (10.01.2025).

⁵⁰ <https://www.rnd.de/wissen/plastikmuell-in-der-nordsee-seabin-projekt-schwimmende-muelleimer-befreien-haefen-von-plastikmuell-MVQYVPRSJZMMDBA3YQ5LI4YI5I.html> (12.02.2025).

2.2.5 Technologietyp: Luftblasenvorhang

Anwendungsgebiet: Fließgewässer, Häfen

Zielbereich: Wasseroberfläche, Wassersäule

Einsatzort und Operationsweise: stationär, aktiv

Technische Funktionsweise: Auf dem Boden des Gewässers verlegte Rohre erzeugen einen Luftblasenschleier. Dadurch entsteht eine Aufwärtsströmung, die Kunststoffabfälle an die Oberfläche leitet. Die Luftblasenbarriere wird diagonal im Fluss platziert, sodass die natürliche Strömung den Plastikmüll zur Seite und in ein Auffangsystem leitet, von wo es entnommen werden kann.⁵¹

Anwendungsbeispiele: The Great Bubble Barrier (NL) – patentiert, InvisiBubble (FRA)⁵²

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: Geeignet für den Einsatz in Häfen, da Schiffe den Luftblasenvorhang ungehindert passieren können. Zuerst in Amsterdam installiert am Westerdokkanal; inzwischen an 5 Standorten, z. B. am Auslass einer Kläranlage in Wervershoof, im Seehafen Harlingen und in Vila do Conde in Portugal.⁵³ Die Technologie ist sowohl geeignet für größere Flüsse (in Amsterdam hat die Luftblasenbarriere eine Länge von 200 m) als auch kleinere Fließgewässer und Kanäle. Voraussetzung ist eine geeignete (möglichst ebene) Beschaffenheit des Flussbetts (Silva et al. 2021).

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9. Derzeit wird bei der Anlage in Wevershoof erforscht, wie effektiv Mikroplastikpartikel kleiner als 0,5 mm eingefangen werden.⁵⁴

Effizienz: Die Anlage in Amsterdam sammelt ca. 80 kg bzw. 15.500 Abfallteile pro Monat.⁵⁵ Mit der Technologie werden 86 % des an der Oberfläche treibenden Plastikmülls eingefangen⁵⁶ und ca. 50 % des in der Wassersäule treibenden Plastikmülls (International Trash Trap Network 2024)

- **Entfernbarer Plastikgröße:** 1 mm bis 1 m⁵⁷
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Nicht explizit angegeben
- **Energiebedarf:** Die Anlage in Amsterdam verbraucht in etwa genauso viel Energie wie eine elektrische Kehrmaschine in den Niederlanden und wird mit erneuerbaren Energien betrieben.⁵⁸ Genauere Angaben sind nicht veröffentlicht.
- **Komplexität der Technologie:** Hoch.

Kosten (Installation und Wartung): Ca. 350.000 EUR, abhängig von den jeweiligen Standortbedingungen.⁵⁹

Risiken für Tiere und Lebensräume: Risiken werden als gering eingestuft. Mit der Technologie werden sehr kleine Luftblasen erzeugt, sodass Fische theoretisch sicher hindurchschwimmen können. Zusätzlich gibt es einen Abschnitt ohne Luftblasen, die als Fischpassage dient. Die Luftblasen erzeugen keinen Lärm und können sogar den von durchfahrenden Schiffen erzeugten Lärm reduzieren. Als positiven Nebeneffekt kann die Technologie den Sauerstoffgehalt des Gewässers leicht erhöhen.⁶⁰ Ein interviewter Experte befürchtete aber,

⁵¹ <https://thegreatbubblebarrier.com/> (25.11.2024).

⁵² <https://searial-cleaners.com/bubble-barrier/> (10.01.2025).

⁵³ <https://thegreatbubblebarrier.com/projects/> (25.11.2024).

⁵⁴ <https://thegreatbubblebarrier.com/technology/> (26.11.2024).

⁵⁵ <https://thegreatbubblebarrier.com/impact-bubble-barrier-amsterdam/> (26.11.2024).

⁵⁶ <https://thegreatbubblebarrier.com/technology/> (26.11.2024).

⁵⁷ <https://thegreatbubblebarrier.com/technology/> (26.11.2024).

⁵⁸ <https://thegreatbubblebarrier.com/technology/> (10.01.2025).

⁵⁹ <https://thegreatbubblebarrier.com/technology/> (10.01.2025).

⁶⁰ <https://thegreatbubblebarrier.com/fish-and-bubble-barriers/> (10.01.2025).

dass sich durch die Luftblasenvorhänge Strömungen ändern könnten (Interview 5). In der Folge könnten Fische anders wandern oder sich Nährstoffe anders verteilen. Dies könnte wiederum negative Auswirkungen auf die Nahrungskette haben. Unklar bleibt auch, ob passiv an der Oberfläche treibendes organisches Material, Organismen sowie Neuston und Pleuston in das Auffangsystem geleitet und entfernt werden.

2.3 Mobile Technologien zur Entfernung von Plastik aus Gewässern

2.3.1 Technologietyp: Müllsammelboote mit Netzen oder Körben

Anwendungsgebiet: Binnengewässer, Küsten, Meere

Zielbereich: Wasseroberfläche, Wassersäule

Einsatzort und Operationsweise: mobil, mit Besatzung

Technische Funktionsweise: Fahrende Boote fangen schwimmenden Plastikmüll ein und sammeln diesen in Netzen, Körben oder anderen Behältern.

Anwendungsbeispiele: OC-Tech (ES), SeeKuh I (DE)

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: Einsatz in Binnengewässern

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9

Effizienz:

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Nicht explizit angegeben
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Nicht explizit angegeben
- **Energiebedarf:** Nicht explizit angegeben
- **Komplexität der Technologie:** Mittel. Besatzung erforderlich für Steuerung und Entnahme der gesammelten Abfälle.

Kosten (Installation und Wartung): Nicht explizit angegeben. Kostenfaktor: Eine Besatzung ist erforderlich für die Steuerung und Entnahme der gesammelten Abfälle. Der Schiffsbetrieb erfordert Energie und könnte je nach Antriebsart CO₂ und andere Schadstoffe erzeugen.

Risiken für Tiere und Lebensräume: Risiken können gering gehalten werden, indem von den Müllsammelbooten gezielt Akkumulationszonen mit einer hohen Dichte an Plastikmüll aufgesucht werden. Dennoch kann Beifang von Lebewesen und organischem Material ein Risiko darstellen (Silva et al. 2021). Die SeeKuh fährt in sehr geringem Tempo, damit große Lebewesen ausweichen können.⁶¹ Passiv an der Oberfläche treibende Organismen sowie Neuston Organismen können mitgefangen werden und sterben, wenn sie entfernt werden und dem Nahrungsnetz fehlen.

Sofern die Boote mit fossilen Energieträgern angetrieben werden, entsteht eine zusätzliche Umweltbelastung (Verschmutzung, Treibhausgasemissionen) (Silva et al. 2021).

⁶¹ <https://oneearth-oneocean.com/die-loesung/die-seekuh/> (26.11.2024).

2.3.2 Technologietyp: Müllsammelboote mit Förderbandtechnik

Anwendungsgebiet: Fließgewässer, Küstengewässer

Zielbereich: Wasseroberfläche

Einsatzort und Operationsweise: mobil, mit Besatzung

Technische Funktionsweise: Fahrende Boote (häufig Katamarane) nutzen Leitpfosten oder verstellbare Hydraulikarme, um Abfälle an der Wasseroberfläche auf ein Förderband zu leiten und so einzufangen.

Anwendungsbeispiele: SeeHamster (DE), Circular Explorer (ehemals SeeKuh II, DE), CollectiX (DE, Start-Up everwave)

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: Die Circular Explorer wurde z. B. in der Ostsee eingesetzt, um Geisternetze aus dem Meer zu bergen.⁶² Die Technologie eignet sich für den akuten Einsatz nach Hochwasserereignissen. So wurde z. B. CollectiX-Boote 2021 in Deutschland beim Hochwasser in der Eifel eingesetzt und 25 Tonnen Abfälle aus dem Wasser entfernt.⁶³

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9. Ein aktueller Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung von KI-gestützten Systemen, um die Plastikmüllverteilung besser zu verstehen und gezieltere Einsätze der Müllsammelboote zu planen.⁶⁴

Effizienz: CollectiX-Boote sammeln bis zu fünf Tonnen Material pro Tag (einschließlich Plastikmüll, organisches Material). Eine Drohne unterstützt das Auffinden von Müll- Akkumulationszonen.⁶⁵ Mit dem Circular Explorer können am Tag bis zu vier Tonnen Plastikmüll aus Flüssen entfernt werden.⁶⁶

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Nicht explizit angegeben
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Nicht explizit angegeben
- **Energiebedarf:** Nicht explizit angegeben
- **Komplexität der Technologie:** Nicht explizit angegeben

Kosten (Installation und Wartung): Nicht explizit angegeben. Kostenfaktor: Eine Besatzung ist erforderlich für die Steuerung und Entnahme der gesammelten Abfälle.

Risiken für Tiere und Lebensräume: Risiken können gering gehalten werden, indem von den Müllsammelbooten gezielt Akkumulationszonen mit einer hohen Dichte an Plastikmüll aufgesucht werden. Dennoch kann Beifang von Lebewesen und organischem Material ein Risiko darstellen (Silva et al. 2021) und scheinbar sammeln sich in manchen Gebieten aufgrund der Strömung besonders viele Tiere dort, wo sich auch Plastikmüll anreichert (Chong et al. 2023). Sowohl auf den SeeHamstern, als auch auf der Circular Explorer wird das gesammelte Material direkt auf dem Fahrzeug von Hand sortiert und Beifang zurück ins Gewässer befördert (Interview 8).⁶⁷ Der Beifang ist aber äußerst gering, durch die geringe Geschwindigkeit haben mobile Lebewesen Zeit zu entkommen. Falls ein Krebs (Ostsee) oder eine Schildkröte (Indonesien) auf dem Förderband landet, werden diese zurück ins Wasser befördert (Interview 5).

⁶² <https://oneearth-oneocean.com/die-loesung/circular-explorer-by-oeoo-holcim/> (26.11.2024).

⁶³ <https://everwave.de/impact/> (13.01.2025).

⁶⁴ <https://everwave.de/projekte/> (13.01.2025).

⁶⁵ <https://www.umweltdialog.de/de/umwelt/plastik-muell/2023/Plastikfreie-Fluesse-fuer-saubere-Meere.php> (27.11.2024).

⁶⁶ <https://oneearth-oneocean.com/die-loesung/circular-explorer-by-oeoo-holcim/> (26.11.2024).

⁶⁷ <https://oneearth-oneocean.com/die-loesung/circular-explorer-by-oeoo-holcim/> (26.11.2024).

2.3.3 Technologietyp: Müllsammelroboter und -drohnen

Anwendungsgebiet: Häfen, Binnengewässer, Küstengewässer

Zielbereich: Wasseroberfläche

Einsatzort und Operationsweise: mobil, ferngesteuert oder autonom

Technische Funktionsweise: Mobile Systeme zur Sammlung von Plastikmüll an der Wasseroberfläche, die entweder ferngesteuert werden oder weitgehend autonom arbeiten.

Anwendungsbeispiele: WasteShark (NL), Jellyfishbot (FRA), Bluephin (UAE)

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: Der WasteShark sammelt an der Oberfläche treibendes Makro- und Mikroplastik in Häfen und Kanälen ein (International Trash Trap Network 2024).

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9

Effizienz: Mit einem Jellyfishbot können in einem Hafen mindestens 3 Tonnen Abfall im Jahr gesammelt werden, wenn das Gerät nur zweimal pro Woche eingesetzt wird.⁶⁸ Aufgrund der geringen Größe der Geräte müssen die Sammelbehälter häufig geleert werden.

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Makro- und Mikroplastik
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Nicht explizit angegeben
- **Energiebedarf:** Nicht explizit angegeben
- **Komplexität der Technologie:** Nicht explizit angegeben

Kosten (Installation und Wartung): Der WasteShark kostet ca. 23.600 USD (International Trash Trap Network 2024).

Risiken für Tiere und Lebensräume: Gering. Da die meisten Modelle an der Wasseroberfläche bleiben und es sich um Geräte von geringer Größe und Gewicht handelt, werden Lebewesen unter Wasser vermutlich nicht gestört (Silva et al. 2021). Auswirkungen auf kleine, passiv treibende Organismen an der Wasseroberfläche sind bislang nicht erforscht.

2.3.4 Technologietyp: Tauchroboter zur Müllsammlung

Anwendungsgebiet: Binnengewässer, Küstengewässer, Ozean

Zielbereich: Wassersäule, Flussbett, Meeresboden

Einsatzort und Operationsweise: mobil, ferngesteuert oder autonom

Technische Funktionsweise: Mobile Systeme zum Aufspüren und Sammeln von Kunststoffabfällen auf dem Gewässergrund und teilweise in der Wassersäule, die entweder ferngesteuert werden oder autonom arbeiten.

Beim **SeaClear-System** soll ein Team von autonomen Robotern eingesetzt werden: Ein unbemanntes Überwasserfahrzeug (SeaCat) sucht den Meeresboden ab und markiert auf einer digitalen Karte alle großen Müllteile, die es findet. In klarem Wasser sucht eine Drohne aus der Luft nach Müll und kartiert diesen ebenfalls. Ein Beobachtungsroboter (MiniTortuga) erfasst unter Wasser die Verteilung von Abfällen. Ein zweiter Tauchroboter (Tortuga-ROV) sammelt die Abfälle mit einem Greifer ein und legt sie in einen Sammelbehälter (ebenfalls unter Wasser) ab. Die Komponenten arbeiten zusammen und nutzen künstliche Intelligenz zur

⁶⁸ <https://solarimpulse.com/solutions-explorerer/jellyfishbot-1> (27.01.2025).

Objekterkennung, um Abfälle unter Wasser effizient zu entfernen⁶⁹, die Unterwasserroboter sind mit einem Kabel mit dem Basisschiff verbunden und werden ferngesteuert.⁷⁰

Anwendungsbeispiele: SeaBed Cleaning Platform – patentiert, SeaClear System (EU-Projekt)

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: SeaClear Roboter sind einsetzbar sowohl in klaren als auch in trüben Gewässern; bisher wurde die Technologie im Hamburger Hafen und in Dubrovnik (Kroatien) getestet. Für das anknüpfende Projekt SeaClear 2 ist der Einsatz im Mittelmeerraum geplant.⁷¹ Da diese Technologie teuer ist (aufwändig in Herstellung und Betrieb), wird eine hohe Dichte an Plastikmüll benötigt, um effektiv und effizient arbeiten zu können. Denkbar sind Akkumulationszonen in Häfen, Fahrrinnen, an Brücken und anderen Hindernissen, sowie an Verklappungsstellen. Mit dem System kann Müll in einer Tiefe von bis zu 10 m eingesammelt werden.⁷²

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 6 (SeaBed Cleaning Platform)

Effizienz:

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Makroplastik ab 5 mm Größe (Parascanu et al. 2025)
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Technologie kann von Strömungen beeinflusst werden⁷³
- **Energiebedarf:** Nicht explizit angegeben
- **Komplexität der Technologie:** Sehr hoch; Einsatz Künstlicher Intelligenz (KI) und Zusammenspiel verschiedener technologisch anspruchsvoller Komponenten. Expert:innen der Seafloor Litter Monitoring Expert Group (JRC) bezweifeln, dass dieses System jemals funktionieren wird (M. Bergmann, pers. Komm.).

Kosten (Installation und Wartung): Nicht explizit angegeben.

Risiken für Tiere und Lebensräume: SeaClear achtet nach eigenen Angaben auf den Erhalt der Biodiversität und hat Struktur des Greifers so konzipiert, dass Unterwasserlebewesen entkommen können.⁷⁴

Die SeaBed Cleaning Platform nutzt fossile Energieträger, was zu Treibhausgasemissionen (Parascanu et al. 2025). Risiken für Tiere und Lebewesen sind nicht explizit angegeben, jedoch sollte die selektive Sammlung von Müll kaum Beifang generieren. Tiere, die das Plastik besiedeln (z.B. Korallen und Schwämme), werden jedoch mit eingesammelt.

⁶⁹ https://seaclear-project.eu/about-main/about-seaclear?utm_source=chatgpt.com (20.01.2025).

⁷⁰ <https://www.hamburg-port-authority.de/de/aktuelles-presse/default-1964f4d883c5adba0c103b292ba41530> (12.02.2025).

⁷¹ <https://www.hamburg-port-authority.de/de/aktuelles-presse/default-1964f4d883c5adba0c103b292ba41530> (27.01.2025).

⁷² <https://www.hamburg-port-authority.de/de/aktuelles-presse/default-1964f4d883c5adba0c103b292ba41530> (12.02.2025).

⁷³ <https://www.tum.de/aktuelles/alle-meldungen/pressemitteilungen/details/roboter-sammeln-unterwasser-muell-auf> (27.01.2025).

⁷⁴ <https://www.hamburg-port-authority.de/de/aktuelles-presse/default-1964f4d883c5adba0c103b292ba41530> (27.01.2025).

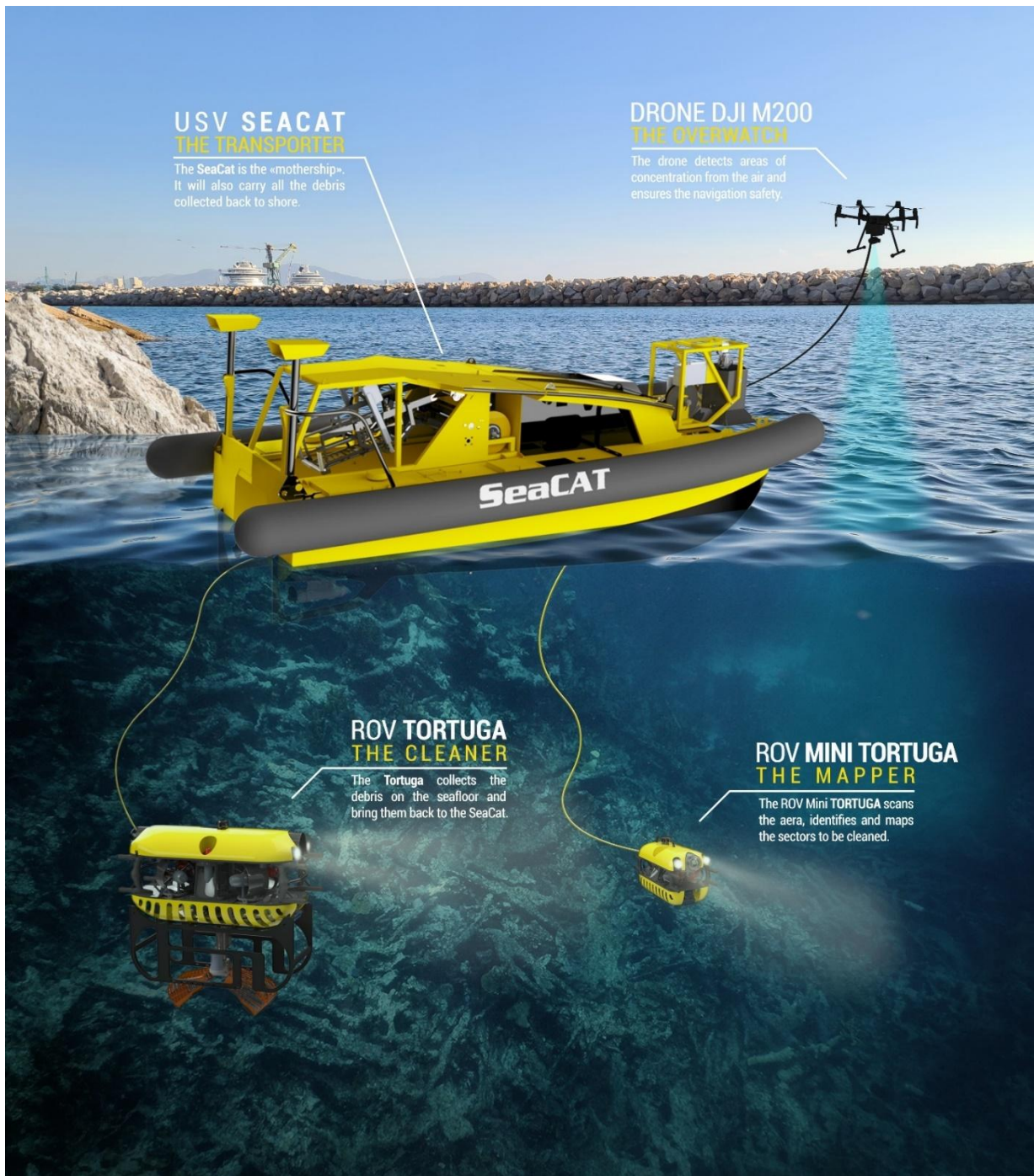


Abbildung 4: Darstellung des SeaClear Systems mit mehreren autonomen Komponenten. Quelle: Sea-clear Project⁷⁵

⁷⁵ <https://seaclear-project.eu/news/media-kit> (27.01.2025).

2.3.5 Technologietyp: Schleppnetze

Anwendungsgebiet: Küstengewässer, Ozean

Zielbereich: Wasseroberfläche, Wassersäule, (Sediment)

Einsatzort und Operationsweise: mobil, aktiv

Technische Funktionsweise: Schleppnetze, die eingesetzt werden, um Plastikmüll aus Gewässern zu entfernen. Sie können von verschiedenen Schiffstypen gezogen werden (Moulaert et al. 2021).

Anwendungsbeispiele: Thomsea (FR) - patentiert

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: Einsatz an Küsten und im offenen Meer

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9

Effizienz:

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Nicht explizit angegeben
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Nicht explizit angegeben
- **Energiebedarf:** Die Schiffe, die die Vorrichtung durch das Wasser ziehen, benötigen Energie
- **Komplexität der Technologie:** Nicht explizit angegeben. Unfallgefahr für die Crew, wenn Schleppnetze oder andere Vorrichtungen sich an größerem Müll am Meeresgrund verfangen (Cho 2011)

Kosten (Installation und Wartung): Nicht explizit angegeben

Risiken für Tiere und Lebensräume: Der Einsatz von Schleppnetzen am Meeresgrund bedeutet ein sehr hohes Risiko für Beifang und Sterblichkeit von Beifang. Wie in der Fischerei zerstören Schleppnetze den Lebensraum aller Lebewesen, die den Meeresboden bewohnen (Collie et al. 2000; Donnan 2001).

2.3.6 Technologietyp: Von Schiffen gezogene schwimmende Barrieren

Anwendungsgebiet: Küstengewässer, Ozean

Zielbereich: Wasseroberfläche

Einsatzort und Operationsweise: Mobil, aktiv

Technische Funktionsweise: Große schwimmende Barrieren werden von Schiffen durch das offene Meer gezogen, um Plastikmüll an der Wasseroberfläche einzusammeln.

Anwendungsbeispiele: The Ocean Clean-Up (NL), Holy Turtle (US)

Bisherige Einsatzorte und Kontexte: Einsatz im Pazifik

Reifegrad und Entwicklungspotenziale: TRL 9

Effizienz: Das Ocean Clean-Up System 002 hat im Jahr 2022 nach Angaben des Betreibers insgesamt 153,000 kg Kunststoffabfälle (Makroplastik) aus dem Pazifik entfernt. Das System war 150 Tage unterwegs.⁷⁶

⁷⁶ <https://theoceancleanup.com/updates/system-002-signs-off-for-2022-redeployment-in-spring-2023/> (26.11.2024).

Der Aufwand für eine groß angelegte Sammlung wäre enorm: 200 Geräte von The Ocean Clean-Up mit einer Laufzeit von 130 Jahren würden weltweit schätzungsweise nur 5% der Kunststoffe an der Meeresoberfläche erfassen (Hohn et al. 2020).

- **Entfernbarer Plastikgröße:** Nicht explizit angegeben
- **Einfluss von Wetterbedingungen:** Nicht explizit angegeben
- **Energiebedarf:** Die zwei großen Schiffe, die die Vorrichtung im derzeitigen Setup durch das Wasser ziehen, benötigen Energie
- **Komplexität der Technologie:** Bei der schwimmenden Barriere handelt es sich um eine einfache Konstruktion, die Navigation der Schiffe erfordert eine entsprechende Ausbildung und Fachkenntnisse.

Kosten (Installation und Wartung): Nicht explizit angegeben

Risiken für Tiere und Lebensräume: Negative Auswirkungen auf das Neuston vermutet (Bergmann et al. 2023; Falk-Andersson et al. 2020; Spencer et al. 2023). Das Neuston ist die Gesamtheit der Organismen, die an oder direkt unter der Oberfläche von Gewässern leben. Im offenen Ozean ist das Neuston bislang weitgehend unerforscht, scheint sich aber genau dort anzureichern, wo auch mehr Müll treibt (Chong et al. 2023). Ein einziges TOC-Gerät, das ein Jahr lang in Betrieb ist, kann 675 Tonnen Zooplankton beeinträchtigen (Falk-Andersson et al. 2020).

2.4 Risiken und unbeabsichtigte ökologische Auswirkungen

Hauptmotivation für die Entfernung von Kunststoffabfällen aus Gewässern ist es, Schäden für Infrastruktur und Schiffe sowie Ökosysteme und die menschliche Gesundheit zu verringern. Jedoch stellt die Entfernung mithilfe von Technologien selbst einen Eingriff in die Ökosysteme dar und kann negative Umweltauswirkungen haben (Falk-Andersson et al. 2023; Griffin et al. 2024), u.a. weil die Technologien nicht zwischen Plastik, aquatischem Leben und organischem Material unterscheiden (Environmental Investigation Agency & Ocean Care 2023). Viele Risiken und unbeabsichtigte ökologische Auswirkungen treffen auf alle TEK zu, manche aber nur auf bestimmte Technologietypen oder bestimmte Anwendungsgebiete (z. B. Flüsse vs. Meere). Im Folgenden gehen wir zunächst auf allgemeine Risiken und ökologische Auswirkungen ein, bevor wir die einzelnen Technologietypen betrachten.

2.4.1 Akkumulationszonen und generelle unbeabsichtigte ökologische Auswirkungen

Verschiedene Forschungsteams haben darauf hingewiesen, dass bisher nur sehr wenige Informationen über unbeabsichtigte ökologische Auswirkungen von TEK vorliegen. So stellten Bellou und Kolleg:innen (2021) in ihrer Studie fest, dass Technologieanbieter in der Regel kaum Informationen zu den Umweltwirkungen ihrer Geräte oder Technologien veröffentlichen. Falk-Andersson et al. (2020) zeigten, dass Umweltwirkungen in der Entwicklungsphase von Technologien oft nicht bedacht und berücksichtigt werden. Auch eine Übersichtsstudie, die Ende 2024 veröffentlicht wurde, bemängelt, dass die ökologischen Auswirkungen von TEK nicht ausreichend erforscht seien. Von 102 in der Studie betrachteten Technologien (einschließlich solcher zur Reinigung von Stränden) lagen nur für fünf Technologien unabhängige Studien zu den Umweltauswirkungen vor (Griffin et al. 2024, S. 10), also für weniger als fünf Prozent. Auch die interviewten Expert:innen geben an, dass die ökologischen Auswirkungen nicht ausreichend unabhängig untersucht seien (Interview 4, Interview 5). Darüber hinaus sind einige ökologischen Auswirkungen nur schwer messbar, da sie indirekter Natur sind. So

führt z. B. das Fehlen von Algen, die als Beifang aus dem Ökosystem entnommen werden, zu einer Lücke im Nahrungssystem und verringert zudem die CO₂-Bindung.

Unabhängig vom einzelnen Technologietyp ist es wichtig zu verstehen, dass Plastikmüll von Organismen besiedelt wird und dass sich Plastikmüll, organisches Material und Meereslebewesen aufgrund bestimmter Strömungen oft in denselben Regionen (z. B. im Nordpazifischen Hochseegebiet) oder an bestimmten Stellen (z. B. an Brückenpfeilern) ansammeln. Besonders ausgeprägt ist dieses Phänomen im Nordpazifischen Hochseegebiet, das umgangssprachlich als *Great Pacific Garbage Patch* bezeichnet wird. Hier bewirken Meeresströmungen und -wirbel gleichermaßen eine Konzentration von Plastik und von Meereslebewesen, wodurch sich beide in bestimmten Bereichen sammeln und akkumulieren (Chong et al. 2023; Environmental Investigation Agency & Ocean Care 2023, Interview 4). Allerdings ist diese Konzentration relativ zur enormen Größe des Ozeans zu betrachten. Lediglich ein bis fünf Prozent des Meeresmülls sammeln sich in der Nordpazifische Akkumulationszone (Interview 4). Verteilt auf die Größe eines Fußballfeldes (ca. 7.000 m²) befindet sich dort demnach die Plastik-Menge, die in etwa einer PET-Flasche entspricht (ca. 50 Gramm) (Interview 8). Empirische Analysen von Lebreton et al. (2018) zeigen, dass sich die Kunststoffdichte in dieser Zone auf durchschnittlich 350 Gramm pro 7.000 m² beläuft, was etwa der Masse von sieben PET-Flaschen entspricht. Egger et al. (2022) ermittelten 70 bis 700 g pro 7.000 m². Diese Werte bestätigen qualitative Einschätzungen, die das Gebiet eher als „Plastiksuppe“ (Interview 8), denn als dichten Teppich aus schwimmenden Plastikmülls beschreiben. Zu einer ähnlichen Einschätzung kommt eine Studie von Rynek und Kolleg:innen (Rynek et al. 2024), die außerdem zeigt, dass Plastikteile auch außerhalb bekannter Akkumulationszonen in vergleichbar hohen Konzentrationen auftreten und über riesige Areale verbreitet sind. Meeresgebiete in der Nähe sog. Emissionshotspots, beispielsweise an Flussmündungen in Deutschland oder an großen Flüssen in Südostasien, weisen höhere lokale Konzentrationen von Mikro- und Makroplastik auf (vgl. Mani et al. 2015, Schmidt et al. 2017), wobei ein direkter Vergleich schwierig ist, da in den Studien unterschiedliche Einheiten verwendet werden (kg pro km², t/y und Partikelanzahl pro km²). Die sog. *Garbage Patches* fungieren als langfristige Akkumulationszonen, und werden somit mit der Zeit zu den am stärksten belasteten Regionen (Van Sebille et al. 2012).

Zudem fungieren Bereiche des Nordpazifischen Hochseegebietes laut wissenschaftlicher Forschung als Senke für Plastikmüll: Ein erheblicher Anteil des dort gesammelten Abfalls zerkleinert sich, wird besiedelt und sinkt schließlich auf den Meeresboden (Van Sebille et al. 2020). Weitere Studien bestätigen, dass Plastikobjekte mit höherer Dichte als Meerwasser absinken und durch physikalische und biologische Prozesse weiter transportiert werden (Egger et al. 2022). Die obigen Zahlen beziehen sich lediglich auf den an der Oberfläche treibenden Plastikmüll, der jedoch nur einen Bruchteil des Gesamtmülls ausmacht. Dies ist insofern relevant, als dass viele TEK primär auf Oberflächenmüll abzielen und die tatsächliche Umweltbelastung so nur teilweise adressieren. (Egger et al. 2020). Wie in der Einleitung bereits erwähnt, gibt es noch keine Definition von „Hotspot“. Eine Definition wäre auch davon abhängig, welcher Maßstab betrachtet wird bzw. ob räumliche oder zeitliche Settings betrachtet werden (Tasseron et al. 2024).

Ein besonders kritischer Faktor ist die Zusammensetzung des Mülls im Nordpazifischen Hochseegebiet: Ein großer Anteil besteht aus langlebigen Fischereinetzen und anderen Geisernetzen, die jahrzehntelang in diesen Strömungswirbeln treiben und durch ihre Größe und Stabilität eine massive Gefahr für Meereslebewesen darstellen (Lebreton et al. 2018).

Auch in Küstenregionen (z. B. Hawaii) konzentrieren sich auf Grund z. B. bestimmter Strömungen sowohl Lebewesen als auch Müll: Fast 100 Prozent der größeren Fischlarven und über 95 Prozent des schwimmenden Plastikmülls befinden sich in den ruhigeren Zonen des

Oberflächenabflusses (sog. *Slicks*). Diese machen jedoch nur acht Prozent der Meeresoberfläche aus, was die Trennung von (Mikro-)Plastik und aquatischem Leben stark erschwert (Whitney et al. 2021). Ökosystemmodelle zeigen, dass groß angelegte Säuberungsaktionen auf hoher See insbesondere mit Schleppnetzen, zu erheblichen Umweltschäden durch Beifang führen können, die in bestimmten Regionen zu einem möglichen Rückgang oder sogar zum Aussterben von Populationen führen können (Spencer et al. 2023, Interview 4).

Es gibt eine kleine Anzahl wissenschaftlicher Publikationen, die die ökologischen Auswirkungen von TEK genauer untersucht haben (Bergmann et al. 2023; Falk-Andersson et al. 2020, 2023; Leone et al. 2022). Demnach gehört zu den häufigsten ökologischen Risiken

- **Beifang:** Fische oder andere Wasserlebewesen werden durch die TEK unbeabsichtigt gefangen und/oder aus dem Wasser geholt (z. B. bei mobilen TEK),
- die **Entfernung von organischem Material:** Algen, Seegras oder Neuston werden durch die TEK unbeabsichtigt gefangen und/oder aus dem Wasser geholt (z. B. bei mobilen oder stationären TEK),
- die **Zerstörung von Lebensräumen:** Korallenriffe am Meeresboden oder Algenmatten an der Wasseroberfläche oder in der Wassersäule werden durch TEK zerstört (z. B. bei mobilen TEK).

Hinzu kommt – je nach Technologie – noch die Umweltauswirkung der Technologie selbst, z. B. die Klimaauswirkung großer, schwerer, dieseldetriebener Schiffe auf hoher See, die nicht nur zum CO₂-Ausstoß, sondern auch zur Lärmbelastung beitragen (Interview 4). Würden diese TEK skaliert eingesetzt, könnten sich diese Auswirkungen potenzieren.

2.4.1 Risiken und unbeabsichtigte ökologische Auswirkungen bei der Plastikentfernung aus Abwässern

Uns sind keine begutachteten, veröffentlichten, wissenschaftlichen Untersuchungen zu unbeabsichtigten ökologischen Auswirkungen bei der Plastikentfernung aus Abwässern bekannt. Grundsätzlich ist es jedoch so, dass die Abwässer kein eigenes Ökosystem darstellen, sondern (in Deutschland üblicherweise in gereinigter Form) in andere Ökosysteme eingeleitet werden (z. B. Flüsse und Meere). Gleichwohl können aber Tiere, z. B. Ratten, die in der Kanalisation leben durch Gullyfilter bspw. in ihrer Bewegungsfreiheit beeinträchtigt werden.

2.4.2 Risiken und unbeabsichtigte ökologische Auswirkungen bei stationären Technologien

In Flüssen können stationäre Technologien wie etwa ein Blasenvorhang z. B. dazu führen, dass sich Strömungen ändern (Interview 5). Dies kann zur Folge haben, dass Fische anders wandern und Nährstoffe sich anders verteilen, was wiederum negative Auswirkungen auf die Nahrungskette haben kann.

Schwimmende, fest installierte Barrieren (z. B. Trash Booms) sind grundsätzlich so konzipiert, dass Fische und andere Flussbewohner unter den Strukturen an der Oberfläche durchschwimmen könnten. Es besteht aber für einige Organismen die Gefahr, dass sie sich in den Strukturen an der Oberfläche verfangen – insbesondere, wenn der eingefangene Müll und das Treibgut nicht regelmäßig entfernt werden (Silva et al. 2021). Passiv treibende oder weniger mobile kleine Organismen können sich auch verfangen – wie z. B. Algen.

Selbst kleinräumige Technologien, wie z. B. SeaBins, die in Küstengebieten eingesetzt werden, greifen unter Umständen erhebliche Mengen an Meereslebewesen zusammen mit dem von ihnen gesammelten Plastik auf (Environmental Investigation Agency & Ocean Care 2023;

Paris et al. 2022; Parker-Jurd et al. 2022). Evaluationen haben z. B. gezeigt, dass sie weniger Plastik einsammeln (in einer Fallstudie lediglich 0,0059 kg/Tag; [Parker-Jurd et al. 2022](#)) als organisches Material. Zusätzlich wurden pro vier Plastikteilen ein Tier gefangen, von denen etwa die Hälfte zum Zeitpunkt der Entleerung tot waren (Parker-Jurd et al. 2022).

2.4.3 Risiken und unbeabsichtigte ökologische Auswirkungen bei mobilen Technologien

Die Entfernung von organischem Material kann das empfindliche Gleichgewicht der Nahrungskette erheblich stören und kann z. B. die Nährstoffversorgung flussabwärts oder zwischen Fluss und Küste unterbrechen (Falk-Andersson et al. 2020; Helinski et al. 2021; Leone et al. 2023, Interview 4, Interview 5). Schwimmende Algenmatten sind außerdem der Lebensraum für bestimmte Arten (Falk-Andersson et al. 2020). Dieser wird zerstört, wenn z. B. Schleppnetze an der Meeresoberfläche entlanggezogen werden. Aber auch am Meeresboden werden Lebensräume zerstört, wenn Schleppnetze eigens zum Aufsammeln von Müll eingesetzt werden (Schneider et al. 2023). Fishing-for-Litter-Initiativen, bei denen Fischer:innen während des normalen Fischfangs das Plastik aus dem Fang sammeln und anschließend ordnungsgemäß an Land entsorgen, könnten die Vermüllung am Meeresboden etwas reduzieren und zu Verhaltensänderungen führen (Bergmann et al. 2023) (vgl. Kapitel 3.3.2).

Bei mobilen Technologien kann es (großen) Fischen und Meeressäugtieren im Meer zwar durch langsame Fahrgeschwindigkeiten ermöglicht werden, auszuweichen oder zu entkommen. Aber es wird viel Biomasse gefangen, wie Algen, Seegras, aber auch Weichtiere und Quallen (Interview 3). Netze, die im Meer zum Einsatz kommen, sind am schädlichsten für die Ökosysteme. Das Leben, das mit den Netzen in Berührung kommt, wird emulgiert, da das Netz lange Zeit im Wasser bleibt. Die dort lebenden Tiere haben oft weiche Körper und werden vom Netz zermahlen (Interview 4). Obwohl sie so weich und fragil sind, sind sie sehr wichtig für das Ökosystem, denn sie binden jedes Jahr ein Prozent des Kohlenstoffs in der Atmosphäre (Interview 4).

Von den interviewten Expert:innen betonen mehrere, dass die manuelle Entfernung von Plastik und anderem Müll am Strand nicht nur effektiver, sondern auch ökologisch verträglicher ist als das Sammeln mit TEK auf hoher See (Interview 2, Interview 4, Interview 5, Interview 8), z. B. mit Schleppnetzen. Dies wird durch Modellierungsergebnisse gestützt (Onink et al. 2021). Einige Technologieanbieter nehmen die Umweltauswirkungen jedoch genauer in den Blick und haben Ansätze entwickelt, bei denen Technologie und manuelles Sortieren kombiniert wird. Dies ist z. B. bei den SeeHamstern von OneEarth – OneOcean e.V. der Fall (siehe ausführlicher Kapitel 2.3.2).

Die Einschätzung der Effektivität einer jeden Technologie sollte unbedingt in Zusammenschau mit den ökologischen Auswirkungen dieser Technologien erfolgen (Griffin et al. 2024), denn oftmals sind die ökologischen Auswirkungen noch nicht bekannt oder tatsächlich so massiv, dass der Nutzen bei einigen Technologien, v.a. auf dem offenen Meer, infrage gestellt werden muss. Dazu bedarf es international einheitlicher, wissenschaftsbasierter Regelungen.

Gleichzeitig lenkt die Beschäftigung mit TEK davon ab, das Problem an der Wurzel anzupacken – sowohl öffentliche Aufmerksamkeit als auch finanzielle Ressourcen werden dann ggf. nicht für die Vermeidung von Plastikmüll eingesetzt (vgl. Kapitel 3.4).

2.5 Einschätzung der Effizienz und optimale Einsatzbedingungen

Um die Effizienz von TEK zu erfassen, werden unterschiedliche Indikatoren von Technologieanbietern und in der wissenschaftlichen Literatur genutzt. Diese reichen beispielsweise von der Gesamtmenge des bisher entfernten Plastikmülls mittels einer bestimmten Technologie, über die technisch bedingte maximale Menge an Plastikmüll, die pro Tag oder pro Einsatz der TEK entfernt werden kann, bis hin zu einer prozentualen Auffangquote. Auf dieser Basis gestaltet es sich schwierig, verschiedene TEK miteinander zu vergleichen und geeignete TEK für einen bestimmten Einsatzort auszuwählen (Falk-Andersson et al. 2023; Griffin et al. 2024). Der Zweck solcher Angaben scheint in der Regel nicht wissenschaftlich motiviert zu sein, sondern werblich – die betreffende Technologie soll in einem guten Licht dargestellt werden, und es werden die dafür am besten geeigneten Werte angegeben. Von Seiten der Wissenschaft wird gefordert, ein einheitliches und verbindliches Monitoring einzuführen, um die Wirksamkeit von TEK zu bewerten (Falk-Andersson et al. 2023; Leone et al. 2023; Scientists' Coalition for an Effective Plastics Treaty 2024b).

Selbst für Technologien des gleichen Technologietyps werden teilweise unterschiedliche Messgrößen genutzt. Insgesamt ist die Effizienz von TEK bislang nur unzureichend und auf inkonsistente Weise untersucht (Griffin et al. 2024). Diese Feststellung spiegelt sich in den Steckbriefen, die für das vorliegende Gutachten erstellt wurden.

2.5.1 Effizienz von Technologien zur Plastikentfernung aus Abwässern

Am besten erfasst ist die **Effizienz** von Technologien zur Plastikentfernung aus Abwässern. Sie wird meist als eine Prozentzahl angegeben, mit der die Entfernungsquote ausgedrückt wird von Plastik, welches in der Kanalisation landet, u.a. aus Haushalten, Industrie sowie Littering an Straßen. Hier liegt die Effizienz weitgehend in einem sehr hohen Bereich (über 95 %). Ein direkter Vergleich der Technologien ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da einige speziell auf die Entfernung von Makroplastik abzielen (z. B. Netze), während andere für Mikroplastik konzipiert sind (z. B. Filter). Membranen, Regenrückhalte- oder Sedimentationsbecken sowie Agglomerations-Fixierungsreaktionen können Plastik in allen Größenordnungen entfernen (Makro-, Mikro- und Nanoplastik). Dabei zeigen sich jedoch Unterschiede in der Effizienz je nach Partikelgröße: Während Membranen und Agglomerations-Fixierungsreaktionen besonders gut für kleine Plastikpartikel geeignet sind, haben Sedimentationsbecken eine geringere Effizienz bei der Entfernung von Mikro- und Nanoplastik. Die in Studien ermittelten Effizienzwerte beziehen sich zudem oft nur auf spezifische Partikelgrößen, beispielsweise Mikroplastik >10 µm. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, sind weitere Standardisierungen in der Mikroplastikanalytik sowie gezielte Forschungsarbeiten zur Plastikentfernung im Abwasser erforderlich. Besonders hoch ist die Effizienz von Technologien zur Plastikentfernung in Bereichen, die bisher keine entsprechende Maßnahme vorgesehen haben – etwa bei Mischwasserentlastungsanlagen in Mischsystemen, Filtern an stark belasteten Straßen oder Regenrückhalte- und Sedimentationsbecken an bisher ungeschützten Standorten. In Kläranlagen kann die Effizienz zwar weiter verbessert werden, doch hier findet bereits eine Plastikentfernung statt. Eine Installation entsprechender Technologien an Straßen (z. B. Filter, Regenrückhalte- oder Sedimentationsbecken) könnte zusätzlich dazu beitragen, Plastik durch Littering direkt aufzufangen, bevor es in die Gewässer gelangt.

2.5.2 Effizienz von stationären Technologien zur Entfernung von Plastik aus Gewässern

Bei einigen stationären Technologien zur Entfernung von Plastik aus Flüssen wird ebenfalls die Entfernungsleistung prozentual angegeben. Sie bezieht sich im Normalfall auf die Gesamtmenge des Plastikmülls, der flussabwärts treibt (sowohl an der Wasseroberfläche als auch in der Wassersäule). Die Entfernungsleistung fällt bei Trash Booms (schwimmenden, fest installierten Barrieren) auf den ersten Blick mit 37 % eher gering aus. Dies liegt daran, dass dieser Technologietyp vorrangig darauf ausgerichtet ist, Plastikmüll zu erfassen, der an der Oberfläche treibt. Dieser kann wirksam aufgefangen werden, während absinkende Müllobjekte leicht unter der Barriere hindurchkommen können (Blettler et al. 2023). Für die Great Bubble Barrier sind zwei verschiedene Entfernungsquoten angegeben: 86 % bezogen auf den an der Oberfläche treibenden Plastikmüll und ca. 50 % bezogen auf den in der Wassersäule treibenden Plastikmülls (International Trash Trap Network 2024). Diese Beispiele zeigen, dass bei Angaben zur Entfernungsleistung genau geprüft werden sollte, auf welche Ausgangsgrößen sie sich beziehen (Makro- und/oder Mikroplastik, Plastik an der Wasseroberfläche und/oder in der Wassersäule) und ob sie ggf. lediglich Laborbedingungen widerspiegeln.

Ein anderer, häufig genutzter Indikator für die Effizienz sind durchschnittliche Mengenangaben (in Kilogramm oder Tonnen) des entfernten Plastikmülls in einem bestimmten Zeitintervall (pro Tag, Monat, Jahr). So finden sich beispielsweise in den Steckbriefen folgende Angaben:

- a) Mit der Trash-Wheel-Technologie werden im Hafen von Baltimore mit Hilfe von vier Anlagen ca. 500 Tonnen Abfälle pro Jahr entfernt.⁷⁷
- b) Mit schwimmenden Mülleimern können durchschnittlich 3,9 kg Abfälle pro Tag entfernt werden bzw. 1,4 Tonnen pro Jahr (Winterstetter et al. 2021).
- c) Mit der Great Bubble Barrier in Amsterdam werden ca. 80 kg Plastikmüll pro Monat entfernt.⁷⁸ Das entspricht 0,96 Tonnen pro Jahr.

Diese Werte können einen groben Eindruck vermitteln, welche Beiträge zur Plastikmüllentfernung mit bestimmten Technologien möglich sind. Dabei ist jedoch wichtig, den jeweiligen Kontext zu berücksichtigen. Hervorzuheben ist, dass sich die Effizienzangaben im Beispiel oben bei (a) und (b) auf Abfälle insgesamt beziehen, wobei unklar bleibt, welchen Anteil Kunststoffabfälle ausmachen. So ist beispielsweise ein Kritikpunkt an den schwimmenden Mülleimern, dass diese viel organisches Material einfangen, wie z. B. Algen, Seegras, Mangroven, Laub und Äste (Paris et al. 2022; Parker-Jurd et al. 2022; Interview 6). Darüber hinaus ist die Effizienz von TEK an fließenden oder stehenden Gewässern sehr stark abhängig von Standortfaktoren, insbesondere vom Grad der Plastikverschmutzung (Dichte des vorhandenen Plastiks, Arten von Plastikmüll) (Falk-Andersson et al. 2020). So könnten die mit der Great Bubble Barrier durchschnittlich gesammelten Mengen an anderen Standorten deutlich höher oder niedriger ausfallen als in Amsterdam.

2.5.3 Effizienz von mobilen Technologien zur Entfernung von Plastik aus Gewässern

Für mobile Technologien wird die Effizienz oftmals anhand technologischer Grenzen für die Plastikentfernung angegeben, wie z. B. die maximale Aufnahmekapazität, Akkulaufzeit, maximale Gewichtsbelastung oder zurücklegbare Entfernung (Griffin et al. 2024). So sind Sammelboote durch ihre Aufnahmekapazität limitiert und geben diese an als Tonnen an Material, das

⁷⁷ <https://www.mrtrashwheel.com/trash-interception> (23.11.2024).

⁷⁸ <https://thegreatbubblebarrier.com/impact-bubble-barrier-amsterdam/> (26.11.2024).

pro Tag oder Fahrt gesammelt werden kann (z. B. entfernt die Circular Explorer bis zu vier Tonnen Plastikmüll aus Flüssen am Tag).⁷⁹

Zudem ist bei mobilen TEK zu berücksichtigen, dass die Kosten mit der Entfernung des Einsatzgebietes steigen, da mehr Zeit und Energie für die Anfahrt und Rückfahrt aufgebracht werden müssen.

2.5.4 Übergreifende Erkenntnisse zur Effizienz von TEK, Kosteneffizienz und optimalen Einsatzbedingungen

Insgesamt zeigen die Steckbriefe und wissenschaftliche Studien, dass sich der überwiegende Teil der TEK der Wasseroberfläche widmet, während nur wenige Technologien in der Lage sind, die Wassersäule oder den Gewässergrund von Plastikmüll zu befreien (Griffin et al. 2024; Leone et al. 2023). Die **entfernbare Plastikgröße** ist für viele TEK nicht genau mittels Zentimeterangaben veröffentlicht. Anhand der Entfernungsmechanismen lässt sich die entfernbare Plastikgröße allerdings oftmals abschätzen, z. B. anhand der Maschenbreite von Netzen oder der Größe des Auffangbehälters. So lässt sich feststellen, dass – mit Ausnahme der TEK im Abwasserbereich – die große Mehrheit der verfügbaren Technologien darauf abzielt, Makroplastik aus Gewässern zu entfernen. Als Makroplastik werden Kunststoffteile von mindestens 5 mm Größe bezeichnet. Dies könnte darauf hinweisen, dass die Entfernung von Mikroplastik aus Flüssen oder Meeren technisch nur schwer umsetzbar ist (Griffin et al. 2024). Gleichzeitig sind nur wenige Technologien in der Lage, sehr große und schwere Müllteile aus Gewässern zu entfernen. Ein Beispiel hier ist das Baltimore Trash Wheel, welches u. a. bereits Autoreifen und eine Matratze aus dem Fluss entfernt hat.⁸⁰

Die Leistung der in den Steckbriefen vorgestellten TEK wird unterschiedlich stark von **Wetterbedingungen** beeinflusst, allerdings fehlen hier für viele Technologien verlässliche Informationen. In der wissenschaftlichen Literatur wird hervorgehoben, dass mobile TEK empfindlicher auf extreme Wetterereignisse reagieren als stationäre (Leone et al. 2023).

TEK unterscheiden sich stark in ihrem **Energiebedarf** für den Betrieb der Technologien und den genutzten Energiequellen. Alle mobilen TEK (z. B. Roboter, Boote, Schiffe) und auch einigen stationäre Systeme benötigen Energie für ihren Betrieb. Für passive TEK, die allein mit Hilfe der Strömung Plastikmüll einfangen, werden oftmals energiebetriebene Geräte benötigt, um den eingefangenen Plastikmüll aus dem Gewässer zu holen (Boote, Kräne, etc.). Viele Technologieanbieter integrieren erneuerbare Energien (z. B. Baltimore Trash Wheel, The Great Bubble Barrier) oder sind bestrebt, eine Nutzung erneuerbarer Energien zu ermöglichen (z. B. Sea Bin) (Moulaert et al. 2021, Interview). Einige Technologien werden jedoch nach wie vor mit fossilen Energieträgern angetrieben (vor allem Boote und Schiffe), was Treibhausgase erzeugt und zur weiteren Verschmutzung der Umwelt beiträgt. Die Höhe des Energiebedarfs beeinflusst die Kosten für den Betrieb der TEK. Im Fall der Luftblasenvorhänge (wie z. B. Great Bubble Barrier) sind diese stark abhängig von der Länge der installierten Barriere (Moulaert et al. 2021).

Hinsichtlich der **Kosten** können passive TEK dank ihres geringen Energie- und Arbeitsaufwands im Vorteil sein. Tatsächlich zählen schwimmende Barrieren zu den kostengünstigsten TEK und werden häufig in Entwicklungsländern eingesetzt.⁸¹ Die Kosten richten sich hier vor allem danach, aus welchen Materialien die Barrieren gebaut werden, und entsprechend gibt es auch hochpreisige Varianten auf dem Markt (ab ca. 2.000 bis 30.000 USD). Eine der teuersten Technologien ist die Great Bubble Barrier, deren Installation je nach Standortbedingungen

⁷⁹ <https://oneearth-oneocean.com/die-loesung/circular-explorer-by-oeoo-holcim/> (26.11.2024).

⁸⁰ <https://www.mtrashwheel.com/technology> (16.12.2025).

⁸¹ Zum Beispiel Plastic Fischer Projekt, <https://plasticfischer.com/> (16.12.2024).

schätzungsweise 350.000 € kostet.⁸² Im Allgemeinen besteht bei vielen TEK eine erhebliche Variabilität der Kosten, da Faktoren wie lokale Besonderheiten (z. B. Gewässerbreite, Strömung, Berücksichtigung von Schiff- oder Bootsverkehr, etc.) oder die Materialqualität zu erheblichen Kostenschwankungen führen können (Helinski et al. 2021; Leone et al. 2023; Nikiema und Asiedu 2022). Die Kostenangaben in den Steckbriefen sind daher nur als Richtwerte zu verstehen.

In verschiedenen Studien haben sich Wissenschaftler:innen bemüht, verfügbare Kosten- und Effizienzdaten von TEK zu vereinheitlichen und vergleichbar zu machen. Brouwer et al. (2023) führten eine Umfrage in Europa und Nordamerika durch, um Daten zu Kosten und Reinigungskapazität von TEK für das Jahr 2021 zu sammeln. Auf der Grundlage dieser Informationen berechneten die Wissenschaftler:innen die **Kosten pro Kilogramm entfernten Plastikmülls** für verschiedene Technologietypen für Binnen- und Küstengewässer, wobei Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten einbezogen wurden. Laut ihrer Ergebnisse waren Müllsammelboote sowie schwimmende Mülleimer die kosteneffizientesten Technologien, mit Kosten unter einem Euro pro Kilogramm Plastikmüll. Stationäre, schwimmende Barrieren stellten dagegen im Durchschnitt mit etwa zehn Euro pro Kilogramm Plastikmüll die teuerste Technologie dar. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen einer Studie von Nikiema und Asiedu (2022). Für Müllsammelboote vom Typ SeeHamster gaben die Anbieter im Interview an, dass ihre durchschnittlichen Kosten pro Kilogramm gesammelten Plastikmülls bei einem Euro liegen (Interview 8).

Eine weitere Studie ging ebenfalls der Frage nach, wie teuer es ist, ein Kilogramm Plastikmüll aus dem Meer zu entfernen und testete dazu verschiedene TEK unter realen Einsatzbedingungen am Golf von Biskaya (Andrés et al. 2021). Laut dieser Fallstudie kostete es zwischen 3,60 und 7,20 Euro, ein Kilogramm Plastikmüll mit Hilfe von Müllsammelbooten in Küstennähe zu entfernen. Die Kosten für die Plastikmüllentfernung mit Fischereifahrzeugen des Typs *Fishing for Litter* lagen zwischen 4 und 75 Euro pro Kilogramm und für schwimmende Barrieren an Flüssen bei etwa 103 Euro pro Kilogramm. Auch hier schnitten die Müllsammelboote am besten ab.

Die wissenschaftliche Literatur zeigt, dass die Kosteneffizienz stark von externen Faktoren beeinflusst wird. So spielten im Golf von Biskaya die Erfahrung der Fischer:innen, die Niederschlagsintensität und weitere Umweltbedingungen eine Rolle (Andrés et al. 2021). Als wichtigster Einflussfaktor gilt die **Dichte des Plastikmülls im Gewässer** (Falk-Andersson et al. 2023). Hier haben mobile TEK den Vorteil, dass sie sich gezielt zu den Müll- Akkumulationszonen in Flüssen, Seen oder Küstengewässern hinbewegen können. In Flüssen können sich beispielsweise in Flussbiegungen oder an Brückenpfeilern große Mengen an treibenden Müll ansammeln. Diese können je nach Flussgröße und Müllmenge mit Hilfe von größeren oder kleineren Sammelbooten gezielt angesteuert und entfernt werden (Interview 8).

Bei stationären TEK wurden starke Schwankungen in der Effizienz festgestellt, die damit zusammenhängen, dass die Menge des flussabwärts getragenen Plastikmülls an ihrem Standort sehr stark variieren kann. Für schwimmende Barrieren an Flüssen in Nordamerika beispielsweise lag die Spanne des geschätzten entfernten Plastikmülls zwischen 135 and 46.000 Kilogramm pro Jahr (Brouwer et al. 2023).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass noch immer Datenlücken hinsichtlich der Effizienz von TEK bestehen und dass diese derzeit nicht systematisch und einheitlich erfasst wird. Zudem sind existierende Angaben zur Effizienz nur bedingt aussagekräftig, da diese nur selten die unterschiedlichen Standort- und Umweltbedingungen berücksichtigen (Griffin et al. 2024).

⁸² <https://thegreatbubblebarrier.com/technology/> (10.01.2025).

TEK können am effizientesten eingesetzt werden, wenn Kunststoffe dort entfernt werden, wo sie in hoher Konzentration vorkommen. Daher wird ein Hebel, um die Effizienz von TEK zu verbessern darin gesehen, Akkumulationszonen von Plastikmüll in Gewässern besser zu orten und vorherzusagen und das Verhalten von Plastikmüll in Gewässern besser zu verstehen (z. B. wann und wo sinkt es ab, wie lange schwebt es in der Wassersäule, an welchen Stellen wird es an die Küste gespült, etc.) (Falk-Andersson et al. 2020; Leone et al. 2023). Beispielsweise gelangen nach einem Hochwasserereignis viele Kunststoffe vom Land in die Flüsse oder Küstengewässer und verteilen sich dann schnell durch Strömung und Wind. Genauere Daten und Vorhersagen können es dann ermöglichen, mit Hilfe von mobilen TEK zeitnah Akkumulationszonen aufzusuchen und möglichst viel der eingetragenen Kunststoffe zurückzuholen. Zahlreiche Projekte widmen sich schon heute der Erfassung von Daten zur Plastikakkumulation und greifen teilweise auf moderne Technologien zurück (künstliche Intelligenz, Computermodelle, Luftaufnahmen von Flugzeugen und Drohnen, etc.) und / oder dokumentieren den Plastikmüll, den sie gefunden und entfernt haben, und machen ihre Erkenntnisse öffentlich zugänglich (Falk-Andersson et al. 2023). Weitere Forschungsförderung in diesem Bereich erscheint sinnvoll, einschließlich Vorhaben, die die vielen bestehenden Einzelinitiativen zusammenbringen, Daten vereinheitlichen und transparent machen.

2.6 Verwertung der eingesammelten Kunststoffabfälle

Unabhängig davon, welche TEK eingesetzt wird, ist eine zentrale Frage, was mit den gesammelten Kunststoffabfällen geschieht, nachdem sie aus Abwässern, Flüssen oder dem Meer geborgen wurden. Hier gilt es sicherzustellen, dass die gesammelten Abfälle adäquat behandelt und nicht erneut in die Umwelt eingetragen werden. Dementsprechend ist die Abfallbehandlung ein wichtiger Faktor bei der Entwicklung und Planung von Maßnahmen zur Rückholung von Kunststoffabfällen. Derzeit mangelt es jedoch an Transparenz; viele Unternehmen geben oftmals keine Auskunft über den Verbleib der von ihnen gesammelten Abfälle (Dijkstra et al. 2021; Falk-Andersson et al. 2023).

Grundsätzlich gibt es verschiedene Verwertungsmöglichkeiten für Plastikmüll. Die in der EU-Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG) verankerte Abfallhierarchie legt eine Rangfolge der Verwertungsmöglichkeiten nach ihrer Umweltverträglichkeit fest: 1) Vermeidung, 2) Aufbereitung zur Wiederverwendung, 3) Recycling, 4) Energetische Verwertung, 5) Deponierung oder Verbrennung ohne energetische Verwertung.

Es gibt eine Reihe von Herausforderungen und Hindernissen, aber auch Potenziale für spezifische Abfallbehandlungsoptionen von Kunststoffabfällen, die aus Gewässern zurückgeholt wurden, die im Folgenden erläutert werden. Während die Vermeidung unstrittig die ökologisch verträglichste Option darstellt (vgl. Kapitel 3.4), liegt der Fokus hier auf der Behandlung von Kunststoffabfällen, die bereits angefallen und in Gewässer oder Abwasser eingetragen sind.

- **Aufbereitung zur Wiederverwendung:** Große Müllteile wie Fischernetze können repariert und wiederverwendet werden (Schneider et al. 2018; Interview 4). In Anbetracht der Mengen an verlorenen Fischfanggeräten im Ozean besteht hier beachtliches Potenzial: Schätzungsweise gehen jährlich auf globaler Ebene Fischfanggeräte im Umfang von mindestens 640.000 Tonnen verloren oder werden im Meer entsorgt (Wasave et al. 2025). Konkreter verliert die kommerzielle Fischerei jährlich Ringwadennetze im Umfang von etwa 75.000 Quadratkilometern, sowie 3.000 Quadratkilometer an Kiemennetze und 220 Quadratkilometer an Schleppnetzen; hinzu kommen etwa 740.000 Kilometer an Langleinen und mehr etwa 25 Millionen Reusen und andere Fischfallen (Richardson et al. 2022, S. 1–2). Fischernetze, -leinen und andere Fischfanggeräte sind größtenteils aus langlebigen, synthetischen Materialien hergestellt und stellen gerade

wegen ihrer hohen Belastbarkeit, Reißfestigkeit und Haltbarkeit ein ökologisches und ökonomisches Problem dar (Do und Armstrong 2023; Wasave et al. 2025). Während sie im Wasser treiben, fangen sie unbeabsichtigt und unkontrolliert weitere Fische und andere Lebewesen ein, schädigen Ökosysteme (z. B. Korallenriffe) und führen zu Verlusten für die Fischerei (Do und Armstrong 2023; Richardson et al. 2022). Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, verloren gegangene Fischfanggeräte soweit möglich zurückzuholen, zu reparieren und wiederzuverwenden. Dieser Verwertungspfad könnte gestärkt werden durch Designvorgaben für Fischfanggeräte, die Reparaturen erleichtern, sowie durch Pfandsysteme, die Anreize setzen für die Rückholung von Fischfanggeräten (Schneider et al. 2023) (vgl. auch Kapitel 3.3.1).

Ferner wurden in einzelnen Projekten gesammelten Kunststoffabfälle genutzt, um daraus Kunstwerke zu erschaffen (Schneider et al. 2018). Diese Art des „Upcyclings“ schärft zwar das Bewusstsein der Bevölkerung für das Ausmaß der Plastikverschmutzung, stellt aber angesichts der großen Menge an Kunststoffabfällen in den Gewässern keinen geeigneten skalierbaren Verwertungspfad dar.

- **Recycling:** Im Gegensatz zu separat gesammelten Plastikmüll aus Haushalts- oder Industrieabfällen ist Plastikmüll, der sich längere Zeit in Gewässern befunden hat, **nicht gut geeignet für ein Recycling**. Das liegt zum einen daran, dass die Kunststoffabfälle mit Sand und Schlamm vermischt und oftmals von Organismen (Muscheln, Seepocken, Algen, etc.) besiedelt sind (Ronkay et al. 2021; Schneider et al. 2018; Interview 8). Auch können sie Schadstoffe enthalten, wie beispielsweise Blei (Winterstetter et al. 2021). Hinzu kommt, dass die Kunststoffabfälle durch Wetter- und Umwelteinflüsse stark verwittert sein können (Wyles et al. 2019). Dies wiederum führt zu einer verringerten Qualität der gewonnenen Rezyklate und kann die Materialeigenschaften (z. B. Festigkeit und Farbgebung) beeinträchtigen (Ronkay et al. 2021) oder auch die Recycling-Anlagen beschädigen (Wyles et al. 2019). Auch Plastik aus Abwässern kann theoretisch recycelt werden, was jedoch aufgrund von Verunreinigungen aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht fragwürdig ist. Kunststoffe sind häufig mit organischem Material, Krankheitserregern, Chemikalien oder Schwermetallen aus dem Abwasser verunreinigt (vgl. Okoye et al. 2022; Malinović et al. 2022).

Ein mechanisches Recycling von Kunststoffabfällen aus Gewässern und Abwasser ist **dennoch technisch möglich**. Es erfordert mehr Aufwand als das Recycling von an Land gesammelten Kunststoffabfällen und ist daher mit höheren Kosten verbunden. Zunächst müssen die aus Gewässern geborgenen Kunststoffabfälle vorbehandelt, d.h. sortiert und gereinigt werden, möglicherweise entsalzen und einem Verfahren zur Bleiabscheidung unterzogen werden (Dijkstra et al. 2021; Winterstetter et al. 2021; Schneider et al. 2018). Dabei hängen Aufwand und Kosten sehr davon ab, wie stark die Kunststoffabfälle verunreinigt und wie lange sie den Umwelteinwirkungen ausgesetzt waren (Falk-Andersson et al. 2023; Winterstetter et al. 2021).

- **Energetische Verwertung:** Gemischte Kunststoffabfälle können als Ausgangsmaterial für Verbrennungsanlagen mit Energierückgewinnung genutzt werden (Falk-Andersson et al. 2023). Dies kann eine geeignete Verwertungsoption darstellen, wenn die Abfälle nicht recycelt werden können. Beispielsweise werden im Hafen von Baltimore, Vereinigte Staaten, jährlich etwa 500 Tonnen Müll mit Hilfe von Müllrädern (engl. *trash wheels*) aus den Flüssen gesammelt. Dieser Müll ist laut der Betreiber der Müllräder zu stark verunreinigt, um regulär für das Recycling sortiert und aufbereitet zu werden. Er wird der Stadt Baltimore für die ordnungsgemäße Entsorgung übergeben und dann zur

Stromerzeugung verbrannt.⁸³ Aus jeder Tonne Müll können durchschnittlich 500 Kilowattstunden Strom erzeugt werden, was in etwa dem durchschnittlichen Tagesbedarf an Strom von 16,5 Haushalten in den Vereinigten Staaten entspricht.⁸⁴

Gegenüber der Deponierung ist ein Vorteil dieser Abfallbehandlungsoption – neben der Energierückgewinnung – dass Flächen für die Lagerung der Abfälle eingespart werden und Kunststoffabfälle nicht wieder versehentlich zurück in die Umwelt gelangen bzw. langfristig Schadstoffe an in Böden oder das Grundwasser abgegeben werden können. Ein Nachteil ist jedoch, dass durch das Verbrennen der Kunststoffabfälle Treibhausgase und Schadstoffe freigesetzt werden (Environmental Investigation Agency & Ocean Care 2023; Falk-Andersson et al. 2023).

- **Deponierung:** In vielen Regionen der Erde ist die Deponierung derzeit die einzig verfügbare Verwertungsoption für Kunststoffabfälle, die aus Gewässern zurückgeholt werden (Falk-Andersson et al. 2023; Interview 6). Sofern keine geeigneten Infrastrukturen für eine thermische Verwertung vorhanden sind, kann die Deponierung aus Umweltsicht die bessere Option sein gegenüber einer Müllverbrennung an offenen Feuerstellen, die in einigen Regionen praktiziert wird. Bei Letzterem werden Schadstoffe und giftige Dämpfe ungefiltert in die Atmosphäre entlassen und stellen zudem ein Gesundheitsrisiko dar (Cottom et al. 2024)(Scientists' Coalition for an Effective Plastics Treaty 2024b). Die Voraussetzung für eine sichere Deponierung ist, dass die vorgesehenen Müllhalden hohe Umweltstandards erfüllen. Konkret muss sichergestellt werden, dass Kunststoffabfälle nicht zurück in die Umwelt eingetragen werden und dass keine Chemikalien in angrenzende Gewässer oder das Erdreich austreten (Falk-Andersson et al. 2023, S. 13308).

In der Praxis gibt es bei der wirtschaftlich tragfähigen und ökologisch verträglichen Abfallbehandlung im Zusammenhang mit TEK eine Reihe von Herausforderungen, die sich voraussichtlich weiter verschärfen werden, wenn TEK in Zukunft verstärkt eingesetzt werden. Eines der Hauptprobleme ist, dass es in vielen Erdregionen bislang keine ausreichenden Infrastrukturen gibt, um Kunststoffabfälle fachgerecht zu behandeln (Winterstetter et al. 2021). Mit Blick auf die enormen Mengen an Plastikabfällen, die aktuell jährlich in Gewässer eingetragen werden – Schätzungen zufolge sind es zwischen 8 und 23 Millionen Tonnen (Borrelle et al. 2020; Jambeck und Walker-Franklin 2023; Lau et al. 2020) – müssten pro Jahr Kunststoffabfälle in einer ähnlichen Größenordnung zurückgeholt und anschließend behandelt werden, um mit TEK einen effektiven Beitrag zu leisten. Für solche Mengen bestehen jedoch nach Experteneinschätzung derzeit weder für ein Recycling noch für eine energetische Verwertung ausreichende Kapazitäten – auch nicht in den Industrieländern. Beispielsweise bestehen in Europa keine nennenswerten offenen Kapazitäten in Verbrennungsanlagen in dem erforderlichen Ausmaß (Interview 6). Zugleich ist nicht unbegrenzt Platz verfügbar für die Deponierung (Environmental Investigation Agency & Ocean Care 2023). Lange Transportwege hin zu Orten, an denen die erforderlichen Infrastrukturen verfügbar sind, sind wiederum mit hohen Kosten verbunden und würden die Anwendung von TEK in vielen Fällen unwirtschaftlich machen (Interview 6). Zudem geht der Transport von Kunststoffabfällen meist mit weiteren negativen Umwelteffekten einher, wie Emissionen und Unterwasserlärm durch Schiffe (Interview 4). Insbesondere für die Plastikmüllrückholung aus dem offenen Ozean stellt sich die Frage, wer für die Abfälle verantwortlich ist und die Kosten trägt. Dies ist für die internationalen Gewässer (d. h. außerhalb der

⁸³ <https://www.mrtrashwheel.com/trash-interception> (14.01.2025).

⁸⁴ Angaben entnommen aus dem Trash Wheel Collection Data Sheet, frei zugänglich, <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1b8Lbe-z3PNb3H8nSsSjrwK2B0Re-AbiL2/edit?gid=1811220081#gid=1811220081> (14.01.2025).

nationalen Gesetzgebungen) nicht klar geregelt und könnte ein Konfliktthema sein (Falk-Andersson et al. 2023).

Ob ein Recycling möglich und sinnvoll ist, ist von verschiedenen Faktoren, wie der Zusammensetzung der Abfälle und der vorhandenen örtlichen Infrastrukturen abhängig. Grundsätzlich gilt, dass je kürzer die Kunststoffe sich im Gewässer befunden haben, sie umso eher für das Recycling geeignet sind (Winterstetter et al. 2021; Interview 6; Interview 8).

Wie die Praxis zeigt, können aus Flüssen gesammelte Kunststoffabfälle oftmals gut recycelt werden, wenn die Sammlung nah an der Eintragsquelle erfolgt und die Kunststoffe somit nicht lange dem Wasser ausgesetzt waren. Beispielsweise setzt die NGO *One Earth – One Ocean* Müllsammelboote (Typ SeeHamster und Circular Explorer) u. a. in Kambodscha und Indonesien ein und sortiert die Abfälle direkt an Bord. Die einzelnen Fraktionen (PE, PET, HTP, LTP) können dann rezykliert werden (Interview 8).

Da es sich bei Kunststoff an sich um wertvolles Material handelt, könnten zurückgeholte Kunststoffe theoretisch als eine Einnahmequelle dienen – im Idealfall sogar die Anwendung von TEK (mit)finanzieren. Ob sich das Recycling von zurückgeholtem Plastik rentiert, hängt dabei stark von den Preisen ab, die sich mit recycelten Kunststoffen auf dem Markt erzielen lassen (Falk-Andersson et al. 2023). Einen hohen Marktwert haben Rezyklate von hoher Qualität und hohem Reinheitsgrad, wie beispielsweise reines recyceltes PET, Polypropylen oder reines HDPE). Aus Gewässern zurückgeholte Kunststoffabfälle bestehen jedoch aus einem Mix aus unterschiedlichen Kunststoffsorten (plus anderen Abfällen) und es ist nicht vorhersehbar, welche Mengenteile bei der Rückholung anfallen. Vor diesem Hintergrund ist es für Recyclingunternehmen nicht attraktiv, solche Abfälle anzunehmen – zumal in sehr hohen Mengen Kunststoffabfälle von höherer Qualität aus der landbasierten Sammlung verfügbar sind (Interview 6; Falk-Andersson et al. 2023). Daher wird die Abfallbehandlung von aus Gewässern zurückgeholten Kunststoffen im Allgemeinen eher als ein zusätzlicher Kostenfaktor angesehen (Nikiema und Asiedu 2022) denn als Einnahmequelle. Der Organisation *One Earth – One Ocean* gelingt es beispielsweise zumindest, Teile der Kosten durch den Verkauf von Rezyklaten zu decken (Interview 8).

Plastikabfälle zu recyceln, die aus dem offenen Meer gesammelt wurden, wird von vielen Wissenschaftler:innen als nicht sinnvoll angesehen angesichts des enormen Aufwands und möglicher Verunreinigungen. Der hohe Aufwand ergibt sich daraus, dass weite Strecken zurückgelegt werden müssen und dass Plastikabfälle auf dem offenen Meer sehr weit verteilt sind. Das gilt selbst für die Anhäufungen in Akkumulationszonen, die im Pazifischen Ozean zu finden sind (Bergmann et al. 2023; Interview 4). Ein weiteres zentrales Argument ist, dass die Kunststoffe im Meer Schadstoffe adsorbieren und sich über die Zeit gefährliche Chemikalien anreichern können, die über das Recycling in neue Produkte gelangen könnten (Scientists' Coalition for an Effective Plastics Treaty 2024b, S. 2; Yamashita et al. 2018; Interview 3; Interview 4).

Im Kontrast dazu steht, dass das Unternehmen The Ocean Cleanup (TOC) damit wirbt, dass seine aus dem Ozean gesammelten Kunststoffabfälle recycelt werden. Mit der Technologie Ocean Clean-Up System wird der eingefangene Abfall zunächst auf die Schiffe verladen und an Land gebracht. Nach eigenen Angaben werden die Kunststoffabfälle zu neuen Produkten recycelt.⁸⁵ Als eine Aktion ließ das Unternehmen Sonnenbrillen herstellen, deren Gestell zu 95 % aus recyceltem Kunststoff (HDPE) angefertigt wurde, welches TOC im Jahr 2019 im Pazifischen Ozean eingesammelt hat. Das Vorgehen wurde von einer unabhängigen Stelle zertifiziert. Die Einnahmen wurden genutzt, um weitere Fahrten zur Reinigung des Ozeans zu finanzieren.⁸⁶ Inzwischen stellt TOC keine eigenen Produkte aus Meeresplastik mehr her, sondern

⁸⁵ <https://theoceancleanup.com/updates/system-03-a-beginners-guide/> (26.11.2024).

⁸⁶ <https://theoceancleanup.com/sunglasses/> (26.11.2024).

kooperiert mit anderen Firmen, wie beispielsweise dem Autohersteller Kia. Dieser nutzt das eingesammelte Meeresplastik beispielsweise, um Matten zur Auskleidung des Kofferraums herzustellen.⁸⁷ Welcher Anteil der aus dem Ozean eingesammelten Kunststoffabfälle tatsächlich recycelt werden kann, bleibt unklar.

Wichtig ist es, Aktionen wie die Herstellung der Sonnenbrillen aus Meeresplastik in einen wirtschaftlichen Kontext einzuordnen. So ließe sich mit viel Aufwand eine kleine Menge des aus dem Meer gesammelten Kunststoffs recyceln, dies sei jedoch sehr teuer und eine entsprechend große Wertschöpfung beim Verkauf der Endprodukte notwendig (Interview 6). Dies scheint im Fall der Sonnenbrillen von TOC gelungen zu sein: Sie kosteten 200 USD pro Stück⁸⁸ und es wurden alle Exemplare verkauft.⁸⁹ Das Beispiel zeigt, dass solche Aktionen in Einzelfällen mit einem guten Marketing und ausreichendem Kapital funktionieren können. Für die breite Masse des zurückgeholten Meeressmülls ist dies jedoch nicht übertragbar.⁹⁰

Eine Alternative zum mechanischen Recycling könnte die Depolymerisation sein. Auch mit anderen thermo-chemischen Recyclingverfahren, wie Pyrolyse oder Vergasung können zumindest im Labor hohe Reinheitsgrade erzielt werden. Diese Verfahren könnten sich theoretisch für das Recycling von Kunststoffabfällen aus Gewässern eignen, da sich mit ihnen auch aus gemischten Kunststoffabfällen und trotz Verunreinigungen mit Sand, Salz oder organischen Material hohe Reinheitsgrade erzielen lassen könnten. Noch sind diese Technologien deutlich teurer als mechanische Recyclingverfahren und sie erfordern einen sehr hohen Energieeinsatz. Die weiteren technologischen Entwicklungen in diesem Bereich bleiben abzuwarten (Interview 6; Winterstetter et al. 2021). Allerdings sind Verunreinigungen auch bei thermo-chemischen Recyclingverfahren relevant und erhöhen die Kosten. Ob sich dies aus ökonomischer und ökologischer Perspektive in absehbarer Zeit rechnen wird, kann daher bezweifelt werden.

Grundsätzlich ist es so, dass das Recycling nur ein Baustein von vielen ist und das Plastikproblem nicht lösen kann (Allen et al. 2024; Baztan et al. 2024; Scientists' Coalition for an Effective Plastics Treaty 2024a). Der Recyclingprozess wird oft als einfacher Prozess dargestellt, davon ausgehend, dass Kunststoffe und Chemikalien (leicht) zu recyceln wären. Das Gegenteil ist der Fall. Die meisten Kunststoffe können gar nicht recycelt werden – auch dann nicht, wenn sie zuvor nicht in der Umwelt waren. Sie können daher gar nicht im Kreislauf geführt werden (Scientists' Coalition for an Effective Plastics Treaty 2024a). Neben schlechtem Abfallmanagement und schlechter Recyclinginfrastruktur ist dies einer der Gründe, warum weltweit etwa nur zehn Prozent des Plastiks überhaupt recycelt werden (Scientists' Coalition for an Effective Plastics Treaty 2024a).

Recycelte Kunststoffe werden überwiegend zu Produkten mit geringerem Wert als das Ausgangsprodukt verarbeitet und können nur einige Male recycelt werden, bevor sie gänzlich entsorgt werden müssen. Außerdem stellen die Anhäufung und/oder verstärkte Verbreitung gefährlicher Chemikalien während des Recyclings eine Gefahr für die menschliche Gesundheit dar (Hahladakis et al. 2018; Scientists' Coalition for an Effective Plastics Treaty et al. 2024). Selbst die gut recycelbaren Kunststoffe können nicht beliebig oft recycelt werden. Da sich die Kohlenstoffketten bei jedem Recycling-Zyklus verkürzen, muss aufgrund dieses Materialverlustes bei jedem Recycling auch immer ein gewisses Maß an neuem Plastik hinzugeführt

⁸⁷ <https://www.tmsmotorgroup.co.uk/news/kia-introduces-worlds-first-car-accessory-made-using-recycled-plastic-from-the-great-pacific-garbage-patch/> (13.01.2025).

⁸⁸ <https://www.businessinsider.com/ocean-cleanup-selling-ocean-plastic-recycled-sunglasses-2020-10> (13.01.2025).

⁸⁹ <https://theoceancleanup.com/sunglasses/> (26.11.2024).

⁹⁰ Es lassen sich im Gegenteil sogar gegenläufige Tendenzen beobachten: So haben z. B. Nike und Adidas ihre Produkte aus Meeresplastik wieder aus dem Sortiment genommen, vgl. <https://www.zdf.de/nachrichten/wirtschaft/unternehmen/adidas-ozean-plastik-parley-100.html> (31.01.2025).

werden. Jeder Recyclingprozess führt zudem auch immer zur Freisetzung von Mikro- und/oder Nanoplastik führt. Vermeidungsstrategien sind daher der sinnvollere Weg (vgl. Kapitel 3.4).

3 Mögliche Einsatzszenarien und Bewertung von Technologien

3.1 Einsatzszenarium Bereich Abwasser

Dieses Kapitel bezieht sich primär auf den deutschen Kontext. Viele Ergebnisse, die in diesem Kapitel dargestellt werden, sind auf andere EU-Länder übertragbar. Weltweit sind Abwassersysteme sehr unterschiedlich und werden hier nicht weiter betrachtet.

Plastik gelangt unter anderem durch synthetische Textilien beim Waschen, Mikroplastik aus Kosmetikprodukten sowie Wasch-, Putz- und Reinigungsmittel und unsachgemäße Müllentsorgung ins Abwasser. Regen spült Abfälle und Reifenabrieb von Straßen in die Kanalisation, und industrielle Abwässer tragen ebenfalls zur Verschmutzung bei. In kommunalen Kläranlagen werden über 95 % dieses Mikro- und Makroplastiks > 10 µm aus dem Abwasser entfernt, das aus häuslichen und industriellen Abwässern und Oberflächenabfluss (u.a. Reifenabrieb) stammt. Aufgrund der großen Abwassermengen gelangen bei ca. 5 % dennoch relevante Restmenge an Plastik in die Gewässer. Durch den Einsatz weiterer Verfahrenstechniken wie nachgeschalteter Filteranlagen (z. B. Sandfilter, Tuchfilter, Mikrosiebe oder Membranverfahren) kann der Rückhalt von Mikroplastik auf nahezu 100 % erhöht werden. Die zurückgehaltenen Plastikpartikel werden hauptsächlich im Rechen- und Sandfanggut (insbesondere Makroplastik) sowie im Klärschlamm (Mikroplastik) gebunden. Um ökologische Auswirkungen zu vermeiden, sollte der Klärschlamm bevorzugt thermisch und nicht bodenbezogen (Ausbringung in der Landwirtschaft) verwertet werden. Untersuchungen im Rahmen des Forschungsschwerpunkts Plastik in der Umwelt deuten darauf hin, dass durch Oberflächenabfluss (z. B. aus der Trennkanalisation oder Abflüssen von Verkehrsflächen) und Mischwasserentlastungen bei Starkregenereignissen hohe Mengen an Mikroplastik in Gewässer gelangen können (Hinzmann et al. 2022).

Die Ergebnisse aus dem Forschungsschwerpunkt Plastik in der Umwelt (vgl. (Hinzmann et al. 2022)), sowie die aktuelle Einschätzung eines Abwassertechnologieexperten (Interview 7) heben hervor, dass die Reduktion von Einträgen mit hoher Mikroplastikfracht aus Oberflächenabfluss und Mischwasserentlastungsanlagen von besonderer Bedeutung ist. Im Gegensatz zu Kläranlagen, in denen Mikroplastik weitgehend entfernt wird, gelangt an diesen Stellen unge-reinigtes Abwasser direkt in die Gewässer. Maßnahmen zur Minimierung dieser Einträge werden daher als äußerst wirksam erachtet, um die Belastung der Gewässer zu verringern und damit auch die Verschmutzung des Ozeans durch Plastik langfristig zu reduzieren. Besonders hervorzuheben ist, dass Maßnahmen an diesen Punkten nicht nur die Mikroplastikfracht, sondern auch die allgemeine Schmutzfracht aus Abwässern oder Oberflächenabfluss zurückhalten würden, was zu einer deutlichen Entlastung der Gewässer beiträgt (Interview 7). Angesichts der zunehmenden Häufigkeit von Starkregenereignissen erhält dieses Thema eine noch größere Bedeutung, da die Einträge unter solchen Bedingungen weiter ansteigen. Ohne gezielte Maßnahmen drohen erhebliche negative Auswirkungen auf Gewässer und nachgelagerte Ökosysteme. Ein frühzeitiges Handeln an diesen kritischen Punkten ist daher unerlässlich, um den Herausforderungen veränderter Niederschlagsmuster effektiv zu begegnen.

3.1.1 TEK für Kanalisation

Um Einträge aus Oberflächenabfluss in Trennsystemen und aus Mischwasserentlastungsanlagen bei Mischsystemen zu reduzieren, würde eine Kombination aus bewährten und innovativeren Technologien am effektivsten wirken. Im Fokus stehen dabei die Installation von Sedimentation- oder Regenrückhaltebecken an belasteten Oberflächenabflüssen und Mischwasserentlastungsanlagen. Wegen der hohen Zahl an Einleitpunkten ist es dabei wichtig, Akkumulationszonen zu identifizieren, an denen Einträge möglichst effektiv verringert werden können: So gibt es allein in Deutschland etwa 75.000 Regenwasserrückhaltebecken und -überläufe, hinzu kommen mehrere zehntausend Einleitpunkte von Autobahnen⁹¹. Akkumulationszonen sind Stellen, an denen besonders hohe Emissionen vorkommen. Dies betrifft vor allem Straßen mit hohem Verkehrsaufkommen, insbesondere dort, wo es durch Bremsvorgänge an Ampeln oder in Kurven zu verstärktem Reifen- und Bremsabrieb kommt (Venghaus et al. 2021) und stark belastete Mischwasserentlastungsanlagen. Viele Kommunen investieren bereits in solche Anlagen, jedoch selten mit einem spezifischen Fokus auf Plastik. Die Berücksichtigung dieses Aspekts könnte ein zusätzlicher Anreiz für die Umsetzung dieser Maßnahmen sein, und die Auslegung der Anlagen sollte gezielt auch im Hinblick auf die Reduktion von Plastikeinträgen erfolgen. Es handelt sich demnach nicht vordringlich um die Aufrüstung von Kläranlagen. Regenrückhaltebecken und Anlagen zur gezielten Misch- und Niederschlagswasserbehandlung (Regenüberlaufbecken, Regenklärbecken, Sedimentationsanlagen) haben sich als äußerst zuverlässige Methode zur Reduzierung von Schmutzfrachten, einschließlich Plastik, etabliert. Solche Anlagen arbeiten passiv, indem sie die Fließgeschwindigkeit des Wassers verringern und Partikel durch Schwerkraft abscheiden. Ihre Vorteile liegen in der einfachen Funktionsweise, dem Verzicht auf eine direkte Energieversorgung und dem Fehlen bekannter Risiken für Tiere und Lebensräume. Allerdings kann ihre Effizienz bei Starkregenereignissen sinken, da die verkürzte Verweilzeit die Abscheidung von Partikeln erschwert. Zudem benötigen sie ausreichend Platz und die regelmäßige Entfernung des abgesetzten Materials bedingt Unterhaltungsaufwand, was die Betriebskosten erhöht (Interview 7).

Um die Effizienz beim Rückhalt von Mikroplastik insbesondere an **Akkumulationszonen** zu steigern, empfiehlt sich eine Kombination mit weiterführenden Technologien wie Tuchfiltern oder Mikrosieben (Interview 7). Diese Filtertechnologien ergänzen Regenrückhaltebecken ideal, da sie Mikroplastikpartikel mit einer Effizienz von bis zu 99 % entfernen können (Interview 7). Beispiele aus der Schweiz, wie das SABA-System⁹², zeigen die hohe Wirksamkeit von Tuchfiltern, die auch in Deutschland verstärkt in Regenrückhaltebecken eingesetzt werden könnten. Filter bieten eine zuverlässige Lösung zur Entfernung von Mikroplastik, auch wenn ihr Einsatz mit einem höheren Energieaufwand, insbesondere für Rückspülungen, und der regelmäßigen Entfernung und fachgerechten Entsorgung des abgeschiedenen Materials verbunden ist. Filter tragen dazu bei, die Plastikbelastung in Gewässern, auch bei Starkregen und Mischwasserüberläufen, nachhaltig zu reduzieren. Um die Umsetzung effektiv und wirtschaftlich zu gestalten, ist die Identifikation von Akkumulationszonen essenziell, d.h. nicht alle Straßenabflüsse im Trennsystem und auch nicht alle Mischwasserentlastungsanlagen sollten aufgerüstet werden, sondern nur diejenigen mit besonders hoher Plastikfracht. Mithilfe von Stoffstrommodellen können die relevanten Einleitungsstellen lokalisiert und der Ressourceneinsatz optimiert werden (vgl. ReMiPla⁹³, Interview 7).

Um diese Maßnahmen umzusetzen, bedarf es einer regulatorischen Nachschärfung, da zusätzliche Maßnahmen, die über die bestehenden Anforderungen hinausgehen, für die

⁹¹ <https://www.bmbf-plastik.de/de/node/494.html> (26.02.2025)

⁹² <https://www.srf.ch/news/schweiz/massnahme-gegen-pneubrieb-wie-aus-einer-trueben-bruehe-wieder-klares-wasser-wird> (23.01.2025).

⁹³ <https://ewlw.de/remipla/> (19.02.2025).

Kanalbetreiber in der Regel nicht gebührenfähig sind (Interview 7). Es wäre ratsam, eine soziale Abfederung einzuführen, da höhere Gebühren unvermeidbar sind und sozialpolitisch ausgeglichen werden sollten. Alternativ könnten diese Maßnahmen auch über öffentliche Förderungen refinanziert werden.

3.1.2 TEK für Kläranlagen

Für die Weiterentwicklung der Reinigung in Kläranlagen ist die schrittweise Einführung der 4. Reinigungsstufe⁹⁴ von zentraler Bedeutung und ist bereits durch die EU-Kommunalabwasserrichtlinie 2024/3019 vorgesehen: Bis 2045 müssen alle Kläranlagen mit einer Kapazität von mehr als 150.000 Einwohnerwerten mit einer 4. Reinigungsstufe nachgerüstet werden (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024). Die Kernidee ist die Reduktion problematischer Stoffe wie Stickstoff und Phosphor sowie langlebige toxische Chemikalien. Die vierte Reinigungsstufe kann durch verschiedene Verfahren realisiert werden, wobei die Wahl der Methode von den spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten der jeweiligen Kläranlage abhängt (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024). Die gängigen Verfahren sind Aktivkohleadsorption⁹⁵, Ozonierung⁹⁶, oder Membranfiltration⁹⁷. Bei Installation einer Membran ist die Entfernung feinsten Partikel, inklusive Mikroplastik inkludiert. Sandfilter könnten als Ergänzung zur Ozonierung, oder Aktivkohleadsorption installiert werden (vgl. Weissenburg in Bayern⁹⁸), um u.a. die Mikroplastikentfernung zu verbessern (Wolff et al. 2020). In Deutschland wurden bereits rund 50 Kläranlagen mit dieser Technologie nachgerüstet, was die technische und organisatorische Umsetzbarkeit belegt (Interview 7). Weitere Maßnahmen im Bereich der kommunalen Kläranlagen sind daher nicht zwingend notwendig. Stattdessen wäre es sinnvoll, diese Reinigungsstufe zeitnah – und nicht erst bis 2045 – einzuführen. Dazu sollten Kläranlagenbetreiber finanziell und regulatorisch besser unterstützt werden. Insbesondere die Umsetzung der im Verursacherprinzip vorgesehenen Beteiligung von Pharma- und Kosmetikindustrie ist entscheidend, so wie nach EU-Kommunalabwasserrichtlinie (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024) vorgesehen. Darüber hinaus könnte eine Erweiterung der Kostenbeteiligung auf die Plastikindustrie erwogen werden, um die Finanzierung langfristig zu sichern und die Umweltbelastung effektiv zu reduzieren.

In der plastikproduzierenden, oder plastikverarbeitenden Industrie mit hohen Ablaufwerten für Plastik ist der Einsatz von Agglomerations-Fixierungsreaktionen, Sandfilter, und/oder Membranen sinnvoll (vgl. Kap. 2.1), bei kommunalem Abwasser ist dies aus Abwägungen der Kosten bzw. des Material- und Energieaufwands im Vergleich zum Nutzen eher nicht zu empfehlen (Interview 7).

Die Kombination aus flächendeckenden Maßnahmen zur Misch- und Niederschlagswasserbehandlung einschließlich gezielter Ergänzung durch Filtertechnologien an Akkumulationszonen und der schrittweisen Einführung der vierten Reinigungsstufe bildet einen vielversprechenden Ansatz zur signifikanten Reduktion der Plastikbelastung in Gewässern über den Abwasserpfad. Diese Maßnahmen sollten durch standardisierte Messmethoden, klare regulatorische Rahmenbedingungen und Förderprogramme für die verstärkte Misch- und Niederschlagswasserbehandlung und auch für kleinere Kläranlagen flankiert werden, um nachhaltige und umfassende Lösung zu gewährleisten.

⁹⁴ Die 4. Reinigungsstufe in Kläranlagen ist eine zusätzliche Behandlungseinheit, die gezielt Mikroverunreinigungen wie Arzneimittelrückstände, Hormone und Pestizide (meist) mittels Aktivkohle, Ozonung oder Membranverfahren entfernt, um die Wasserqualität weiter zu verbessern.

⁹⁵ Einsatz von Pulveraktivkohle (PAK) oder granuliert Aktivkohle (GAK), die Spurenstoffe durch Adsorption entfernen.

⁹⁶ Oxidation von Mikroschadstoffen mittels Ozons.

⁹⁷ Physikalische Abtrennung von Mikroschadstoffen durch Membranen.

⁹⁸ <https://www.stmuv.bayern.de/themen/wasserwirtschaft/abwasser/spurenstoffe> (17.02.2025).

3.2 Einsatzszenarium Bereich Flüsse und Flussmündung

Wie anhand der Steckbriefe in Kapitel 2.2 illustriert wurde, widmet sich eine große Anzahl an TEK Flüssen und Flussmündungen, einschließlich Hafengebieten. In diesem Kapitel werden zwei konkrete Anwendungsbeispiele näher beleuchtet, bisherige Einsatzszenarien skizziert und erste Überlegungen für zukünftige/weitere Einsatzszenarien diskutiert. Zunächst betrachten wir das Baltimore Trash Wheel, eine stationäre Technologie, die sich für den Einsatz in Häfen oder Flussmündungen eignet. Anschließend stellen wir die Müllsammelboote des Typs SeeHamster genauer vor, die gezielt Plastikmüllansammlungen im Fluss ansteuern können.

Die Beispiele wurden ausgewählt, da sie geringe ökologische Auswirkungen haben, als effizient gelten, von erneuerbaren Energien betrieben werden und die Abfallbehandlung der gesammelten Kunststoffe Teil ihres Konzeptes ist. Zudem stechen sie positiv hervor, da sie Informationen zu den gesammelten Abfällen transparent machen. Beide Technologien werden aktuell erfolgreich in der Praxis angewendet.

3.2.1 Reinigung an Häfen und Flussmündungen mit Trash Wheels

Die Baltimore Trash Wheels sind fest verankerte, schwimmende Müllsammelsysteme, die in der Stadt Baltimore an der Ostküste der Vereinigten Staaten in verschiedenen Wasserwegen installiert wurden. Ihr Zweck ist es, Plastik und anderen Abfall aus dem Wasser zu entfernen, bevor dieser in die Bucht *Chesapeake Bay* und von dort in den Atlantik gelangt. Baltimore liegt an der Mündung des 63 Kilometer langen Flusses Patapsco. Der Hafen von Baltimore spielt eine wichtige Rolle im internationalen Handel, insbesondere für den Import und Export von Autos, schweren Maschinen und Rohstoffen.

Insgesamt sind im Hafen von Baltimore vier Anlagen installiert, die jeweils strategisch an der Mündung von Fließgewässern platziert sind. Die erste Anlage, „Mr. Trash Wheel“, wurde im Jahr 2014 errichtet, die anderen drei zwischen 2016 und 2021. Entworfen wurde das Müllsammelsystem von John Kellett, einem Umweltwissenschaftler und Schiffsbauer. Seine Firma *Clearwater Mills LLC* betreibt die Trash Wheels, während die öffentlich-private Organisation *Waterfront Partnership of Baltimore* für die Finanzierung und Öffentlichkeitsarbeit zuständig ist.⁹⁹

Die Idee der Trash Wheels ist es, den Fluss hinabtreibende Abfälle mit Hilfe von schwimmenden Barrieren zu der Müllsammelanlage zu leiten. Die Anlage ist auf einer fest verankerten Barge installiert und schwimmt ebenfalls auf dem Wasser. Sie arbeitet mit Hilfe eines großen Wasserrads, an dem rotierende Rechen befestigt sind, die den Müll aus dem Wasser heben und auf ein Förderband legen. Das Förderband transportiert die Abfälle in einen Müllcontainer auf der Barge. Sobald der Müllcontainer voll ist, wird er durch einen neuen Container ausgetauscht. Bei ausreichender Strömung wird die Anlage über das Wasserrad allein durch Wasserkraft angetrieben. Zusätzlich sind Solarpaneele auf dem Dach der Anlage installiert, die das Wasserrad bei Bedarf mit Strom versorgen. Die Barrieren haben eine Art Schürze von etwa 50 cm, sodass auch knapp unter der Wasseroberfläche schwimmender Müll aufgefangen wird. Der Fokus dieser TEK liegt dennoch auf Plastikmüll, der an der Oberfläche treibt. Zudem sind die schwimmenden Barrieren in der Lage, Ölteppiche einzudämmen.¹⁰⁰

Die Anlagen arbeiten semi-autonom, d. h. es ist keine Besatzung für den Normalbetrieb erforderlich. Angetrieben durch Wasserkraft und bei Bedarf zusätzlich durch Solarenergie, die von Solarpaneelen auf dem Dach der Anlage erzeugt wird, benötigen die Trash Wheels keine externe Stromzufuhr. Durch die schwimmenden Barrieren werden die Abfälle ohne menschliche

⁹⁹ <https://www.mrtrashwheel.com/trash-wheel-family> (28.01.2025).

¹⁰⁰ <https://www.mrtrashwheel.com/technology> (14.01.2025).

Unterstützung zur Anlage geleitet. Um die Abfallcontainer zu wechseln ist jedoch Personal erforderlich.¹⁰¹

Die Baltimore Trash Wheels sind für einen dauerhaften Betrieb konzipiert, können also tags und nachts laufen. Bei Bedarf können sie aber abgeschaltet werden, z. B. für Wartungsarbeiten. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Anlagen bei starken Regenfällen besonders effektiv arbeiten. Tatsächlich lassen sich 90 % des von den Baltimore Trash Wheels eingesammelten Mülls auf Regenfälle zurückführen, denn hier treffen zwei zentrale Faktoren zusammen: eine stärkere Strömung und eine erhöhte Menge an Plastikmüll. Bei starken Niederschlägen werden herumliegende Müllteile aus den urbanen Gebieten in die Regenwasserabflüsse befördert und gelangen ungefiltert in die Flüsse und das Hafenbecken Baltimores. Hier ist es also besonders sinnvoll, dass die Anlagen treibende Abfälle entfernen. So hat beispielsweise einmal nach einem großen Regenereignis eine einzige der Anlagen 20 volle Müllcontainer mit Abfall und Schutt eingesammelt. An sonnigen Tagen dagegen bleiben die Anlagen häufig inaktiv und laden lediglich ihre Energiespeicher auf.¹⁰²

Übertragen auf andere Regionen ergibt sich daraus als ein mögliches Einsatzszenario, mit strategisch platzierten Trash Wheels an Fluss- oder Kanalmündungen insbesondere nach starken Niederschlägen Plastikeinträge in die Gewässer schnell wieder aufzufangen. Dieses Szenario könnte auch für Deutschland relevant sein, da auch hier Starkregenereignisse auftreten und in ihrer Häufigkeit, durch den Klimawandel bedingt, voraussichtlich zunehmen werden. Inwieweit die Problemstellung und der Lösungsansatz in Baltimore sich auf deutsche Häfen übertragen lässt, müsste zunächst genauer geprüft werden.

Ein Nachteil der Trash Wheels ist, dass zwar ein erheblicher Teil, aber nicht alle Plastikabfälle entfernt werden können. Mikroplastik und Plastikteile in der Wassersäule und vom Grund werden nicht erfasst. Auch dies wäre zu berücksichtigen bei einem Transfer der Technologie; für Orte mit starker Mikroplastikbelastung (z. B. an Standorten der Kunststoffproduktion, an denen viele Pellets in die Umwelt gelangen; (vgl. Kiessling et al. 2021) wären Trash Wheels weniger geeignet.

Neben der Entfernung von Plastikmüll und anderen Abfällen aus den Gewässern verfolgen die Betreiber der Baltimore Trash Wheels zwei weitere Ziele:

- Daten über die Plastikverschmutzung der Gewässer zu liefern für die Forschung sowie politische Entscheidungsträger:innen und
- über das Plastikmüllproblem aufzuklären und Menschen zum Handeln zu inspirieren.

Zur Aufklärung, Umweltbildung und Inspiration trägt u. a. die auffällige Gestaltung der Anlagen mit großen Kulleraugen bei. Darüber hinaus trägt jede Anlage einen individuellen Namen (Mr. Trash Wheel, Professor Trash Wheel, Captain Trash Wheel, Gwynnda). Für diese bewusste Personifizierung hatten sich die Verantwortlichen entschieden, um die lokale Bevölkerung für die Anlagen zu begeistern.¹⁰³ Die Anlagen operieren dadurch nicht versteckt im Hintergrund, sondern sollen bewusst Aufmerksamkeit erregen. Sie gelten als touristische Attraktion und sind auch in den sozialen Medien aktiv und haben zahlreiche Follower:innen.¹⁰⁴ Zudem werden regelmäßig Freiwillige eingebunden in Aktivitäten, die mit den Trash Wheels in Zusammenhang stehen.¹⁰⁵ Von mehreren Wissenschaftler:innen werden die Baltimore Trash Wheels neben ihrer ökologischen Verträglichkeit und Effizienz auch wegen dieser aktiven

¹⁰¹ <https://www.mrtrashwheel.com/trash-interception> (28.01.2025).

¹⁰² <https://www.mrtrashwheel.com/trash-interception> (14.01.2025).

¹⁰³ <https://www.mrtrashwheel.com/trash-wheel-family> (28.01.2025).

¹⁰⁴ <https://riversarelife.com/articles/revolutionizing-harbor-cleanup-the-story-of-mr.-trash-wheel-in-baltimore> (28.01.2025).

¹⁰⁵ <https://www.mrtrashwheel.com/volunteer-opportunities> (28.01.2025).

Einbindung der Gemeinde als Positivbeispiel unter den TEK angesehen (Falk-Andersson et al. 2023).

In Bezug auf Transparenz können die Baltimore Trash Wheels als Vorbild dienen. Die gesammelten Abfälle werden dokumentiert und über eine öffentlich einsehbare Datentabelle auf der Website transparent gemacht. Für jede einzelne der vier Anlagen können die gesammelten Abfallmengen (nach Gewicht und Volumen) jeder Leerung eingesehen werden. Die Einträge sind jeweils mit Datumsangabe versehen und es sind sowohl die an dem Tag entnommenen Gesamtmengen als auch Stückzahlen von häufig vorkommenden Müllkategorien angegeben. Aus der Tabelle lässt sich die Information entnehmen, dass die erste Anlage („Mr. Trash Wheel“) seit ihrer Inbetriebnahme im Jahr 2014 insgesamt etwa 2.150 Tonnen Abfälle aus dem Hafengewässer entfernt hat (Stand Dezember 2024). Einen großen Anteil machten Kunststoffabfälle aus, u. a. Zigarettenfilter (ca. 12 Millionen Stück), Plastikflaschen (ca. 1,3 Millionen Stück) und Styropor-Verpackungen (ca. 940.000 Stück).¹⁰⁶ Die Dokumentation der Daten soll Entscheidungsträger:innen aus Politik und Wirtschaft als Grundlage dienen, u. a. für künftige Gesetzgebungen zur Regulierung der Plastikmüllverschmutzung.¹⁰⁷

Die Kosten für den Bau und die Installation eines Trash Wheels werden auf etwa 850.000 USD geschätzt und die laufenden Betriebskosten pro Jahr betragen etwa 10.000 USD (International Trash Trap Network 2024). Diese Kostenangaben stellen nur eine grobe Einschätzung dar und können je nach Standortbedingungen stark abweichen. Im Vergleich zu anderen Technologien erfordern die Trash Wheels damit sehr hohe Investitionskosten für die Errichtung, sind im Betrieb aber relativ günstig.

Die vier Anlagen in Baltimore sammeln etwa 500 Tonnen Abfälle pro Jahr. Eine Anlage allein entfernte im Jahr 2023 beispielsweise 207 Tonnen Abfälle.¹⁰⁸ Im Vergleich dazu entfernt die Great Bubble Barrier in Amsterdam, die ebenfalls fest installiert ist und sich an einem Hafen befindet, durchschnittlich nur etwa eine Tonne Plastikmüll pro Jahr.¹⁰⁹ Diese enormen Unterschiede können zum Teil darauf zurückgeführt werden, dass beim Trash Wheel sämtliche Abfälle einbezogen sind, während für den Luftblasenvorhang in den Niederlanden nur Plastikmüll gezählt wurde. Möglich ist außerdem, dass insgesamt weniger Abfälle in den Hafen von Amsterdam eingetragen werden, als es in Baltimore der Fall ist. Bevor in den Bau von TEK wie den Trash Wheels oder Luftblasenhängen investiert wird, sollte daher genau analysiert werden, welche Mengen und welche Arten von Müll am jeweiligen Standort zu erwarten sind.

Als ein Vorteil der Trash Wheels gegenüber der Great Bubble Barrier kann gesehen werden, dass erstere nicht durchgängig Tag und Nacht laufen und daher weniger Energie verbrauchen.

3.2.2 Flexible Reinigung von Plastikmüll-Akkumulationszonen mit Müllsammelbooten

Die „SeeHamster“-Müllsammelboote wurden von der Umweltorganisation One Earth – One Ocean e.V. (OEOO) entwickelt. Diese hat ihren Sitz in München und unterhält Büros in Kiel, Rio (Brasilien), Phnom Penh (Kambodscha) und Manila (Philippinen). Die Organisation ist aktuell in elf Ländern aktiv, u. a. Ägypten, Brasilien, Deutschland¹¹⁰, Uganda, Kambodscha, Malaysia, Indonesien und den Philippinen.¹¹¹

¹⁰⁶ Die Datentabelle ist abrufbar unter: <https://www.mrtrashwheel.com/trash-interception> (28.01.2025).

¹⁰⁷ <https://www.mrtrashwheel.com/trash-wheel-family> (24.01.2025).

¹⁰⁸ Diese Zahl ist aus den Angaben der Datentabelle der Baltimore Trash Wheels errechnet. Abrufbar unter: <https://www.mrtrashwheel.com/trash-interception> (28.01.2025).

¹⁰⁹ <https://thegreatbubblebarrier.com/impact-bubble-barrier-amsterdam/> (26.11.2024).

¹¹⁰ In Deutschland ist OEOO in verschiedenen Forschungs- und Bildungsprojekten aktiv. Von der Organisation entwickelte Boote kamen in der Ostsee zur Rückholung von Geisternetzen zum Einsatz. <https://oneearth-oneocean.com/unsere-projekte/geisternetze-bergen-in-der-ostsee/> (12.02.2025)

¹¹¹ <https://oneearth-oneocean.com/> (24.01.2025).

OEOO verfolgt das Konzept der „Maritimen Müllentsorgung“, bei dem im Sinne einer Kreislaufwirtschaft Plastikmüll als Wertstoff verstanden wird. Das Ziel ist, Gewässer weltweit von Plastikabfällen zu befreien und diese möglichst zurück in den Wirtschaftskreislauf zu geben. Mit Hilfe verschiedener, spezieller Müllsammelboote werden Kunststoffabfälle aus dem Wasser eingesammelt und direkt sortenrein sortiert und aufbereitet, damit sie einem Recycling zugeführt werden können. Die Fraktionen, die zu stark verschmutzt oder aus anderen Gründen nicht recyclingfähig sind, werden zur Energierückgewinnung in Verbrennungsanlagen gegeben.¹¹²

Die OEOO verfügt über eine Flotte an unterschiedlichen Müllsammelfahrzeugen. Selbst entwickelt hat die Organisation die kleineren SeeHamster, die für den Einsatz auf Binnengewässern konzipiert sind, die größeren Circular Explorer (bzw. Seekuh) für küstennahe Regionen auf Meeren oder größere Müllansammlungen auf Flüssen und das Müllverwertungsschiff SeeElefant¹¹³, auf dem Plastikabfälle direkt recycelt oder in einen Energieträger umgewandelt werden können.

Der erste SeeHamster wurde 2011 gebaut und in Deutschland getestet; seitdem wurde das Müllsammelboot, ein kompakter Katamaran mit geringem Tiefgang, kontinuierlich weiterentwickelt und optimiert. Je nach Einsatzgebiet können die Boote baulich an die lokalen Anforderungen angepasst werden. Vom Grundtyp her handelt es sich um einen kompakten Katamaran mit geringem Tiefgang. Inzwischen sind 15 SeeHamster weltweit im Einsatz; zwei weitere werden vor Ort in Kambodscha im Jahr 2025 gebaut (Interview 8); 12 verschiedene Modelle sind auf der Website der Organisation abgebildet.¹¹⁴ Die SeeHamster-Typen unterscheiden sich insbesondere in

- ihrer Länge und Breite (meist 4,5-6 Metern Länge und 2-3 Metern Breite)
- der Antriebsart (teilweise Elektro-, teilweise konventionelle Motoren)
- der Müllfang-Ausrüstung (z. B. bewegliche Körbe, Netze, Förderbänder)

Im Folgenden fokussieren wir uns auf die moderneren SeeHamster-Modelle, die mit Förderbandtechnik ausgestattet sind und mit erneuerbaren Energien betrieben werden.

Das **Förderband** transportiert Abfälle vom Wasser auf das Boot. Direkt am Förderband wird von der Besatzung sortiert, was aus dem Fluss entfernt werden und was dort verbleiben soll. Nur Dinge, die nicht in den Fluss gehören, werden auf das Boot geladen, während organische Materialien wie Äste oder Nusschalen zurück in den Fluss geworfen werden. Falls ein Tier auf das Förderband gelangt, wird es sofort von der Besatzung gesehen und wieder ins Wasser gegeben (Interview 8). Durch diese selektive Entnahme von Abfällen aus dem Wasser werden die Auswirkungen auf das Flussökosystem gering gehalten (vgl. Bergmann et al. 2023). Da das Förderband mit einer niedrigen Fördergeschwindigkeit arbeitet, ist das Risiko für Verletzungen von Flusslebewesen gering, falls diese mit dem Gerät in Berührung kommen (Interview 8).

Diese direkte Sortierung erleichtert die spätere Abfallverwertung. Indem die Kunststoffabfälle direkt getrennt und nicht gemischt mit organischen und anderen Abfällen zwischengelagert werden, bleiben sie sauberer und es bilden sich keine starken Gerüche. (Interview 8).

Grundsätzlich können die SeeHamster sinnvoll dort eingesetzt werden, wo hohe Konzentrationen an Plastikmüll vorzufinden sind und sich größere Mengen an Plastikmüll mit einem vertretbaren Zeit- und Energieaufwand zurückholen lassen, wie dies derzeit in vielen Ländern mit fehlenden oder unzureichendem Abfallmanagement der Fall ist. Im Gegensatz dazu wäre es

¹¹² <https://oneearth-oneocean.com/die-loesung/die-maritime-muellentsorgung/> (24.01.2025).

¹¹³ <https://oneearth-oneocean.com/die-loesung/der-seeelefant/> (27.01.2025).

¹¹⁴ <https://oneearth-oneocean.com/die-loesung/der-seehamster/> (27.01.2025).

nicht effizient, vereinzelt treibenden Müllobjekten hinterherzufahren und diese einzusammeln (Interview 8). Vor diesem Hintergrund ergeben sich folgende Einsatzmöglichkeiten:

- **Gezieltes Aufsuchen von Plastikmüll-Akkumulationszonen:** In Flüssen können durch spezifische Umweltbedingungen Anhäufungen von Plastikabfällen entstehen wie beispielsweise an Flussbiegungen oder Brückenpfeilern. Diese Stellen können mit dem SeeHamster gezielt aufgesucht werden, um den Müll einzusammeln.
- **Kombination der Förderbandtechnik mit Barrieren:** Mit dem SeeHamster wird eine geeignete Stelle im Fluss aufgesucht und nach Bedarf eine einfache Barriere aufgebaut. Die Strömung des Flusses wird genutzt, um mit Hilfe der Barriere an der Oberfläche treibende Abfälle zu konzentrieren. Diese werden anschließend dem Förderband zugeführt.

Die Kombination aus Barrieren und kleinen Booten mit Förderbandtechnik hat sich als sehr effizient erwiesen: Mit einem SeeHamster können auf diese Weise 600 oder sogar 1.000 Kilogramm Kunststoff an einem Tag aus dem Fluss entfernt werden (Interview 8). Aktuell wird dieses Vorgehen in Indonesien auf der Insel Java angewendet.

- **Kombination einer Sammlung am Ufer und im Wasser:** In stark mit Plastikmüll belasteten geografischen Gegenden, wo Trocken- und Regenzeiten sich abwechseln, kann es nach Erfahrung der Organisation OEOO am effizientesten sein, in der Trockenzeit zu sammeln und die Ufer einzubeziehen. In bestimmten Abschnitten des Mekong in Kambodscha sei beispielsweise in der Trockenzeit das Wasser nur noch etwa 20 bis 30 cm tief. Der Fluss hätte dann bis zu 10 Meter Uferhänge freigelegt, die oftmals dicht mit Abfällen bedeckt seien. Hier kann der mit bis zu acht Personen besetzte SeeHamster den gewählten Flussabschnitt ansteuern und beispielsweise sechs Personen am Ufer absetzen, die dort manuell Plastikmüll sammeln. Die restlichen Crewmitglieder sammeln auf dem Wasser schwimmende Plastikabfälle mit dem SeeHamster ein (Interview 8). Anschließend wird der am Ufer gesammelte Müll auf den SeeHamster geladen und zu einem Sammelzentrum gebracht, wo er gereinigt, getrocknet und sortiert wird.¹¹⁵
- **Kombination verschiedener Sammeltechniken:** Ein weiteres Einsatzszenario besteht darin, mehrere SeeHamster-Typen mit unterschiedlichen Funktionen zu kombinieren, um Plastikmüll aus großen, stark verschmutzten Flüssen zurückzuholen (z. B. in Südostasien, Afrika; (vgl. Meijer et al. 2021). Dies wird in einem aktuellen Projekt von OEOO, der Schwarz Gruppe (Zusammenschluss aus Lidl und Kaufland) und einer lokalen NGO in Indonesien auf der Insel Java am Flusssystem des Citarum umgesetzt. Um unter verschiedenen Bedingungen am Fluss und am Ufer effektiv Abfall einzusammeln, werden drei Seehamster mit jeweils unterschiedlichen Sammeltechniken eingesetzt: Rampe, Förderband und ein großer Sammelkorb). Das Besondere an dem 3-jährigen Projekt ist, dass alle Boote mit Elektromotoren ausgerüstet sind, deren Wechselbatterien über Photovoltaik an Land geladen werden. Die Arbeit mit den verschiedenen Geräten setzt eine gute Finanzierung voraus, welche in diesem Fall durch die Schwarz Gruppe gegeben ist.¹¹⁶

Um stark mit Plastikmüll belastete Regionen und Ökosysteme zu entlasten, könnte die deutsche Bundesregierung Einsatz von Müllsammelbooten im Ausland im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit unterstützen. Ein Fokus auf Flüsse und ggf. stark verschmutzte

¹¹⁵ <https://oneearth-oneocean.com/unsere-projekte/oeco-in-kambodscha/> (27.01.2025).

¹¹⁶ <https://oneearth-oneocean.com/unsere-projekte/oeco-in-indonesien/> (28.01.2025).

Küstenregionen, also ein Einsatz nah an den Eintragsquellen, ist dabei als effektiver und kosteneffizienter anzusehen als die Plastikmüllentfernung auf dem Ozean (Interview 6, Interview 8).

In Deutschland selbst gilt die Verschmutzung von Flüssen mit Makroplastik insgesamt und die entsprechende Dichte an Plastikmüll als eher gering. Jedoch können beispielsweise nach Hochwasserereignissen, Havarien, starken Stürmen oder anderen Vorfällen akute Verschmutzungen auftreten, bei denen viele Kunststoffe und andere Materialien in die Fließgewässer gelangen. In solchen Fällen können Müllsammelbooten dabei unterstützen, die Verschmutzung und weitere Schäden schnell einzudämmen. Je nach Situation könnte die Vorgehensweise, Müllsammelboote mit Barrieren zu kombinieren hierbei anbieten, um einer weiteren Verteilung von Kunst- und möglichen Schadstoffen stromabwärts entgegenzuwirken.

Die Kosten für die neueren SeeHamster liegen je nach Ausstattung und Größe zwischen 20.000 und 45.000 USD. Mit modernerer Ausstattung fallen die Kosten entsprechend höher aus als für einfachere Modelle. So kostet der SeeHamster vom Typ „Jakarta Solar“, der mit einem Förderband, Elektromotor und einem Photovoltaikdach versehen ist, etwa 45.000 EUR. Im Vergleich dazu kostet der SeeHamster Typ „Jakarta 2“, der mit einem Elektroantrieb und beweglichem Fangkorb ausgestattet ist, mit 30.000 EUR deutlich weniger.¹¹⁷

Ein Vorteil der SeeHamster ist, dass sie sich durch ein kompaktes Design auszeichnen, womit ein einfacher Einsatz und potenziell niedrigere Betriebskosten als bei größeren Fahrzeugen erreicht werden. Dadurch sind die SeeHamster nach Einschätzung von OEEO gut skalierbar und der Einsatz solcher Boote könnte auf weitere Einsatzorte ausgeweitet werden.¹¹⁸

Zusätzlich zur Reduzierung der Plastikmüllverschmutzung konnte die NGO OEEO in ihren Einsatzgebieten in Südostasien eine Reihe von Arbeitsplätzen für die lokale Bevölkerung mit ihren Clean-Up- und Reinigungszentren Strukturen für die Abfallverwertung schaffen. Wichtig ist es der Organisation, ihre Zentren und Aktivitäten langfristig zu betreiben und den Menschen vor Ort eine reguläre Arbeit anstelle des informellen *waste picking* zu verschaffen (Interview 8).

¹¹⁷ <https://oneearth-oneocean.com/wp-content/uploads/2024/03/SeeHamster-Typen.pdf> (27.01.2025).

¹¹⁸ Informationen wurden von OEEO für dieses Gutachten bereitgestellt.



Abbildung 5: Einsatz eines SeeHamsters mit Förderband in Jakarta. Quelle: Foto von © One Earth – One Ocean (OEOO), bereitgestellt von OEOO.

3.3 Einsatzszenarium Bereich Meere

Viele Studien und viele der interviewten Expert:innen gehen davon aus, dass die Reinigung der Meere und des Ozeans nur unter bestimmten Bedingungen sinnvoll und kein gut skalierbarer Ansatz ist. Dies hat mehrere Gründe:

- **Hohe Kosten:** Die Kosten für die Bergung von Müll aus dem offenen Meer sind sehr hoch – und zwar sowohl die ökonomischen Kosten (vgl. Kapitel 2.5 und Kapitel 2.6), als auch die ökologischen (vgl. Kapitel 2.4).
- **Schlechte Sortierbarkeit und Recyclingfähigkeit:** Je länger Plastik im Meerwasser lag, desto schlechter ist es zu sortieren (Interview 8) und zu recyceln (vgl. Kapitel 2.6).
- **Gefährdung von Ökosystemen:** Auf hoher See sind die Ökosysteme oftmals besonders fragil, Habitate können leichter zerstört werden (Interview 2, Interview 4).
- **Nicht effektiv genug:** Jährlich wird so eine große Menge zusätzlichen Mülls in die Meere und den Ozean eingetragen, dass der *end-of-pipe*-Ansatz nicht effektiv ist (vgl. Kapitel 3.4). Viel effektiver ist es gemäß der EU-Abfallhierarchie Maßnahmen früher im Lebenszyklus anzusetzen (vgl. auch Kapitel 3.4).

Eine wichtige Empfehlung aus einem Interview lautet, zu prüfen, ob eine vorgeschlagene TEK auch an Land akzeptabel wäre. Wie eine Expertin es sinngemäß ausdrückte: Entwerfen Sie nie etwas für den Ozean, das Sie nicht auch an Land einsetzen würden. Wenn es keine gute Idee zu sein scheint, ein Netz durch einen Wald zu ziehen, um Plastik zu entfernen, ist es das auch für das offene Meer nicht (Interview 4). Das Ziehen großer Netze oder das Nutzen invasiver

Strukturen, wie zum Beispiel Tauchroboter kann Korallenriffe, Fische und andere Meeresbewohner gefährden. Einige Ansätze bergen auch das Risiko des Beifangs, insbesondere wenn sie auf kleine Plastikteile abzielen (Interview 1). Die Minimierung ökologischer Störungen ist von entscheidender Bedeutung, d. h. die Technologien müssen standortspezifisch sein und sich auf die Entfernung von Makroplastik konzentrieren, wo dies möglich ist (Interview 1), d.h. auf Plastikteil größer 5 mm.

Die Reinigung von Meeren und dem Ozean kann demnach unter bestimmten Bedingungen sinnvoll sein, z. B. wenn es um bestimmte Akkumulationszonen geht, d. h. **besonders verschmutzte Gebiete**. Oder wenn es um die Entfernung z. B. von **Geisternetzen und -leinen** geht.

3.3.1 TEK für Geisternetze und -leinen

Einen Ansatz zur Bergung von Geisternetzen verfolgt z. B. das Ocean Voyages Institute (OVI). Es ist eine gemeinnützige Organisation mit Hauptsitz in San Francisco, USA, das 1979 von der Seglerin und Umweltschützerin Mary T. Crowley gegründet wurde. OVI beteiligt sich an Clean-Up-Aktionen, bei denen Plastikmüll, insbesondere Geisternetze und -leinen¹¹⁹, d.h. verlorenes Fischfanggerät, aus dem Wasser geholt werden. Zur Müllbeseitigung verzichtet die Organisation auf eigene Technologien, und greift stattdessen auf bewährte Satelliten- und Drohnentechnologien zurück.

Geisternetze treiben z. T. jahrelang im offenen Gewässer, bevor sie schließlich auf den Meeresboden absinken. Sie bedrohen die Flora und Fauna der marinen Ökosysteme auf vielfältige Weise und gehören zu den gefährlichsten Plastikteilen (Roman et al. 2021). So verfangen sich beispielsweise Schildkröten, Delfine und Fische in den Netzen und sterben häufig an Verletzungen oder aufgrund von Sauerstoffmangel.

Geisternetze sind außerdem ein Sicherheitsproblem für die Seeschifffahrt (Interview 4). Eine Studie, die die Auswirkungen von Geisternetzen auf die Südkoreanische Marine im Zeitraum 2010 bis 2015 untersuchte hat gezeigt, dass sich die ca. 170 Marineschiffe durchschnittlich 2,3 Mal pro Jahr in Geisternetzen verfangen haben (Hong et al. 2017). Pro Schiff waren das etwa 25 Kilogramm Geisternetze und insgesamt ca. 10 Tonnen pro Jahr (Hong et al. 2017).

Das Aufspüren und Einholen von Geisternetzen ist daher eine wichtige Maßnahme, um die Seeschifffahrt sicherer zu machen und Schäden für die Meeresumwelt zu verringern. Gemäß eigenen Angaben hat das OVI 2020 etwa 170 Tonnen Plastikmüll entfernt,¹²⁰ andere Quellen sprechen von 103 Tonnen entfernter Geisternetze während einer 48-Tage-Fahrt.¹²¹ Zum Vergleich: Das TOC-System 002 hat im Jahr 2022 insgesamt 153 Tonnen Kunststoffabfälle (Makroplastik) aus dem Pazifik entfernt und war 150 Tage unterwegs.¹²² Der OVI-Ansatz ist somit relativ günstig und effektiv (Interview 4).

Zur Lokalisierung des Mülls nutzt das OVI verschiedene Methoden wie Satelliten- und Drohnentechnologien. Darüber hinaus erhält es Informationen von der Schifffahrtsgemeinschaft. Forschungsschiffe, kommerzielle Schiffe (Handel, Fischerei) und Segler:innen melden Sichtungen von Geisternetzen und anderen Müllansammlungen an das OVI. Diese Daten geben

¹¹⁹ Für Geisterleinen, also vom Fangschiff losgelöste, teilweise sehr langen Angelleinen mit vielen Haken, gilt entsprechend, was in diesem Abschnitt zu Geisternetzen ausgeführt ist.

¹²⁰ Vgl. <https://www.oceanvoyagesinstitute.org/home/> (27.01.2025).

¹²¹ Vgl. <https://vimeo.com/831085933> (27.01.2025) und <https://www.lonelyplanet.com/news/ocean-voyages-institute-clean-up> (27.01.2025).

¹²² <https://theoceancleanup.com/updates/system-002-signs-off-for-2022-redeployment-in-spring-2023/> (26.11.2024).

Hinweise auf potenzielle Plastik-Akkumulationszonen, also Meeresstellen, in denen Plastikmüll in hoher Konzentration vorgefunden wird.

Sichten Schiffe größere Treibnetze, werden GPS-Tracker an ihnen befestigt. Das OVI stellt diese Tracker bereit (Kosten ca. 100 USD/Stück, Interview 4), sodass sich alle, die wollen, beim Tracken der Geisternetze beteiligen können. 2018 verteilte OVI z. B. 18 GPS-Satellitentracker an verschiedene Schiffe, darunter Schiffe von Greenpeace und Sea Shepherd, sowie an Seeleute, die von Kalifornien nach Hawaii fahren. Die Besatzungen all dieser Schiffe brachten die Peilsender an den Fischernetzen an, auf die sie stießen, so dass ein auf Hawaii stationiertes Frachtschiff den Müll später einsammeln konnte. 2019 wurden dank dieser GPS-Tracker 40 Tonnen Müll aus dem Meer geholt.¹²³

Gerade dieses offene System, in dem Wissen generiert und geteilt wird, ist auch für die Wissenschaft sehr wichtig (Interview 4). Denn das OVI kann über Satellitendaten die Position der Netze verfolgen, so dass die Wissenschaftsgemeinschaft auch noch mehr über Meeresströmungen und Akkumulationszonen erfahren kann, worüber noch sehr wenig bekannt ist (Interview 4). Sobald diese Zonen kartiert sind, entsendet das OVI Teams bestehend aus Seefahrer:innen, Umweltexpert:innen und z. T. Freiwilligen mit einem Segelschiff, um die getrackten Teile einzusammeln. Zum Vergleich: TOC hat ein eigenes Wissenschaftsteam und ist nicht komplett transparent bei der Veröffentlichung von Daten und Ergebnissen. Man muss sich auf ihre Ergebnisse verlassen und kann sie nicht überprüfen (Interview 4), was ein Grundpfeiler der guten wissenschaftlichen Praxis ist.

Ein weiterer Grundpfeiler guter wissenschaftlicher Praxis ist Ergebnisoffenheit. Unabhängige Wissenschaftler kritisieren, dass TOC nicht ergebnisoffen (d.h. nicht unvoreingenommen) ist (Interview 3). Der Begriff „legacy plastic“ wurde durch TOC geprägt, dabei befinden sich nur 0,001 % des jemals hergestellten Plastiks an der Meeresoberfläche (Interview 3). Der Ozean spült es stattdessen ständig an die Strände und Küsten oder aber das Plastik sinkt ab (Interview 3, Interview 8).

Die Besatzung ist darauf geschult, so viel schädliches Material wie möglich einzusammeln, bevor es sich weiter zu Mikroplastik zersetzen kann. Anschließend werden die Abfälle an Bord katalogisiert und in die Häfen von Honolulu (Hawaii) oder der Westküste der USA zurückgebracht und dort in Kooperation mit Recyclingfirmen oder anderen Partnern verarbeitet oder recycelt.¹²⁴

Geisternetze sind auch in Deutschland ein Problem. Hier hat der WWF seit 2014 eine Methodik zum Aufspüren und Bergen von verlorenem Fischereigerät entwickelt und zwischen 2021 und 2023 in einem Pilotprojekt mit lokalen Fischereibetrieben und Tauchgruppen in den Küstengewässern Mecklenburg-Vorpommerns in engem Austausch mit den Behörden getestet.¹²⁵

3.3.2 Initiativen „Fishing for Litter“

„Fishing for Litter“ ist eine gemeinschaftliche Initiative zur Verringerung der Meeresverschmutzung, bei der die Fischerei direkt in die Bergung und möglichst verantwortungsvolle Entsorgung von Müll auf hoher See einbezogen wird. Die zugrundeliegende Idee: Anstatt Plastik und andere Abfälle, die sich versehentlich in Fischernetzen verfangen haben, zurück ins Meer zu werfen, bringen die Fischer:innen sie an Land, wo sie ordnungsgemäß behandelt und entsorgt oder auch recycelt werden. Grundsätzlich können zwei Arten unterschieden werden: (1) der passive

¹²³ Vgl. <https://www.kqed.org/science/1944183/pacific-plastic-purge-attempt-serves-as-a-reminder-of-the-daunting-task-ahead> (27.02.2025).

¹²⁴ Vgl. <https://www.oceanvoyagesinstitute.org/home/> (30.01.2025).

¹²⁵ wwf.de/geisternetze-landesprojekte (24.02.2025)

Ansatz, der sich auf das Sammeln von Abfällen im Meer während der täglichen Fischereitätigkeit konzentriert, ohne dass ein finanzieller Anreiz besteht. Und (2) der aktive Ansatz, bei dem die Fischer:innen zielgerichtet an bestimmten Orten Abfälle sammeln und dafür bezahlt werden (Wyles et al. 2019). Ein Beispiel für das passive „Fischen nach Abfällen“ ist das KIMO-Programm „Fishing For Litter“ (FFL), bei dem Fischer:innen freiwillig an dem Programm teilnehmen. Bei diesem Programm werden den teilnehmenden Fischereifahrzeugen ca. ein Kubikmeter große, strapazierfähige Säcke zur Verfügung gestellt, in denen die Fischer:innen die Abfälle, die sie in ihren Netzen auffangen während sie auf See sind, sammeln können. Sobald die Säcke voll sind, werden sie angelandet und zu ausgewiesenen FFL-Behältern gebracht. Von dort werden sie zur Entsorgung mitgenommen und, wo möglich, sortiert, gewogen, erfasst und recycelt (Wyles et al. 2019). Die Vereinbarung umfasst häufig die Koordinierung mit den Hafenbehörden und Abfallentsorgungsunternehmen, um eine reibungslose Abwicklung zu gewährleisten.¹²⁶ In Deutschland sind derzeit 170 Schiffe und 18 Häfen an der Nord- und Ostsee beteiligt.¹²⁷

Dieses Modell wurde in den Niederlanden entwickelt und getestet und in verschiedenen Teilen der Welt übernommen (Mannaart und Bentley 2022), wobei die Programme zumeist von Umweltorganisationen, Regierungsbehörden und den Fischergemeinden gemeinsam selbst koordiniert werden.¹²⁸ Diese Methode erfordert nur eine minimale Änderung der Fangroutinen und ist daher äußerst kostengünstig.¹²⁹ Das FFL-System ist inzwischen eine international anerkannte Initiative (Wyles et al. 2019). Der Vorteil dieser Methode ist, dass hier auch Müll vom Meeresboden erfasst wird.

Wie viel Tonnen (Plastik-)Müll dabei eingesammelt wird, variiert. In den elf Jahren zwischen 2020 und 2021 wurden z. B. in niederländischen Häfen insgesamt 4.189 Tonnen (Plastik-)Müll angelandet. Wie hoch dabei der Anteil an Kunststoff ist, ist nicht benannt. Grundsätzlich sind jedoch mindestens 70 Prozent des Meeresmülls Plastik (Tekman et al. 2022).¹³⁰

Ein Vorteil des Konzepts ist, dass die Fischer:innen direkt durch ihre routinemäßigen Aktivitäten auf See involviert sind (Interview 3). Je nach dem, in welcher Gegend und was gefangen wird, wird neben dem eigentlichen Fang auch der Müll von der Meeresoberfläche, der Wassersäule oder dem Meeresboden eingesammelt. Fischer:innen sind zwar keine Müllsammler:innen, aber normalerweise trennen sie ohnehin Plastik und andere Abfälle von ihrem Fang (Interview 2). Durch die Nutzung ihrer Anwesenheit auf See wird das vorhandene Arbeitskräftepotenzial ausgeschöpft, anstatt völlig separate Fahrten zu finanzieren, die außerdem einen zusätzlichen ökologischen Fußabdruck mit sich bringen würden. Dieser Ansatz gewährleistet daher eine konstante, kostengünstige Sammelaktion. Die Bereitstellung kostenloser Entsorgungseinrichtungen bietet einen weiteren Anreiz zur Teilnahme, ohne den Fischer:innen komplexe logistische Anforderungen aufzuerlegen.

In vielen Fischereigemeinden fördert „Fishing for Litter“ ein Umdenken und einen kollektiven Geist der Umweltvorsorge. Außerdem erfährt es oft eine starke Unterstützung der lokalen Bevölkerung und stärkt die Beziehungen zwischen Fischer:innen, Anwohner:innen und Umweltbehörden (Wyles et al. 2019).

Programme, die systematisch die Arten und Mengen von Abfällen erfassen, können wertvolle Daten für umfassendere Bemühungen zur Identifizierung von Verschmutzungsschwerpunkten oder zur Verfolgung von Trends bei der Meeresvermüllung im Laufe der Zeit liefern (Interview

¹²⁶ <https://www.kimointernational.org/fishing-for-litter/> (27.01.2025).

¹²⁷ <https://fishingforlitter.org/germany/> (27.01.2025).

¹²⁸ <https://www.kimointernational.org/fishing-for-litter/> (27.01.2025).

¹²⁹ <https://www.fishingforlitter.org/> (27.01.2025).

¹³⁰ https://litterbase.awi.de/litter_graph (31.01.2025).

2). Diese Informationen können dann als Grundlage für politische Änderungen oder gezielte Interventionen dienen, wie es z. B. bei der EU-Richtlinie 2019/904 (Einwegkunststoff-Richtlinie) der Fall war. Dabei wurden die bei Strandsäuberungen meistgefunden Produkte aus Einwegkunststoff zu Grunde gelegt.

Der Ansatz hat aber auch Nachteile. Wie bereits ausgeführt, ist die Vermüllung der Meere ein großflächiges Problem. Auch „Fishing for Litter“ ist keine umfassende Lösung (vgl. auch Kapitel 3.4), auch wenn es als einer der wenigen Ansätze Müll vom Meeresboden entfernt. Aber die gesammelten Netze sind nicht sauber. Oft ist der Plastikmüll vom Meeresboden aber auch der von der Meeresoberfläche mit Organismen besiedelt (Haram et al. 2023). Manchmal befinden sich doppelt so viele gestielte Seepocken auf einem Netz wie das Netz selbst groß ist. Der geborgene Müll ist nie sauber (Interview 3). Das gilt aber für alle TEK-Aktivitäten.

Der FFL-Ansatz hängt zudem in der Regel von der freiwilligen Teilnahme der Fischer:innen ab. Die Beteiligungsquoten können je nach Region variieren, und ohne eine konsequente oder weit verbreitete Beteiligung kann die Menge des gesammelten Mülls im Vergleich zum Gesamtverschmutzungsgrad minimal sein.¹³¹ Andererseits gibt es auch das aktive Fishing for Litter, bei dem Fischer:innen dafür bezahlt werden, wenn sie Müll mit anlanden. Ein interviewter Experte gab an, dass TOC eine Machbarkeitsstudie erstellt habe, wonach die Säuberung des Ozeans sieben Euro pro Kilogramm kostet (Gesamtkosten). Seiner Meinung nach wäre ein Euro pro Kilogramm genug Anreiz für die Fischer:innen, z. B. Netze wieder an Land zu bringen, sobald sie sie sehen (Interview 3). Allerdings ist diese Art der gezielten Müllfischerei – im Gegensatz dazu, Müll mitzunehmen und abzugeben, wenn er als „Beifang“ sowieso bereits aus dem Wasser geholt wurde –, insbesondere am Meeresboden, mit enormen Umweltkosten verbunden, die durch erheblichen Beifang und der Zerstörung des Meeresbodens und der damit verbundenen Ökosystemfunktionen wie Kohlenstoffspeicherung resultieren können.

Darüber hinaus kann die Sicherstellung einer angemessenen Infrastruktur für die Abfallentsorgung - z. B. ausreichende Hafenauffangeinrichtungen - und die Deckung der damit verbundenen Kosten eine Herausforderung darstellen. Die langfristige Lebensfähigkeit des Programms hängt auch von stabilen Finanzierungsquellen für Absatzbehälter, Entsorgungsgebühren und logistische Unterstützung ab.

3.4 Vergleich zu Vermeidungsstrategien

Mehrere der interviewten Expert:innen geben an, dass TEK zwar eine gewisse Rolle spielen können, warnen jedoch davor, dass die Entfernung allein die Plastikkrise nicht lösen kann. Ein entscheidender Grund dafür ist die schiere Menge an Plastik, die in die Umwelt gelangt, so dass *end-of-pipe*-Maßnahmen allein nicht ausreichen (Interview 1, Interview 4, Interview 5). Eine Verringerung der Plastik-Produktion und ein besseres Abfallmanagementsystem sind kosteneffizienter und effektiver als groß angelegte Projekte im offenen Meer (Interview 1, Interview 4).

Dies liegt auch daran, dass ein Großteil des Meeresmülls gar nicht auf offener See zu finden ist (vgl. Abbildung 7).¹³²

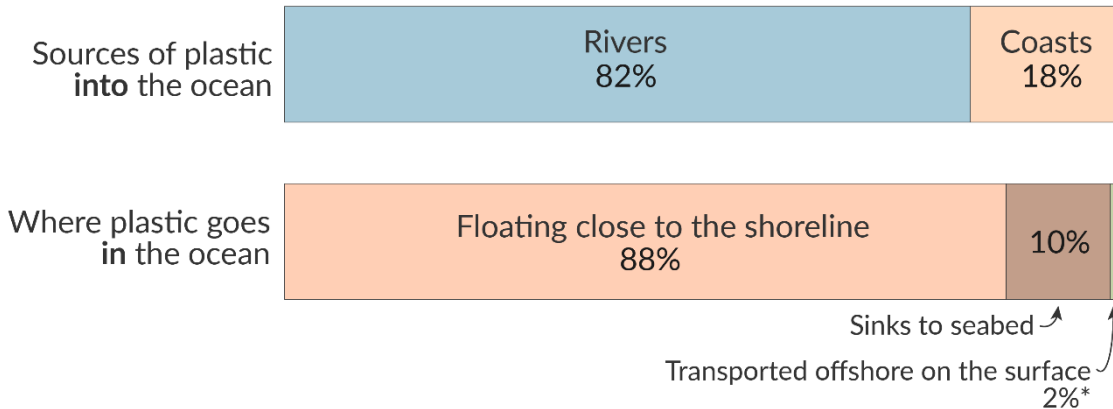
¹³¹ Laut NABU haben bis 2021 europaweit 1.520 Fischereifahrzeuge in über 140 Häfen an den nationalen Fishing-For Litter-Initiativen teilgenommen und 4.200 Tonnen Müll aus dem Meer geholt, vgl. https://www.nabu.de/imperia/md/nabu/images/projekte-aktionen/meere/4FL/nabu_f4l-faltblatt_web.pdf, 28.02.2025.

¹³² Die OECD-Daten in Abbildung 7 gehen von ca. 1,7 Mio. Tonnen Plastik aus, die jedes Jahr im Ozean landen. Andere Quellen geben 16-23 Mio. Tonnen pro Jahr an (Borrelle et al. 2020).

Where do ocean plastics end up?

Our World
in Data

Around 1.7 million tonnes of plastic enters the oceans each year. The sources of this from rivers and coasts is shown, alongside estimates of where this plastic goes.



*The source does not give an exact figure for offshore plastic: it labels it as '<0.1 Mt'. The 2% given here is therefore an estimate.

Data source: OECD Global Plastic Outlook (2022).

Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.

Abbildung 6: Where do ocean plastics end up?, Quelle: Our World in Data¹³³, Autorin: Hannah Ritchie (CC-BY)

Demnach sind schätzungsweise lediglich zwei Prozent des Meeresmülls an der Oberfläche auf offener See zu finden, zehn Prozent sinken auf den Meeresboden und 88 Prozent befinden sich in der Nähe der Küste.¹³⁴

Ein immer wiederkehrendes Thema ist, dass die Beseitigung von Plastik am effektivsten ist, wenn sie in Küstennähe oder an Flussmündungen durchgeführt wird, bevor sich die Abfälle im offenen Meer verteilen (Interview 4, Interview 3, Interview 5). Einer Schätzung zufolge werden 89 % des Plastiks im Meer innerhalb eines Jahres an Land gespült (Interview 4). Folglich kann durch die Beseitigung von Müll an Stränden, in Küstengebieten oder in Flüssen ein erheblicher Teil des Abfallstroms abgefangen werden. Dieser Ansatz ist auch mit weniger logistischen Herausforderungen und geringeren Kosten verbunden als die Arbeit auf hoher See (Interview 4; Interview 2).

Viele Kunststoffe enthalten toxische Chemikalien. Eine Erhebung ergab, dass 16.000 verschiedenen Chemikalien in Plastikprodukten zum Einsatz kommen, davon sind rund ein Viertel als gefährlich eingestuft, und für ca. 10.000 Chemikalien fehlen Daten (Wagner et al. 2024). Auch PFAS, sog. „Ewigkeitschemikalien“ sind häufig enthalten.¹³⁵ Eine aktuelle Untersuchung schätzt, dass allein die Beseitigung der Altlasten im Vereinigten Königreich in den nächsten 20 Jahren ca. 428 Millionen Pfund pro Jahr kosten wird (etwa 509 Mio. Euro), wenn man die vorhandenen Kostendaten zugrunde legt. Dies würde die Sanierung von kontaminierten Böden, Deponiesickerwasser und die Behandlung von fünf Prozent des Trinkwassers in großen Wasserversorgungsgebieten allein für die beiden regulierten PFAS-Verbindungen PFOS und PFOA abdecken. Diese Kostenschätzungen sind konservativ, also tendenziell deutlich zu niedrig, da sie nur die Dekontaminationskosten, nicht aber die sozioökonomischen Kosten oder die potenziellen Kosten für das Gesundheitssystem umfassen. Dabei werden PFAS u.a. für Krebs und

¹³³ <https://ourworldindata.org/how-much-plastic-waste-ends-up-in-the-ocean> (28.01.2025).

¹³⁴ Diese Zahlen sind Schätzungen. Andere gehen davon aus, dass wesentlich mehr Plastik auf den Meeresgrund sinkt. Für das Mittelmeer wird z. B. geschätzt, dass 49–63% des Meeresmülls wieder an die Küsten gespült werden und 37–51% gesunken sind (Kaandorp et al. 2020).

¹³⁵ Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (*per- and polyfluoroalkyl substances*, abgekürzt PFAS).

Unfruchtbarkeit verantwortlich gemacht. Außerdem wird bei der Schätzung angenommen, dass die PFAS-Emissionen sofort eingestellt werden.¹³⁶

Ein weiteres Problem ist, dass die Kosten der Schäden von Regierungen bzw. der Öffentlichkeit getragen werden (müssen), während die Kosten der Prävention beim privaten Sektor liegen würden – wo auch die Gewinne liegen. Das Geschäftsmodell der petrochemischen Industrie funktioniert aber nur deshalb so gut, weil die Kosten der Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen eben auf die Öffentlichkeit umgelegt werden (vgl. auch Kapitel 3.1).

Wissenschaftliche Erkenntnisse legen außerdem nahe, dass die Kosten der Schäden, die durch Plastikverschmutzung entstehen, die Kosten der Präventionsmaßnahmen übersteigen (Cordier et al. 2024). Es wäre billiger und effektiver, der Plastikverschmutzung durch vorgelagerte Maßnahmen zu begegnen, d.h. früher im Lebenszyklus, anstatt sich auf nachgelagerte Aufräumaktionen zu verlassen (Scientists' Coalition for an Effective Plastics Treaty 2024a; Simon et al. 2021). Diese Kosten der Untätigkeit umfassen oftmals noch nicht die Kosten für die Gesundheit von Menschen und Umwelt, dabei liegen inzwischen einige Daten und Erkenntnisse dazu vor (Cropper et al. 2024; Landrigan et al. 2023; Trasande et al. 2024). Außerdem reichen die derzeitigen Lösungen nicht aus, um die erwartete Zunahme der Kunststoffproduktion – und damit auch der Plastikverschmutzung – zu bewältigen (Borrelle et al. 2020).

Mehrere Befragte raten dazu, TEK auf ihre allgemeine Praktikabilität und Kosteneffizienz zu prüfen (Interview 1). Groß angelegte Maßnahmen auf offener See können enorme Ressourcen verbrauchen – sowohl in Bezug auf die Finanzierung als auch auf den Treibstoff – und können ungewollt Umweltschäden verursachen (Interview 4; Interview 2). Im Gegensatz dazu bieten kleinere, gezielte Maßnahmen wie Mülltonnen in Häfen, schwimmende Barrieren in Flüssen und Strandsäuberungen oft ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis (Interview 1; Interview 3).

Hinzu kommt, dass präventive Maßnahmen auch das Recycling praktikabler machen oder überhaupt erst ermöglichen. Wenn Plastik erst einmal Meerwasser, ultravioletten Strahlen, mechanischer Einwirkung und Meeresorganismen ausgesetzt war, ist es oft verunreinigt und in seiner Struktur verändert (Interview 2; Interview 3). Außerdem übersteigen die hohen Kosten für die Verarbeitung von im Meer gesammeltem Kunststoff in der Regel den Wert des recycelten Materials, so dass solche Initiativen in großem Maßstab wirtschaftlich nicht rentabel sind (Interview 1). Wenn man eine Kreislaufwirtschaft anstrebe, könne man dies nur tun, bevor Kunststoffe in die Umwelt gelangen, so ein Experte (Interview 4). Denn wenn Plastik z. B. länger im Meer treibt, kann es zusätzliche Schadstoffe anreichern und physisch abgebaut werden, was jegliche Versuche eines hochwertigen Recyclings erschwert (Interview 3; Interview 1). Autoteile, Teppiche und andere Produkte, die aus Kunststoffen aus dem Meer hergestellt werden, können eine unbekannt chemische Belastung aufweisen, was zu Bedenken hinsichtlich der Gesundheit am Arbeitsplatz und der Produkte führt (Interview 4).

Fischfanggeräte, wie Netze und Schleppnetze, sind gegenüber stark abgebautem Plastik aus dem Meer relativ leicht zu reparieren und zu recyceln (Interview 4).

Viele unabhängige Expert:innen sprechen sich nachdrücklich dafür aus, vorgelagerten Maßnahmen zur Eindämmung der Kunststoffproduktion und zur Verbesserung der Abfallentsorgungsinfrastruktur Vorrang einzuräumen (Baztan et al. 2024; Lau et al. 2020; PEW & Systemiq 2020) (Interview 1; Interview 2; Interview 3, Interview 4, Interview 5). Sie weisen auf ein „moralisches Risiko“ hin, wenn man sich zu sehr auf Reinigungstechnologien verlässt, die die Aufmerksamkeit von Präventionsmaßnahmen ablenken können (Interview 1, Interview 2, Interview

¹³⁶ <https://www.theguardian.com/environment/2025/jan/14/cost-clean-up-toxic-pfas-pollution-forever-chemicals> (28.01.2015).

4).¹³⁷ Selbst bei wirksamen nachgelagerten Maßnahmen besteht die Gefahr, dass Ressourcen absorbiert werden, die für die Beseitigung der eigentlichen Ursachen eingesetzt werden sollten, wie z. B. Überproduktion, schlechte kommunale Müllabfuhr oder fehlende Pfandsysteme (Interview 1; Interview 5).

4 Fazit und Ausblick

Die zunehmende Verschmutzung der Gewässer durch Plastikmüll stellt eine ernsthafte Bedrohung für aquatische Ökosysteme, die Biodiversität und letztlich auch für die menschliche Gesundheit dar. Dieses Gutachten hat verschiedene Technologien untersucht, die zur Entfernung von Kunststoffabfällen aus Gewässern beitragen können, und dabei sowohl ihre Effizienz als auch mögliche Risiken und Herausforderungen betrachtet.

Effektivität der Technologien

Die analysierten Technologien zur Entfernung von Kunststoffen (TEK) zeigen ein breites Spektrum an Effizienz, abhängig von ihren Einsatzgebieten und technischen Spezifikationen. Stationäre Lösungen wie Gitter, Netze, Müllräder zeichnen sich durch vergleichsweise hohe Rückhaltequoten bei Makroplastik aus und sind besonders in urbanen Gebieten und an Akkumulationszonen mit hoher Belastung effektiv. Filtersysteme aus der Abwassertechnik können Abwasser so aufbereiten, dass Mikroplastik daraus entfernt wird, bevor das Abwasser ins Gewässer eingeleitet wird. Filtersysteme bieten eine zuverlässige Grundlage, um die Plastikbelastung an Land und Flüssen zu minimieren, bevor diese in die Meere gelangt. Die mobile Technik, einschließlich Müllsammelboote und schwimmende Barrieren, ist flexibel und besonders geeignet, um akute Belastungen nach Hochwasserereignissen oder in stark verschmutzten Gebieten zu bewältigen. Der Einsatz solcher Technologien in Flüssen und Küstenregionen bietet das Potenzial, den Eintrag von Plastik in den Ozean signifikant zu reduzieren.

Entfernung von Plastik aus dem offenen Meer

Die Entfernung von Plastikmüll aus dem offenen Ozean wird von den Gutachter:innen als wenig sinnvoll bis schädlich eingeschätzt. Sie birgt erhebliche ökologische Risiken, wie die Störung von Lebensräumen und die Beeinträchtigung des Neustons, einer wichtigen Komponente mariner Ökosysteme. Gleichzeitig sind die eingesetzten Technologien teuer, energieintensiv und ineffizient, da sich Plastikmüll im Ozean stark verteilt und nur in geringen Konzentrationen vorliegt. Zudem kann das Plastik, das bereits eine Weile im Meer getrieben ist nur schlecht bis gar nicht sortiert und recycelt werden. Vor diesem Hintergrund sollte der Fokus auf Technologien gelegt werden, die in Abwässern, Flüssen, Flussmündungen und Küstenregionen angewendet werden, wo Plastikmüll effizienter gesammelt werden kann, bevor er in den offenen Ozean gelangt. Eine Ausnahme bilden Initiativen zur Bergung von verloren gegangenen Fischereigeräten sowie passive Fishing-for-litter Aktivitäten.

Einsatzmöglichkeiten in Abwasser-, Fluss- und Küstenbereichen

Die Untersuchung von Einsatzszenarien zeigt, dass der Bereich Abwasser ein besonders vielversprechender Ansatzpunkt für die Reduktion von Plastikmüll eintrage direkt in Deutschland ist. Technologien wie Regenrückhaltebecken und nachgeschaltete Filtersysteme können den Eintrag von Plastikpartikeln aus Mischwasserentlastungsanlagen und Straßenabflüssen signifikant reduzieren. Solche Maßnahmen sind zudem ökologisch und wirtschaftlich effizient. Die

¹³⁷ Vgl. auch <https://www.deutschlandfunkkultur.de/ocean-cleanup-nur-pr-gag-zweifel-am-schwimmenden-muellsauger-100.html> (29.01.2025).

schrittweise Einführung der vierten Reinigungsstufe in Kläranlagen bis 2045 (EU-Vorgabe der Richtlinie (EU) 2024/3019) ist entscheidend, um Restmengen an Mikroplastik und Nanoplastik sowie weitere problematische Stoffe wie Arzneimittelrückstände aus Abwasser zu entfernen.

In Flüssen und Flussmündungen können stationäre Technologien wie schwimmende Barrieren sowie mobile Lösungen wie Müllsammelboote gezielt eingesetzt werden. Die Anpassung an lokale Bedingungen, wie Flussbreite, Strömungsgeschwindigkeit, Schiffsverkehr und Artenschutz, ist dabei entscheidend für den Erfolg. Auch hier sollten unbeabsichtigte ökologische Folgen durch Beifang vermieden und Umweltverträglichkeitsprüfungen angestrebt werden. In Flüssen mit einer relativ geringen Verschmutzung durch Makroplastik, wie wir sie in Deutschland größtenteils vorfinden¹³⁸, werden diese Technologien in der Breite voraussichtlich keine große Wirkung entfalten. Ein wirkungsvollerer Hebel wären Strategien zur Vermeidung von Mikroplastik, welches durchaus ein Problem in deutschen Flüssen darstellt.

Möglicherweise könnten allerdings deutsche Häfen einen geeigneten Standort für stationäre Technologien wie die Müllräder darstellen – dies müsste im Einzelfall genau geprüft werden. Daten zur Plastikmüllbelastung sowie zu lokalen geografischen und ökologischen Bedingungen herangezogen werden. Besonders vielversprechend sind Ansätze, die eine technisch-unterstützte Entfernung von Plastikmüll mit Bildungsangeboten und einer aktiven Einbindung der lokalen Bevölkerung verbindet, beispielsweise über Citizen-Science-Ansätze. Einige Projekte in diesem Bereich wurden in deutschen Häfen bereits umgesetzt; hieran lässt sich anknüpfen. Zudem können Initiativen dieser Art dazu beitragen, die bislang schlechte Datenlage zur Plastikmüllbelastung von deutschen (und europäischen) Gewässern zu verbessern.

Darüber hinaus können mobile Technologien effektiv zur Müllbeseitigung nach akuten Emissionsereignissen beitragen, wie beispielsweise nach Hochwasserereignissen oder Havarien in Binnengewässern.

Für den Bereich Küsten und Meere sind insbesondere gezielte Maßnahmen wie die Bergung von Geisternetzen und der Einsatz von Müllsammelbooten an Akkumulationszonen relevant. Organisationen wie das Ocean Voyages Institute (OVI) zeigen, wie durch den Einsatz moderner Technologien Müll-Akkumulationszonen identifiziert und gezielte Bergungsaktionen durchgeführt werden können. Geisternetze stellen eine erhebliche Gefahr für marine Ökosysteme dar, da sie Meereslebewesen schädigen und langfristig zur Bildung von Mikroplastik beitragen. Müllsammelboote sind vor allem in Gebieten mit hoher Müllkonzentration sinnvoll, wie beispielsweise in einigen südostasiatischen Küstengebieten, in denen bislang keine ausreichenden Infrastrukturen für das Abfallmanagement bereitstehen und oftmals der Tourismus zusätzliche Kunststoffemissionen verursacht. Dennoch lösen TEK hier nicht das Problem und sollten ausschließlich in Kombination mit Maßnahmen zur Plastikmüllvermeidung und -reduzierung eingesetzt werden. Einzelne TEK könnten auch sinnvoll bei Havarien eingesetzt werden, aber eben nur dann.

Um angesichts der globalen Plastikkrise Verantwortung zu übernehmen, kann Deutschland sich im Rahmen der Forschungsförderung (im europäischen und internationalen Raum) und im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit für weitere Pilotprojekte und gezielte Restaurationsmaßnahmen an stark verschmutzten Flüssen einsetzen. Wie das Gutachten zeigt, sind Ansätze an Flüssen als effektiver und kosteneffizienter einzuordnen als die Entfernung von Plastikmüll auf dem offenen Ozean. Essentiell ist dabei, solche Ansätze zu unterstützen, die an die lokalen Bedingungen angepasst und ökologisch sowie sozial verträglich sind. Zudem muss die Verwertung der gesammelten Abfälle mitgedacht werden. Im Idealfall könnten in

¹³⁸ Einige Flüsse in Deutschland wie z. B. der Rhein weisen erhebliche Verschmutzung auch mit Makroplastik auf. Vgl. <https://www.bafg.de/SharedDocs/Projekte/Importer/M39620204063.html> (12.02.2025) und <https://krake.koeln/projekte/monitoring/> (12.02.2025).

entsprechenden Projekten Strukturen für die Abfallbehandlung und Vermeidung von Einträgen in die Umwelt aufgebaut werden.

Herausforderungen und Limitationen

Eine zentrale Herausforderung bleibt die nachhaltige Entsorgung der gesammelten Abfälle. Insbesondere Plastik aus marinen Quellen ist häufig stark verunreinigt und schwer recycelbar. Die energetische Verwertung stellt in vielen Fällen eine praktikable Alternative dar, wenngleich sie mit negativen Umweltauswirkungen wie CO₂-Emissionen verbunden ist. Darüber hinaus bestehen erhebliche Wissenslücken hinsichtlich der ökologischen Nebenwirkungen vieler Technologien, einschließlich möglicher Schäden durch Beifang und Habitatzerstörung. Eine Reduktion der Bestände geschützter Arten sollte vermieden werden, um die Biodiversitätskrise nicht weiter zu verschärfen.

Integration in Präventionsstrategien

Es ist von zentraler Bedeutung, dass TEK als Ergänzung zu präventiven Maßnahmen betrachtet werden. Der Schwerpunkt muss weiterhin auf der Vermeidung von Kunststoffabfällen liegen, insbesondere durch die Reduzierung der Produktion und des Verbrauchs von Einwegplastik und eine bessere Kreislaufwirtschaft. TEK können jedoch einen entscheidenden Beitrag leisten, um bereits entstandene Schäden zu mindern und die Zeit zu überbrücken, bis systemische Lösungen greifen. Unterstützend könnte die Lagerung – auch Zwischenlagerung – von Abfällen in von Überschwemmung bedrohten Flächen verboten werden. Es ist gängige Praxis, Müll und nicht mehr benötigtes Material in Hallen in Flussniederungen zu lagern, wobei es häufig vorkommt und auch absehbar ist, dass diese Gegenstände beim nächsten Hochwasser fortgespült werden.

Zukunftsperspektiven

Die Effektivität der Technologien könnte durch die Entwicklung einheitlicher Monitoring-Standards und den Einsatz von Künstlicher Intelligenz zur Vorhersage von Müll-Akkumulationszonen weiter gesteigert werden. Gleichzeitig bedarf es verstärkter Investitionen in Forschung und Infrastruktur, um die Kapazitäten zur Abfallbehandlung zu erweitern und die Wirtschaftlichkeit von Recyclingverfahren zu verbessern. International einheitliche Kriterien für Umweltverträglichkeitsprüfungen sind notwendig, um unbeabsichtigte ökologische Folgen vorab abschätzen und vermeiden zu können.

Allen TEK ist gemein, dass sie zwar vorhandenen Müll beseitigen, dabei aber nicht gegen die Ursachen der Meeresverschmutzung vorgehen. Ohne umfassendere systemische Veränderungen zur Reduzierung von Plastik an der Quelle wird der Zustrom neuer Abfälle ins Meer weitergehen und sogar noch zunehmen.

5 Literaturverzeichnis

- Ahmed, S. F., Islam, N., Tasannum, N., Mehjabin, A., Momtahn, A., Chowdhury, A. A., Al-momani, F., & Mofijur, M. (2024). Microplastic removal and management strategies for wastewater treatment plants. *Chemosphere*, 347, 140648. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140648>
- Allen, D., Linsley, C., Spoelman, N., & Johl, A. (2024). *The Fraud of Plastic Recycling How Big Oil and the plastics industry deceived the public for decades and caused the plastic waste crisis*. Center for Climate Integrity.
- Andrés, M., Delpey, M., Ruiz, I., Declerck, A., Sarrade, C., Bergeron, P., & Basurko, O. C. (2021). Measuring and comparing solutions for floating marine litter removal: Lessons learned in the south-east coast of the Bay of Biscay from an economic perspective. *Marine Policy*, 127, 104450. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104450>
- Baztan, J., Jorgensen, B., Carney Almroth, B., Bergmann, M., Farrelly, T., Muncke, J., Syberg, K., Thompson, R., Boucher, J., Olsen, T., Álava, J.-J., Aragaw, T. A., Bailly, D., Jain, A., Bartolotta, J., Castillo, A., Collins, T., Cordier, M., De-Falco, F., ... Wagner, M. (2024). Primary plastic polymers: Urgently needed upstream reduction. *Cambridge Prisms: Plastics*, 2, e7. <https://doi.org/10.1017/plc.2024.8>
- Bellou, N., Gambardella, C., Karantzalos, K., Monteiro, J., Canning-Clode, J., Stephanie Kemna, Stephanie Kemna, Kemna, S., Arrieta-Giron, C. A., Lemmen, C., & Lemmen, C. (2021). Global assessment of innovative solutions to tackle marine litter. *Nature Sustainability*, 4(6), 516–524. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00726-2>
- Bergmann, M., Arp, H. P. H., Carney Almroth, B., Cowger, W., Eriksen, M., Dey, T., Gündoğdu, S., Helm, R. R., Krieger, A., Syberg, K., Tekman, M. B., Thompson, R. C., Villarrubia-Gómez, P., Warrier, A. K., & Farrelly, T. (2023). Moving from symptom management to upstream plastics prevention: The fallacy of plastic cleanup technology. *One Earth*, 6(11), 1439–1442. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.10.022>
- Blettler, M. C. M., Agustini, E., Abrial, E., Piacentini, R., Garelo, N., Wantzen, K. M., Vega, M. G., & Espinola, L. A. (2023). The challenge of reducing macroplastic pollution: Testing the effectiveness of a river boom under real environmental conditions. *Science of The Total Environment*, 870, 161941. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161941>
- Borrelle, S. B., Ringma, J., Law, K. L., Monnahan, C. C., Lebreton, L., McGivern, A., Murphy, E., Jambeck, J., Leonard, G. H., Hilleary, M. A., Eriksen, M., Possingham, H. P., De Frond, H., Gerber, L. R., Polidoro, B., Tahir, A., Bernard, M., Mallos, N., Barnes, M., & Rochman, C. M. (2020). Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science*, 369(6510), 1515–1518. <https://doi.org/10.1126/science.aba3656>
- Brouwer, R., Huang, Y., Huizenga, T., Frantzi, S., Le, T., Sandler, J., Dijkstra, H., van Beukering, P., Costa, E., Garaventa, F., & Piazza, V. (2023). Assessing the performance of marine plastics cleanup technologies in Europe and North America. *Ocean & Coastal Management*, 238, 106555. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106555>



- Cho, D.-O. (2011). Removing derelict fishing gear from the deep seabed of the East Sea. *Marine Policy*, 35(5), 610–614. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2011.01.022>
- Chong, F., Spencer, M., Maximenko, N., Hafner, J., McWhirter, A. C., & Helm, R. R. (2023). High concentrations of floating neustonic life in the plastic-rich North Pacific Garbage Patch. *PLOS Biology*, 21(5), e3001646. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001646>
- Collie, J. S., Hall, S. J., Kaiser, M. J., & Poiner, I. R. (2000). A quantitative analysis of fishing impacts on shelf-sea benthos. *Journal of Animal Ecology*, 69(5), 785–798. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.2000.00434.x>
- Cordier, M., Uehara, T., Jorgensen, B., & Baztan, J. (2024). Reducing plastic production: Economic loss or environmental gain? *Cambridge Prisms: Plastics*, 2, e2. <https://doi.org/10.1017/plc.2024.3>
- Cottom, J. W., Cook, E., & Velis, C. A. (2024). A local-to-global emissions inventory of macroplastic pollution. *Nature*, 633(8028), 101–108. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07758-6>
- Cropper, M., Dunlop, S., Hinshaw, H., Landrigan, P., Park, Y., & Symeonides, C. (2024). The benefits of removing toxic chemicals from plastics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(52), e2412714121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2412714121>
- Dijkstra, H., van Beukering, P., & Brouwer, R. (2021). In the business of dirty oceans: Overview of startups and entrepreneurs managing marine plastic. *Marine Pollution Bulletin*, 162, 111880. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111880>
- Do, H.-L., & Armstrong, C. W. (2023). Ghost fishing gear and their effect on ecosystem services – Identification and knowledge gaps. *Marine Policy*, 150, 105528. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105528>
- Donnan, D. (2001). Effects of fishing on non-target species and habitats: Biological, conservation and socio-economic issues, edited by M.J. Kaiser and S.J. De Groot. Blackwell Science, Oxford, 2000 (hardback). Price £69.50. ISBN 0-632-05355-0. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 11(6), 488–488. <https://doi.org/10.1002/aqc.492>
- Egger, M., Nijhof, R., Quiros, L., Leone, G., Royer, S.-J., McWhirter, A. C., Kantakov, G. A., Radchenko, V. I., Pakhomov, E. A., Hunt, B. P. V., & Lebreton, L. (2020). A spatially variable scarcity of floating microplastics in the eastern North Pacific Ocean. *Environmental Research Letters*, 15(11), 114056. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbb4f>
- Egger, M., Schilt, B., Wolter, H., Mani, T., De Vries, R., Zettler, E., & Niemann, H. (2022). Pelagic distribution of plastic debris (> 500 µm) and marine organisms in the upper layer of the North Atlantic Ocean. *Scientific Reports*, 12(1), 13465. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17742-7>
- Environmental Investigation Agency & Ocean Care. (2023). *Clean-ups or clean washing? How plastic pollution clean up technology can actually harm the environment and obstruct policy progress*. <https://eia-international.org/wp-content/uploads/EIA-2023-Cleanwashing-Briefing-single-pages.pdf>



- Falk-Andersson, J., Haarr, M. L., & Havas, V. (2020). Basic principles for development and implementation of plastic clean-up technologies: What can we learn from fisheries management? *Science of The Total Environment*, 745, 141117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141117>
- Falk-Andersson, J., Rognerud, I., De Frond, H., Leone, G., Karasik, R., Diana, Z., Dijkstra, H., Ammendolia, J., Eriksen, M., Utz, R., Walker, T. R., & Fürst, K. (2023). Cleaning Up without Messing Up: Maximizing the Benefits of Plastic Clean-Up Technologies through New Regulatory Approaches. *Environmental Science & Technology*, 57(36), 13304–13312. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01885>
- Griffin, M. D., Diana, Z. T., Karasik, R., & Dunphy-Daly, M. M. (2024). Do plastic clean-up technologies work? What research does (and doesn't) tell us. *Marine Pollution Bulletin*, 209, 116978. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116978>
- Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179–199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>
- Haram, L. E., Carlton, J. T., Centurioni, L., Choong, H., Cornwell, B., Crowley, M., Egger, M., Hafner, J., Hormann, V., Lebreton, L., Maximenko, N., McCuller, M., Murray, C., Par, J., Shcherbina, A., Wright, C., & Ruiz, G. M. (2023). Extent and reproduction of coastal species on plastic debris in the North Pacific Subtropical Gyre. *Nature Ecology & Evolution*, 7(5), 687–697. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-01997-y>
- Hartmann, C., Lomako, I., Schachner, C., El Said, E., Abert, J., Satrapa, V., Kaiser, A.-M., Walch, H., & Köppel, S. (2024). Assessment of microplastics in human stool: A pilot study investigating the potential impact of diet-associated scenarios on oral microplastics exposure. *Science of The Total Environment*, 951, 175825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175825>
- Helinski, O. K., Poor, C. J., & Wolfand, J. M. (2021). Ridding our rivers of plastic: A framework for plastic pollution capture device selection. *Marine Pollution Bulletin*, 165, 112095. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112095>
- Hinzmann, M., Knoblauch, D., Mederake, L., Schritt, H., & Stein, U. (o. J.). *Kernbotschaften: BMBF-Forschungsschwerpunkt „Plastik in der Umwelt—Quellen · Senken · Lösungsansätze“*. (No. 2., überarbeitete Auflage). Ecologic Institut gemeinnützige GmbH.
- Hohn, S., Acevedo-Trejos, E., Abrams, J. F., Moura, J. F. de, Spranz, R., & Merico, A. (2020). The long-term legacy of plastic mass production. *Science of The Total Environment*, 746, 141115. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141115>
- Hong, S., Lee, J., & Lim, S. (2017). Navigational threats by derelict fishing gear to navy ships in the Korean seas. *Marine Pollution Bulletin*, 119(2), 100–105. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.006>
- International Trash Trap Network. (2024). *Trash Trap Device Directory*. Ocean Conservancy and University of Toronto.
- Jambeck, J. R., & Walker-Franklin, I. (2023). The impacts of plastics' life cycle. *One Earth*,



6(6), 600–606. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.05.015>

- Kaandorp, M. L. A., Dijkstra, H. A., & Van Sebille, E. (2020). Closing the Mediterranean Marine Floating Plastic Mass Budget: Inverse Modeling of Sources and Sinks. *Environmental Science & Technology*, *54*(19), 11980–11989. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01984>
- Kiessling, T., Knickmeier, K., Kruse, K., Gatta-Rosemary, M., Nauendorf, A., Brennecke, D., Thiel, L., Wichels, A., Parchmann, I., Körtzinger, A., & Thiel, M. (2021). Schoolchildren discover hotspots of floating plastic litter in rivers using a large-scale collaborative approach. *Science of The Total Environment*, *789*, 147849. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147849>
- Landrigan, P. J., Raps, H., Cropper, M., Bald, C., Brunner, M., Canonizado, E. M., Charles, D., Chiles, T. C., Donohue, M. J., Enck, J., Fenichel, P., Fleming, L. E., Ferrier-Pages, C., Fordham, R., Gozt, A., Griffin, C., Hahn, M. E., Haryanto, B., Hixson, R., ... Dunlop, S. (2023). The Minderoo-Monaco Commission on Plastics and Human Health. *Annals of Global Health*, *89*(1), 23. <https://doi.org/10.5334/aogh.4056>
- Lau, W. W. Y., Shiran, Y., Bailey, R. M., Cook, E., Stuchtey, M. R., Koskella, J., Velis, C. A., Godfrey, L., Boucher, J., Murphy, M. B., Thompson, R. C., Jankowska, E., Castillo, A. C., Pilditch, T. D., Dixon, B., Koerselman, L., Kosior, E., Favoino, E., Gutberlet, J., ... Palardy, J. E. (2020). Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science*, *369*(6510), 1455–1461. <https://doi.org/10.1126/science.aba9475>
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane, S., Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., Noble, K., Debeljak, P., Maral, H., Schoeneich-Argent, R., Brambini, R., & Reisser, J. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports*, *8*(1), 4666. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Leone, G., Catarino, A. I., Pauwels, I., Mani, T., Tishler, M., Egger, M., Forio, M. A. E., Goethals, P. L. M., & Everaert, G. (2022). Integrating Bayesian Belief Networks in a toolbox for decision support on plastic clean-up technologies in rivers and estuaries. *Environmental Pollution*, *296*, 118721. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118721>
- Leone, G., Moolaert, I., Devriese, L. I., Sandra, M., Pauwels, I., Goethals, P. L. M., Everaert, G., & Catarino, A. I. (2023). A comprehensive assessment of plastic remediation technologies. *Environment International*, *173*, 107854. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107854>
- Malinović, B. N., Markelj, J., Žgajnar Gotvajn, A., Kralj Cigić, I., & Prosen, H. (2022). Electrochemical treatment of wastewater to remove contaminants from the production and disposal of plastics: A review. *Environmental Chemistry Letters*, *20*(6), 3765–3787. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01497-8>
- Mani, T., Hauk, A., Walter, U., & Burkhardt-Holm, P. (2015). Microplastics profile along the Rhine River. *Scientific Reports*, *5*(1), 17988. <https://doi.org/10.1038/srep17988>
- Mannaart, M., & Bentley, A. (2022). Fishing for Litter: From the implementation of practical actions locally, to its spin-offs and the adoption of a new legally adopted waste type at continental scale, a success story. *Marine Policy*, *145*, 105256.



<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105256>

Meijer, L. J. J., Van Emmerik, T., Van Der Ent, R., Schmidt, C., & Lebreton, L. (2021). More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Science Advances*, 7(18), eaaz5803. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803>

Moulaert, I., Devriese, L. I., Sandra, M., & Pirlet, H. (2021). *Aquatic plastic catchers: Overview of current technologies, knowledge gaps and future opportunities* (VLIZ Policy Information).

Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2020). Plastic Debris in the Marine Environment: History and Future Challenges. *Global Challenges*, 4(6), 1900081. <https://doi.org/10.1002/gch2.201900081>

Nikiema, J., & Asiedu, Z. (2022). A review of the cost and effectiveness of solutions to address plastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18038-5>

Okoye, C. O., Addey, C. I., Oderinde, O., Okoro, J. O., Uwamungu, J. Y., Ikechukwu, C. K., Okeke, E. S., Ejeromedoghene, O., & Odii, E. C. (2022). Toxic Chemicals and Persistent Organic Pollutants Associated with Micro-and Nanoplastics Pollution. *Chemical Engineering Journal Advances*, 11, 100310. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100310>

Onink, V., Jongedijk, C. E., Hoffman, M. J., Van Sebille, E., & Laufkötter, C. (2021). Global simulations of marine plastic transport show plastic trapping in coastal zones. *Environmental Research Letters*, 16(6), 064053. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abecbd>

Parascanu, M. M., Díaz, J. C., Mijangos, M. R., Sarralde, M. I., Salle, D., & Galdames, A. A. (2025). Life cycle assessment of an innovative seabed cleaning platform for marine litter removal in aquatic ecosystems. *Environmental Technology & Innovation*, 37, 103971. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103971>

Paris, A., Kwaoga, A., & Hewavitharane, C. (2022). An assessment of floating marine debris within the breakwaters of the University of the South Pacific, Marine Studies Campus at Laucala Bay. *Marine Pollution Bulletin*, 174, 113290. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113290>

Parker-Jurd, F. N. F., Smith, N. S., Gibson, L., Nuojuua, S., & Thompson, R. C. (2022). Evaluating the performance of the 'Seabin' – A fixed point mechanical litter removal device for sheltered waters. *Marine Pollution Bulletin*, 184, 114199. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114199>

PEW & Systemiq. (2020). *Breaking the Plastic Wave. A comprehensive assessment of pathways towards stopping ocean plastic*. PEW + Systemiq.

Pinnekamp, J., Beier, S., Cramer, C., Schröder, H., Mauer, C., & Selke, D. (2009). *Eliminierung von Spurenstoffen aus Krankenhausabwässern mit Membrantechnik und weitergehenden Behandlungsverfahren* (Abschlussbericht No. AZ IV – 9 – 042 1B4 0020).

Rasmussen, L. A., Liu, F., Klemmensen, N. D. R., Lykkemark, J., & Vollertsen, J. (2024). Retention of microplastics and tyre wear particles in stormwater ponds. *Water Research*,



248, 120835. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120835>

- Rechlin, A., Langsdorf, S., Heni, Y., Hirschnitz-Garbers, M., Araujo, A., & Hinzmann, M. (2024). *Ressourceneffizienz und natürliche Ressourcen im internationalen Kontext. Entwicklungs-linien der Ressourcenpolitik mit Schwerpunkt auf Ressourcenschonung und Ressourcen-effizienz. Abschlussbericht.* Umweltbundesamt.
- Richardson, K., Hardesty, B. D., Vince, J., & Wilcox, C. (2022). Global estimates of fishing gear lost to the ocean each year. *Science Advances*, 8(41), eabq0135. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abq0135>
- Richtlinie (EU) 2024/3019 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. November 2024 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (2024). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202403019
- Rochman, C. M. (2016). Strategies for reducing ocean plastic debris should be diverse and guided by science. *Environmental Research Letters*, 11(4), 041001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/041001>
- Roman, L., Schuyler, Q., Wilcox, C., & Hardesty, B. D. (2021). Plastic pollution is killing marine megafauna, but how do we prioritize policies to reduce mortality? *Conservation Letters*, 14(2), e12781. <https://doi.org/10.1111/conl.12781>
- Ronkay, F., Molnar, B., Gere, D., & Czigany, T. (2021). Plastic waste from marine environment: Demonstration of possible routes for recycling by different manufacturing technologies. *Waste Management*, 119, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.029>
- Rynek, R., Tekman, M. B., Rummel, C., Bergmann, M., Wagner, S., Jahnke, A., & Reemtsma, T. (2024). Hotspots of Floating Plastic Particles across the North Pacific Ocean. *Environmental Science & Technology*, acs.est.3c05039. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05039>
- Schmaltz, E., Melvin, E. C., Diana, Z., Gunady, E. F., Rittschof, D., Jolly, M. K., Somarelli, J. A., Viridin, J., & Dunphy-Daly, M. M. (2020). Plastic pollution solutions: Emerging technologies to prevent and collect marine plastic pollution. *Environment International*, 144, 106067. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106067>
- Schmidt, C., Krauth, T., & Wagner, S. (2017). Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environmental Science & Technology*, 51(21), 12246–12253. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>
- Schneider, F., Parsons, S., Clift, S., Stolte, A., Krüger, M., & McManus, M. (2023). Life cycle assessment (LCA) on waste management options for derelict fishing gear. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(3), 274–290. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02132-y>
- Schneider, F., Parsons, S., Clift, S., Stolte, A., & McManus, M. C. (2018). Collected marine litter—A growing waste challenge. *Marine Pollution Bulletin*, 128, 162–174. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.011>
- Scientists' Coalition for an Effective Plastics Treaty. (2024a). *Cutting Plastic Pollution at the*



Source: *The Case for Upstream Solutions*. DOI: 10.5281/zenodo.14209812

- Scientists' Coalition for an Effective Plastics Treaty. (2024b). *Removal of existing and legacy plastic pollution*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.13998292>
- Scientists' Coalition for an Effective Plastics Treaty, Yates, J., & Deeney, M. (2024). *Policy Brief: Impacts of plastics across the food system*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.10653557>
- Silva, J., Morse, M. R., & Tamayo, V. (2021). *Plastic waste capture in rivers: An inventory of current technologies*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32896.92160>
- Simon, N., Raubenheimer, K., Urho, N., Unger, S., Azoulay, D., Farrelly, T., Sousa, J., Van Asselt, H., Carlini, G., Sekomo, C., Schulte, M. L., Busch, P.-O., Wienrich, N., & Weiland, L. (2021). A binding global agreement to address the life cycle of plastics. *Science*, 373(6550), 43–47. <https://doi.org/10.1126/science.abi9010>
- Spencer, M., Culhane, F., Chong, F., Powell, M. O., Roland Holst, R. J., & Helm, R. (2023). Estimating the impact of new high seas activities on the environment: The effects of ocean-surface macroplastic removal on sea surface ecosystems. *PeerJ*, 11, e15021. <https://doi.org/10.7717/peerj.15021>
- Sturm, M. T., Myers, E., Schober, D., Korzin, A., & Schuhen, K. (2024). Beyond Microplastics: Implementation of a Two-Stage Removal Process for Microplastics and Chemical Oxygen Demand in Industrial Wastewater Streams. *Water*, 16(2), 268. <https://doi.org/10.3390/w16020268>
- Tasseron, P. F., Van Emmerik, T. H. M., Vriend, P., Hauk, R., Alberti, F., Mellink, Y., & Van Der Ploeg, M. (2024). Defining plastic pollution hotspots. *Science of The Total Environment*, 934, 173294. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173294>
- Tekman, M. B., Walther, B. A., Peter, C., Gutow, L., & Bergmann, M. (2022). *Impacts of plastic pollution in the oceans on marine species, biodiversity and ecosystems*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5898683>
- Trasande, L., Krithivasan, R., Park, K., Obsekov, V., & Belliveau, M. (2024). Chemicals Used in Plastic Materials: An Estimate of the Attributable Disease Burden and Costs in the United States. *Journal of the Endocrine Society*, 8(2), bvad163. <https://doi.org/10.1210/jendso/bvad163>
- UNEP. (2021). *Drowning in Plastics – Marine Litter and Plastic Waste Vital Graphics*. United Nations Development Programme.
- UNEP & IRP. (2021). *Policy Options to Eliminate Additional Marine Plastic Litter by 2050 Under the G20 Osaka Blue Ocean Vision*. United Nations Environment Programme and International Resource Panel.
- United Nations Environment Programme. (2021). *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*. United Nations.
- Van Sebille, E., Aliani, S., Law, K. L., Maximenko, N., Alsina, J. M., Bagaev, A., Bergmann,



- M., Chapron, B., Chubarenko, I., Cózar, A., Delandmeter, P., Egger, M., Fox-Kemper, B., Garaba, S. P., Goddijn-Murphy, L., Hardesty, B. D., Hoffman, M. J., Isobe, A., Jongedijk, C. E., ... Wichmann, D. (2020). The physical oceanography of the transport of floating marine debris. *Environmental Research Letters*, 15(2), 023003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6d7d>
- Van Sebille, E., England, M. H., & Froyland, G. (2012). Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044040. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>
- Venghaus, D., Schmerwitz, F., Reiber, J., Sommer, H., Lindow, F., Herper, D., Pohrt, R., & Barjenbruch, M. (2021). *Abschlussbericht. Reifenabrieb in der Umwelt—RAU*. <https://bmbf-plastik.de/de/publikation/reifenabrieb-der-umwelt-rau-abschlussbericht>
- Wagner, M., Monclús, L., Arp, H. P. H., Groh, K. J., Løseth, M. E., Muncke, J., Wang, Z., Wolf, R., & Zimmermann, L. (2024). *State of the science on plastic chemicals—Identifying and addressing chemicals and polymers of concern*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.10701705>
- Wasave, S., Kamble, S., Kazi, T., Wasave, S., G. B., S., & Sharma, A. (2025). A bibliometric review on ghost fishing: Impacts on marine environment and governing measures. *Marine Pollution Bulletin*, 212, 117604. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117604>
- Wasser 3.0 gGmbH. (2024). *Filter-free, low-tech, and continuous microplastic removal technology for industrial and municipal wastewater*.
- Whitney, J. L., Gove, J. M., McManus, M. A., Smith, K. A., Lecky, J., Neubauer, P., Phipps, J. E., Contreras, E. A., Kobayashi, D. R., & Asner, G. P. (2021). Surface slicks are pelagic nurseries for diverse ocean fauna. *Scientific Reports*, 11(1), 3197. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81407-0>
- Winterstetter, A., Grodent, M., Kini, V., Ragaert, K., & Vrancken, K. C. (2021). A Review of Technological Solutions to Prevent or Reduce Marine Plastic Litter in Developing Countries. *Sustainability*, 13(9), 4894. <https://doi.org/10.3390/su13094894>
- Wolff, S., Weber, F., Kerpen, J., Winkhofer, M., Engelhart, M., & Barkmann, L. (2020). Elimination of Microplastics by Downstream Sand Filters in Wastewater Treatment. *Water*, 13(1), 33. <https://doi.org/10.3390/w13010033>
- Wyles, K. J., Pahl, S., Carroll, L., & Thompson, R. C. (2019). An evaluation of the Fishing For Litter (FFL) scheme in the UK in terms of attitudes, behavior, barriers and opportunities. *Marine Pollution Bulletin*, 144, 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.035>
- Yamashita, R., Tanaka, K., Yeo, B. G., Takada, H., Van Franeker, J. A., Dalton, M., & Dale, E. (2018). Hazardous Chemicals in Plastics in Marine Environments: International Pellet Watch. In H. Takada & H. K. Karapanagioti (Hrsg.), *Hazardous Chemicals Associated with Plastics in the Marine Environment* (Bd. 78, S. 163–183). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/698_2018_299

6 Liste der Interviews

Nr.	Name	Institution	Datum
1	Dr. Arturo Castillo Castillo	Universität Utrecht, Niederlande	26.11.2024
2	Dr. Carmen Morales	Universität Cadiz, Spanien	27.11.2024
3	Dr. Marcus Eriksen	5 Gyres Institute, USA	28.11.2024
4	Prof. Dr. Rebecca Helm	Georgetown Universität, USA	29.11.2024
5	Prof. Dr. Tim van Emmerik	Universität Wageningen, Niederlande	12.12.2024
6	Prof. Dr. Martin Wittmaier	Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft an der Hochschule Bremen GmbH	16.12.2024
7	Dr.-Ing. Tim Fuhrmann	Emscher Wassertechnik GmbH	09.01.2025
8	Günther Bonin, Dr. Harald Frank	One Earth – One Ocean e. V.	09.01.2025

Ecologic Institut
www.ecologic.eu

