

Bericht

**des Ausschusses für Forschung, Technologie, Raumfahrt
und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss)
gemäß § 56a der Geschäftsordnung**

Technikfolgenabschätzung (TA)**Technologische Möglichkeiten zur Reduktion von Kunststoffabfällen
in den Meeren**

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort des Ausschusses.....	3
Das Wichtigste in Kürze	7
1 Einleitung	9
2 Mengen und Verbleib von Kunststoffen im Meer	11
2.1 Quellen und Eintragspfade	11
2.2 Verbreitung und Akkumulationszonen.....	12
2.3 Zustand der Ost- und Nordsee	14
3 Gefährdung für Meereslebewesen, Menschen und Wirtschaft.....	16
4 Stand aktueller Entwicklungen von Technologien zur Entfernung von Kunststoffen aus Abwasser und Gewässern	19
5 Technologiebewertung und Einsatzmöglichkeiten	22
5.1 Behandlung von Abwasser und Regenwasser	22
5.1.1 Kläranlagen.....	22
5.1.2 Kanalisation.....	25
5.2 Stationäre Technologien an Flussmündungen und Häfen	27
5.3 Mobile Technologien zur Reinigung von Akkumulationszonen und Geisternetzen	31

	Seite
5.4 Fazit und übergreifende Erwägungen.....	35
6 Geltender regulatorischer Rahmen und Aktivitäten gegen Meeresmüll.....	38
7 Handlungsoptionen.....	41
7.1 Prävention priorisieren	41
7.2 Standortspezifische Reinigungsinterventionen bevorzugen	42
7.3 Standards und Leitlinien entwickeln	42
7.4 Internationale Kooperationen und Finanzierungsinstrumente ausbauen	43
8 Literatur	45
8.1 In Auftrag gegebene Gutachten	45
8.2 Weitere Literatur.....	45
9 Anhang.....	56
9.1 Europäischer Regulierungsrahmen für die Meerespolitik	56
9.2 Abbildungen	58
9.3 Tabellen	58

Vorwort des Ausschusses

Die zunehmende Verschmutzung der Meere mit Kunststoffabfällen ist eine globale Herausforderung, die ökologische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Auswirkungen mit sich bringt. Jährlich gelangen große Mengen an Plastik in die Ozeane, was die Nahrungszufuhr von Meerestieren beeinträchtigen kann, häufig mit letalen Folgen. Der Verzehr von mikroplastikbelasteten Fischen oder Muscheln kann dann zu einer Ablagerung von Plastik in menschlichen Organen führen. Hieraus können Gesundheitsrisiken und Kosten für das Gesundheitssystem entstehen.

Vor diesem Hintergrund wurde das Projekt „Technologische Möglichkeiten zur Reduktion von Kunststoffabfällen in den Meeren“ im Auftrag des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (20. WP) vom Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) durchgeführt. Ziel der Untersuchung war es, Potenziale und Auswirkungen technologischer Möglichkeiten zur Reduktion von Kunststoffabfällen in den Meeren zu analysieren. Hierfür sollte untersucht werden, wie Kunststoffabfälle sich im Meer sammeln und sich auf Meerestiere und Menschen auswirken, welche Technologien dabei helfen können, die Kunststoffmengen im Meer zu verringern, und mit welchen Risiken für Lebensräume und Ökosysteme wiederum der Einsatz solcher Technologien einhergeht.

Aufbauend auf einer kurzen Zusammenfassung des Stands des Wissens zu Quellen, Eintragspfaden, Ausbreitung, Akkumulation und Zersetzung von Kunststoffabfällen in den Meeren gibt die resultierende TA-Kompakt-Studie des TAB einen Überblick über den aktuellen Stand existierender Technologien zur Reduktion der Einträge von Kunststoffen in Gewässer und zur Entfernung vorhandener Abfälle aus dem Meer. Auf dieser Grundlage werden Marktreife, Effizienz und Auswirkungen der Technologien abgeschätzt. Abschließend werden politische Instrumente identifiziert, die es ermöglichen sollen, die entsprechenden Technologien effektiv und ökologisch sinnvoll einzusetzen.

Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem Bericht eine empirisch fundierte Informationsgrundlage für die weitere parlamentarische Befassung mit dem Schutz von Meeren und Gewässern.

Berlin, den 28. Januar 2026

Dr. Karl Lauterbach

Vorsitzender

Dr. Reza Asghari

Berichterstatter

Dr. Michael Kaufmann

Berichterstatter

Oliver Kaczmarek

Berichterstatter

Dr. Andrea Lübcke

Berichterstatterin

Sonja Lemke

Berichterstatterin

Pauline Rioussel

**Technologische Möglichkeiten zur Reduktion von
Kunststoffabfällen in den Meeren**

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie dem Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Das Wichtigste in Kürze

Fünf Fragen – fünf Antworten

1. Wie sammeln sich Kunststoffabfälle im Meer?
 - Plastik findet sich in allen Wasserkompartimenten rund um den Globus.
 - Littering ist die größte Emissionsquelle von Makroplastik im Globalen Norden, während nicht vorhandene oder fehlfunktionierende Sammelsysteme in Verbindung mit Müllexporten aus dem Globalen Norden die dominierende Emissionsquelle im Globalen Süden darstellen.
 - Zu den Emissionen von Mikroplastik tragen in Deutschland insbesondere Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen bei Starkregen bei, die z.B. Reifenabrieb in die Gewässer eintragen. Der größte Anteil der ins Wasser gelangten Kunststoffe sammelt sich in der Nähe der Emissionsorte.
 - Makroplastik im Meer kann durch physikalische, chemische und biologische Prozesse in Mikroplastik zerfallen. Ein Teil dieser Partikel kann – abhängig von Materialeigenschaften und Umweltbedingungen – zum Meeresgrund absinken, wo sie über lange Zeiträume erhalten bleiben.
2. Wie gefährlich sind Kunststoffabfälle für Meereslebewesen und Menschen?
 - Kunststoffabfälle im Meer wirken sich auf alle Ökosystemleistungen aus. Zu den potenziellen kaum umkehrbaren Auswirkungen der Kunststoffverschmutzung gehören geophysikalische Effekte, insbesondere Veränderungen der Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe.
 - Kunststoffe können Lebewesen im Meer auf vielfältige Weise beeinträchtigen (z.B. durch Verstrickungen, Verletzungen und das Bewirken von Entzündungsreaktionen) und so die biologische Vielfalt und die natürliche Umwelt bedrohen.
 - Sie verursachen hohe ökonomische Kosten für Fischerei, Aquakultur und Tourismus.
 - Auswirkungen auf die Gesundheit sind unzureichend erforscht. Hinweise auf negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit häufen sich.
3. Welche Technologien können dabei helfen, die Kunststoffmengen im Meer zu verringern?
 - Die Vielfalt der existierenden Technologien spiegelt die Vielfalt von Quellen, Abfallgrößen und Anwendungsbereichen wider.
 - Mechanische Lösungen für die Entfernung von treibendem Makroplastik an der Wasseroberfläche machen den größten Anteil der Technologien aus.
 - Stationäre Reinigungstechnologien ermöglichen eine gezielte Reinigung von Akkumulationsorten, zum Beispiel in Häfen und an Flussmündungen. Mobile Technologien sind flexibler, verbrauchen in der Regel aber mehr Energie.
 - Während Präventionstechnologien durch ihre vorgelagerte Platzierung keine direkten Auswirkungen auf Meeresökosysteme haben, können sich Reinigungstechnologien zur Entfernung von Kunststoffen aus Gewässern unbeabsichtigt negativ auf die dortigen Ökosysteme auswirken.
 - Kleinere Mikroplastikpartikel, die bereits im offenen Meer treiben oder auf den Meeresboden gesunken sind, lassen sich beim aktuellen Stand der Technik nicht effektiv zurückholen.
 - Die Datenlage zum Energieverbrauch und zu den Auswirkungen existierender Technologien auf Meeresorganismen ist sehr lückenhaft und auch ihre Wirksamkeit ist bislang unzureichend erforscht.
 - Problematisch sind vor allem die vielfach fehlenden Infrastrukturen für die Verwertung oder umweltgerechte Beseitigung der Abfälle im globalen Süden.
4. Welche politischen Bestrebungen gibt es bereits, um Einträge von Kunststoffabfällen in die Meere zu reduzieren?
 - Emissionen von Kunststoffen werden in der EU umfangreich reguliert. In den letzten Jahren lag der Fokus neuer Regulierungen verstärkt auf der Vermeidung von Littering und von Mikroplastikemissionen. Reinigungstechnologien sind bisher kaum Gegenstand von Regulierung oder Normierung gewesen.

- Um die grenzüberschreitenden Auswirkungen der Verschmutzung durch Plastik zu reduzieren, fördert Deutschland internationale Projekte gegen Meeresmüll und für saubere Meere insgesamt.
 - Im Rahmen der internationalen Verhandlungen über ein Abkommen zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung werden internationale Reinigungsmaßnahmen diskutiert. Finale Entscheidungen darüber und über einen finanziellen Rahmen stehen noch aus.
5. Mit welchen politischen Instrumenten kann sichergestellt werden, dass die entsprechenden Technologien effektiv und ökologisch sinnvoll eingesetzt werden?
- Emissionen von Abfällen zu verhindern, ist kosteneffektiver, als sie aus der Umwelt zu entfernen. In Deutschland könnten besonders belastete Kläranlagen, Straßenabflüsse im Trennsystem und Mischwasserentlastungsanlagen technologisch nachgerüstet werden.
 - Wenn Kunststoffemissionen nicht vermeidbar sind, trägt das Auffangen in der Nähe der Emissionsquellen zur Reduktion von wirtschaftlichen und ökologischen Kosten bei. Bei der Auswahl sind der naturschutzfachliche und der gesellschaftliche Wert der betroffenen Akkumulationszonen sowie die zu erwartenden Nebenwirkungen zu berücksichtigen.
 - Um Entscheidungsträger/innen bei Investitionsentscheidungen zu unterstützen, wäre die Einführung von Evaluierungspflichten bei der Entwicklung von Reinigungstechnologien, unter Verwendung von noch zu entwickelnden Standards für die Dokumentation vor und während des Einsatzes, ein wichtiger Schritt.
 - Es wäre zu prüfen, ob die laufenden Fördermaßnahmen für internationale Projekte zur Bekämpfung von Meeresmüll den Technologietransfer zu Reinigungstechnologien ausreichend abdecken.
 - Deutschland könnte sich im Rahmen der internationalen Verhandlungen über ein Abkommen zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung weiterhin für einen internationalen finanziellen Mechanismus einsetzen und die Förderbedingungen für Projekte mitgestalten.

1 Einleitung

Die weltweite Produktion von Kunststoffen ist innerhalb der letzten 70 Jahre stark angestiegen. Allein seit 2002 hat sie sich mehr als verdoppelt. Im Jahr 2024 betrug sie 430,9 Mio. t (Statista 2025). Ein Großteil der produzierten Kunststoffmengen wird nach Verbrauch nicht korrekt entsorgt und verbreitet sich in der Umwelt, wo sie einen Hauptteil der Meeresabfälle ausmachen (AWI o. J.). Jährlich gelangen schätzungsweise 6 Mio. t in Flüsse und Küstengewässer, wovon zwischen 1,7 Mio. t (OECD 2022a) und 6,1 Mio. t weiter ins Meer treiben. Rechnet man Mikroplastikpartikel hinzu, sind es insgesamt 16 Mio. t (Sonke et al. 2025). Allein über Europas Flüsse gelangen jährlich ca. 3.400 t Makroplastik in die europäischen Meere (González-Fernández et al. 2021, S. 474). Diese Mengen kommen jährlich zu den geschätzten 75 bis 199 Mio. t dazu, die sich bereits in Meeren und Ozeanen weltweit befinden (UNEP 2021). An der Oberfläche von Ozeanen treiben bereits jetzt schon geschätzt über 170 Billionen Plastikteilchen mit einem Gewicht zwischen 1,1 und 4,9 Mio. t (Eriksen et al. 2023).

Plastikabfälle im Meer wirken sich auf Meerestiere und Ökosysteme negativ aus, mindern den Erholungswert und erzeugen so wirtschaftliche Kosten für die Fischerei und den Tourismus (Royal Society 2024, S. 4). Auch wenn einige methodische Herausforderungen bestehen (Rauert et al. 2025; Seewoo et al. 2024), weisen immer mehr Studien auf mögliche toxikologische Wirkungen hin. Mikroplastikpartikel können sich in Blutgefäßen, im Gehirn und anderen Organen ablagern (Anih et al. 2025; Nihart et al. 2025). Analysen ergaben, dass Gehirnproben aus dem Jahr 2024 etwa 50 % höhere Konzentrationen von Mikro- und Nanoplastik im Hirngewebe aufwiesen als Proben aus dem Jahr 2016 (Nihart et al. 2025). Eine Ablagerung von Mikroplastik im Körper kann Entzündungen verursachen. Außerdem werden Mikroplastikpartikel mit einem erhöhten Risiko für Herzinfarkt und Schlaganfall sowie einer höheren Sterberate assoziiert und stehen im Zusammenhang mit Krankheiten wie Krebs, Asthma, Parkinson und neurologischen Störungen (ITA 2025; Liu et al. 2023) sowie erhöhter Unfruchtbarkeit (Banerjee et al. 2024; D'Angelo/Meccariello 2021; Zhang et al. 2022). Die gesundheitlichen Kosten von Chemikalien in Kunststoffen werden für die Gesellschaft teilweise als exorbitant hoch charakterisiert (OPECST 2024). Trasante et al. (2024) schätzen die Gesundheitskosten, die 2018 durch drei mit Plastik assoziierten Chemikaliengruppen verursacht wurden, in den USA auf 249 Mrd. US-Dollar. Symeonides (2024) kommt auf Grundlage einer Metaanalyse zu dem Ergebnis, dass 2010 Gesundheitskosten in Höhe von 675 Mrd. Euro durch drei kunststoffbezogene Substanzen in den USA entstanden sind (OPECST 2024, S. 18).

In Deutschland wurden in den letzten Jahren vor allem Emissionen durch Mikroplastik erforscht. Von Makroplastik spricht man bei einer Partikelgröße von 5 mm oder größer, von Mikroplastik bei Fragmenten zwischen 1 µm und 5 mm. Durch Degradation und Fragmentierung zersetzt sich Plastik im Wasser zu Mikro- und Nanoplastik (1 nm bis ≤1 µm). Aufgrund der erwarteten starken Zunahme der Konzentrationen von Plastik im Meer und seiner Persistenz in der Umwelt steigt der Handlungsbedarf, Kunststoffe aus der Meeresumwelt zu entfernen (Royal Society 2024, S. 4 und 7). So ist im Textvorschlag für ein Abkommen zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung vorgesehen, dass die künftigen Vertragsparteien geeignete umweltgerechte Beseitigungs- und Reinigungsmaßnahmen ergreifen müssen, um die Akkumulation von bereits vorhandenem Plastik zu reduzieren (Art. 9) (Vayas Valdivieso 2025).

Auch wenn Fortschritte in manchen Regionen der Welt durch die Umsetzung einzelner Maßnahmen bereits festgestellt werden konnten oder zu erwarten sind (OSPAR 2023), wird mit dem erwarteten weltweiten Bevölkerungswachstum und dem erwarteten Wachstum des Bruttoinlandsprodukts (BIP) eine Zunahme der Produktion und des Verbrauchs von Kunststoffen erwartet. So könnte sich die derzeitige Jahresproduktion von Kunststoffen (ca. 450 Mio. t) bei den derzeitigen Trends bis 2045 verdoppeln (Enevoldsen et al. 2024, S. 18). Dies könnte zu größeren Mengen an Kunststoffabfällen und entsprechenden Einträgen in Meere und Ozeane führen. Künftig wird mit einem geschätzten Anstieg des weltweiten Aufkommens von Kunststoffabfällen von etwa 4 bis 5 % pro Jahr gerechnet (Kaandorp et al. 2023, S. 690). Bis 2060 ist bei einer Fortsetzung aktueller Trends mit einer Verdreifachung der Mengen an Plastikabfällen in der Umwelt zu rechnen (OECD 2022a, S. 84). Selbst in einem ambitionierten Szenario, in dem die Mitgliedstaaten der Vereinten Nationen Verpflichtungen eingehen und einhalten, dürften bis 2030 jährlich zwischen 20 und 53 Mio. t Kunststoffabfälle in die Gewässer gelangen (Borrelle et al. 2020). Das ist problematisch, denn eine Akkumulation, beispielsweise in den ozeanischen Müllstrudeln, erfolgt zeitlich verzögert. Es dauert also mehrere Jahre, bevor Maßnahmen zur Reduzierung der dort akkumulierten Mengen führen (Lebreton 2022, S. 731).

Zielsetzung und Vorgehensweise

In dem vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung initiierten Projekt des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) sollten im Rahmen einer TA-Kompakt-Studie Potenziale und Auswirkungen technologischer Möglichkeiten zur Reduktion von Kunststoffabfällen in den Meeren untersucht werden. Die Fragestellungen der Untersuchung lauteten:

- Wie sammeln sich Kunststoffabfälle im Meer?
- Wie gefährlich sind Kunststoffabfälle für Meereslebewesen und Menschen?
- Welche Technologien können dabei helfen, die Kunststoffmengen im Meer zu verringern?
- Mit welchen Risiken für Lebensräume und Ökosysteme geht der Einsatz solcher Technologien einher?
- Mit welchen politischen Instrumenten kann sichergestellt werden, dass die entsprechenden Technologien effektiv und ökologisch sinnvoll eingesetzt werden?

Zusammenarbeit mit Gutachter/innen und Danksagung

Ausgangspunkt des TA-Projekts war eine Bestandsaufnahme der technologischen Lösungen zur Entfernung von Kunststoffen aus aquatischen Ökosystemen sowie aus Abwasser und Niederschlagswasser ebenso wie eine Einschätzung ihrer Effizienz und Nebenwirkungen. Als fachliche Informationsbasis für das Projekt wurde zunächst ein Kurzgutachten vergeben, mit dem Ziel das Spektrum existierender Technologien mit einem höheren Reifegrad qualitativ zu beschreiben:

- Technologische Möglichkeiten zur Reduktion von Kunststoffabfällen in den Meeren. Mandy Hinzmann, Doris Knoblauch, Hannes Schritt, R. Andreas Kraemer, Dr. Melanie Bergmann; Ecologic Institut gemeinnützige GmbH, Berlin

Das Gutachten wurde durch ein zweites Kurzgutachten ergänzt mit dem Ziel, die Kernergebnisse durch eine Analyse aus den Datenbanken „MarLi-In Portal“ und „Plastic Pollution Prevention and Collection Technology Inventory“ abzugleichen, ggf. zu untermauern und vielversprechende innovative Lösungen zu identifizieren:

- Technologische Möglichkeiten zur Reduktion von Kunststoffabfällen in den Meeren – Wissenstand innovativer Lösungen zur Bekämpfung des Meeresmülls. Dr. Nikoleta Bellou, Hamburg

Die Verantwortung für die Auswahl, Strukturierung und Interpretation der Gutachtenergebnisse liegt bei der Autorin des vorliegenden TA-Kompakts, Dr. Pauline Rioussset. An dieser Stelle sei den Gutachter/innen für die Bereitschaft zur Kooperation und Kommunikation sowie für die Prüfung und die ausführliche Kommentierung des Berichtsentwurfs herzlich gedankt. Ein besonderer Dank gilt ihnen außerdem für die zahlreichen Hinweise auf wichtige Publikationen zu den Quellen, der Akkumulation und der Verbreitung von Kunststoffen im Meer. Dank gebührt ebenfalls Dr. Arnold Sauter für Durchsicht und Kommentierung von Entwurfsversionen sowie Brigitta-Ulrike Goelsdorf für die Bearbeitung der Abbildungen, die redaktionelle Bearbeitung des Manuskripts und die Erstellung des Layouts.

2 Mengen und Verbleib von Kunststoffen im Meer

- Plastik findet sich in allen Wasserkompartimenten rund um den Globus.
- Littering ist die größte Emissionsquelle von Makroplastik im Globalen Norden, während nicht vorhandene oder fehlfunktionierende Sammelsysteme in Verbindung mit Müllexporten aus dem Globalen Norden die dominierende Emissionsquelle im Globalen Süden darstellen.
- Zu den Emissionen von Mikroplastik tragen in Deutschland insbesondere Regenwassereinleitungen und Mischwasserentlastungen bei Starkregen bei, die z. B. Reifenabrieb in die Gewässer eintragen.
- Der größte Anteil der ins Wasser gelangten Kunststoffe sammelt sich in der Nähe der Emissionsorte.
- Makroplastik im Meer kann durch physikalische, chemische und biologische Prozesse in Mikroplastik zerfallen. Ein Teil dieser Partikel kann – abhängig von Materialeigenschaften und Umweltbedingungen – zum Meeresgrund absinken, wo sie über lange Zeiträume erhalten bleiben.

2.1 Quellen und Eintragspfade

Kunststoffabfälle gelangen über verschiedene Eintragspfade ins Meer. Diese werden unterschieden in landbasierte und meeresbasierte Einträge. Landbasierte Einträge sind die Folge von unsachgemäßer Entsorgung von Abfällen entlang der Küste oder an Flussufern, die dann bis ins offene Meer transportiert werden. Auch Tourismus und Naherholung sowie die küsten- bzw. flussnahe Industrie führen zu landbasierten Einträgen. Verluste über offene Deponien in Küsten- oder Flussnähe sowie Ereignisse, wie Stürme, Hochwasser und Starkregen, die Kläranlagen zum Überlaufen bringen und in kurzer Zeit große Mengen an Abfall ins Meer spülen, der sich an die Strände ablagert, tragen ebenfalls maßgeblich zu landbasierten Einträgen bei (Canals et al. 2021, S. 3; Lewin et al. 2019, S. 12). Meeres- bzw. seebasierte Einträge entstehen hingegen durch maritime Aktivitäten. Relevante Quellen sind die Schifffahrt, sei es kommerzieller Natur oder im Zusammenhang mit Freizeitaktivitäten (Sportbootschifffahrt). Auch Aquakulturanlagen im Meer (Marikultur), die Berufsfischerei (durch den Verlust von Fischfanggeräten) sowie der Betrieb von Offshoreanlagen tragen zu einem Großteil der Emissionen bei (Lewin et al. 2019, S. 12; Runder Tisch Meeresmüll o.J.b).

Neben Makroabfällen werden auch Mikroplastikpartikel in die aquatische Umwelt emittiert. In Deutschland machen diese mit 74 % den größten Anteil der Plastikemissionen aus (Bertling et al. 2018, S. 15). Zu den größten Quellen gehören zum Beispiel der Reifenabrieb auf Straßen, wodurch Plastikpartikel über den Oberflächenabfluss in die Regenwasserkanalisation gelangen, Farben sowie Verluste bei der Abfallentsorgung. Auch Mikroplastikpartikel aus synthetischen Textilien, die sich beim Waschen lösen, gehören zu den Emissionsquellen (Bertling et al. 2021, S. 15 ff.). Allerdings werden diese Emissionen ebenso wie die von Mikroplastikpartikeln, die beispielsweise in Kosmetikprodukten sowie Wasch-, Putz- und Reinigungsmitteln enthalten sind, überwiegend über die Abwasserkanalisation erfasst, sodass sich bei entsprechender Klärstufe die Transferrate in die Meere in Grenzen hält (Bertling et al. 2018, S. 25). In der Nähe von industriellen Standorten sind die Mikroplastikkonzentrationen in manchen Meeren (z. B. Ostsee) besonders hoch. Diese können beispielsweise aus industriellen Scheuermitteln oder von Zusatzmitteln aus der Fertigung über Produktions(ab)wasser aus der Industrie in die Gewässer gelangen (Bertling et al. 2021, S. 17 u. 20; Veiga et al. 2022, S. 50 f.). Außerdem gelangt Kunststoffgranulat zur Erzeugung von Plastikprodukten an Produktionsstätten oder beim Transport in die Umwelt (Cocozza et al. 2025; Karlsson et al. 2018). Zu den Eintragspfaden zählt außerdem die Atmosphäre, über die Einträge von Mikro- und Nanoplastik vom Land durch Niederschläge in die Meere transportiert werden (Allen et al. 2022). Über Aerosolbildung kann Mikroplastik auch aus dem Meer in die Atmosphäre gelangen und weitergetragen werden (Allen et al. 2020). Schließlich verbleibt ein Teil des Kunststoffabfalls zunächst für längere Zeit in terrestrischen Umgebungen, wo er sich ansammelt und erst nach und nach in die (aquatischen) Ökosysteme im Landesinneren abgegeben wird (Meijer et al. 2021, S. 6) oder in die Luft resuspendiert wird (Zhang et al. 2025).

Über Abwasser gelangt Mikroplastik in die aquatische Umwelt insbesondere über drei zentrale Eintragspfade (Fuhrmann et al. 2021):

- *Klärwasser und Klärschlamm*: Je nach Kanalisationssystem gelangt entweder nur Schmutzwasser aus Haushalten, Industrien und Gewerben zur Behandlung in eine Kläranlage (Trennsystem) oder aber eine Mischung aus Schmutz- und Niederschlagswasser (Mischsystem), wenn diese in einen gemeinsamen Kanal abgeleitet werden. Reststoffe, die nicht über die Behandlung in Kläranlagen entfernt werden, gelangen dann über das Klärwasser oder das Ausbringen von Klärschlamm in der Landwirtschaft in die Umwelt.

- *Mischwasserentlastungen:* Im Mischsystem gelangen die Kapazitäten einer Kläranlage bei Starkregen schneller an ihre Grenzen. Ist die Kanalisation überfordert, gelangt unbehandeltes Mischwasser in die Gewässer.
- *Behandeltes Niederschlagswasser:* Je nach Ort wird Niederschlagswasser entweder unbehandelt in die Gewässer geleitet oder in Abhängigkeit des Verschmutzungsgrades in Regenwasserbehandlungsanlagen aufbereitet. Auch Niederschlagswasser kann beispielsweise durch den Kontakt mit der Verkehrsinfrastruktur oder mit polymerhaltigen Oberflächen und Lacken (Brännström et al. 2023) mit Mikroplastikpartikeln belastet sein und Mikroplastik enthalten.

Der größte Teil der Meeresabfälle stammt – global betrachtet – aus landbasierten Quellen (Jambeck et al. 2015), schätzungsweise zu 70 bis 80 % (Christensen et al. 2023, S. 19; EEA 2023; Lebreton et al. 2018; Li et al. 2016). Der Rest ist auf meeresbasierte Einträge zurückzuführen. Verlassene, verlorene und weggeworfene Fischereiausrüstungen sorgen für insgesamt 10 bis 20 % des in die Meere eingetragenen Mülls (Gilman et al. 2021; Runder Tisch Meeresmüll o.J.b). Für Deutschland weicht das Verhältnis zwischen land- und meeresbasierten Einträgen vom globalen Verhältnis ab. Auch die Emissionen in die Ost- und Nordsee unterscheiden sich stark voneinander. So machen meeresbasierte Abfälle einen deutlich größeren Anteil an den gesamten Emissionen in den Nordatlantik als in der Ostsee aus (Runder Tisch Meeresmüll o.J.b). Meeresbasierte Einträge machen außerdem besonders in entlegenen Regionen wie den großen subtropischen Müllstrudeln oder in der Arktis einen erheblichen Anteil der dort befindlichen Abfälle aus. Fischereinetze und -materialien können bis über drei Viertel der dort akkumulierten Kunststoffmenge ausmachen (Lebreton et al. 2018, S. 731; Meyer et al. 2023).

Noch bestehen große Wissenslücken über den Zustand, die Stoffflüsse und die Zersetzung von Plastik im Meer (Horton 2022). Schätzungen reichen von 8 bis 30 Mio. t pro Jahr (Allen et al. 2022; Borrelle et al. 2020; Jambeck/Walker-Franklin 2023; Lau et al. 2020). In einer Studie von Kaandorp et al. (2023) wird der jährliche globale Gesamteintrag von Kunststoffen in die Meere auf 500 kt geschätzt mit Steigerungsraten von schätzungsweise 4 % pro Jahr. Dieser Eintrag soll zu 39 bis 42 % aus Aktivitäten an der Küste, zu 45 bis 48 % aus Fischereiaktivitäten und zu 12 bis 13 % aus Flüssen stammen (Kaandorp et al. 2023).

Aufgrund der Langlebigkeit von Plastik ist ein Großteil der Meeresabfälle auf Emissionen zurückzuführen, die lange in die Vergangenheit reichen. Die Plastikproduktion der letzten 70 Jahre und die anfangs auch im Globalen Norden fehlenden Sammelsysteme haben zu den bestehenden Mengen entscheidend beigetragen (Zhang et al. 2023, S. 1). So stammt ein erheblicher Teil der Materialien, die im pazifischen Müllstrudel identifiziert wurden, aus den 1960er Jahren (Lebreton 2022, S. 731).

Eintragspfade von Plastikabfällen in die aquatische Umwelt sind je nach Land bzw. Weltregion unterschiedlich. Heute erzeugen Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen pro Kopf zwar deutlich weniger Plastikmüll als Länder mit hohem Einkommen. Allerdings wird ein großer Teil der dort entstehenden Abfälle nicht gesammelt. Die vor allem im globalen Süden fehlenden oder mangelhaft funktionierenden Abfallsammelsysteme stellen so eine Hauptemissionsquelle von Kunststoffen in die Umwelt dar (Cottom et al. 2024, S. 103). 1.000 Flüsse tragen zu ca. 80 % an der jährlichen Plastikfracht ins Meer bei. Viele dieser Flüsse befinden sich in Asien, Lateinamerika und Afrika (Meijer et al. 2021, S. 6). In Hocheinkommensländern, wo Abfallsammelsysteme seit Jahren perfektioniert werden, sind die Emissionen vor allem auf das achtlose Wegwerfen oder Liegenlassen von Abfällen in der Umwelt zurückzuführen (Cottom et al. 2024, S. 105). Außerdem wird ein erheblicher Teil der Kunststoffabfälle, die oft gar nicht recyclebar sind, aus EU-Mitgliedstaaten in Länder mit niedrigeren Recyclingstandards exportiert (OECD 2024, S. 3).

Wie viel ein Land direkt emittiert, hängt auch von seiner Nähe zum Meer ab. Länder mit einer relativ kleinen Landfläche im Vergleich zur Länge ihrer Küstenlinie emittieren viel Kunststoff ins Meer, insbesondere wenn sie hohe durchschnittliche Niederschlagsraten aufweisen. Insbesondere die Entfernung urbaner Zentren und von Industriestandorten vom Wasser bestimmt den Grad der Emissionen (Meijer et al. 2021, S. 4 f.).

2.2 Verbreitung und Akkumulationszonen

Plastik wird von der Gewässeroberfläche bis hin zu den Meeresbodensedimenten von Tiefseebecken dokumentiert (Eriksen et al. 2014; Reisser et al. 2015; Tekman et al. 2020). Die Verteilung von Makroplastik im Meer hängt von zahlreichen Parametern ab, darunter die lokalen hydrogeografischen Bedingungen, die Witterung, die Eigenschaften der Fragmente sowie die physikalisch-chemischen und biochemischen Prozesse im Meerwasser, durch welche die Partikel sich verändern (Canals et al. 2021, S. 7; Gutow et al. 2018, S. 771; Peters o.J.b; van Sebille et al. 2020, S. 3). Die langen Kohlenstoffketten der Kunststoffpolymere werden in der Umwelt langsam

abgebaut (Chamas et al. 2020). Durch Fragmentierung und Degradation zersetzt sich Makroplastik in Meso- bzw. Mikroplastikpartikel. Durch biochemische Prozesse, wie das Wachstum von Biofilmen an ihrer Oberfläche, können Kunststofffragmente und -partikel schwerer werden, langsam absinken und sich letztlich auf dem Meeresboden ablagern (Canals et al. 2021; Fazey/Ryan 2016; Lobelle et al. 2021; Schernewski et al. 2021, S. 879). Mikroplastikpartikel werden außerdem durch lebende Organismen in die Tiefsee transportiert, beispielsweise nach Aufnahme mit der Nahrung über ihre sinkenden Fäkalien (Katija et al. 2017).

Während schwere Grundschleppnetze oft dort bleiben, wo sie stecken geblieben sind oder verloren bzw. zurückgelassen wurden, ist das Verhalten kleinerer Gegenstände deutlich schwerer prognostizierbar (Canals et al. 2021, S. 7). Kleineres Mikroplastik tendiert zur schnelleren Ausbreitung als größeres (Peters o. J.b). In Küstengewässern beträgt die Verweildauer von größeren Mikro- und Mesoplastikpartikeln an einem Ort nur wenige Tage. Konzentrationen variieren auch ereignisabhängig. So sind sie nach einem Starkregenereignis in Küstennähe besonders hoch (Schernewski et al. 2021, S. 879). Ein Großteil wird zurück an den Strand und wieder ins Meer gespült (Onink et al. 2021). Tendenziell akkumuliert Mikroplastik insbesondere in der Nähe seiner Emissionsorte, wie beispielsweise in der Nähe von industrialisierten Gebieten und von Kläranlagenabflüssen (la Farré et al. 2021, S. 29; Peters o. J.a).

Aufgrund von Wind und Wasserströmungen an der Oberfläche des Ozeans können Plastikteile weite Wege zurücklegen (van Sebille et al. 2020). So wurden Plastikpartikel in ansonsten kaum berührten Landschaften dokumentiert, wie in den Oberflächengewässern um die antarktische Halbinsel und in der Arktis (Bergmann et al. 2022; Caruso et al. 2022; Lacerda et al. 2019; da Silva et al. 2023) oder in Korallenökosystemen (Sanderson 2023). Auch liegen in der südlichen Hemisphäre, wo deutlich weniger Plastik emittiert wird, die Gesamtmengen der Kunststoffe im Meer auf einem ähnlich hohen Niveau wie in der nördlichen Hemisphäre (Eriksen et al. 2023, S. 10).

Durch die Kombination von Oberflächenwasserströmungen mit der Rotation der Erde akkumulieren treibende Kunststoffteile in subtropischen Konvergenzzonen (Subtropical Ocean Gyres) und bilden dort Müllstrudel (Garbage Patches). Diese Müllstrudel sind in beiden Hemisphären vorzufinden (Zhang et al. 2023, S. 2) (Abb. 2.1). Als die größte und dichteste bekannte Ansammlungszone für treibenden Plastikmüll wird der große pazifische Müllstrudel (Great Pacific Garbage Patch) zwischen der Westküste der USA und Hawaii angesehen (Lebreton 2022, S. 730). Er weist auf einer Fläche von 1,6 Mio. km² (was etwa viereinhalb Mal der Fläche Deutschlands entspricht) eine Konzentration von Plastikfragmenten von bis zu 106 Stück pro km² auf (Lebreton 2022, S. 730; Lebreton et al. 2018). Wie sich Kunststoffe durch die Ozeane verbreiten und sich Müllstrudel bilden, zeigt ein kurzes Video der NASA auf YouTube.¹

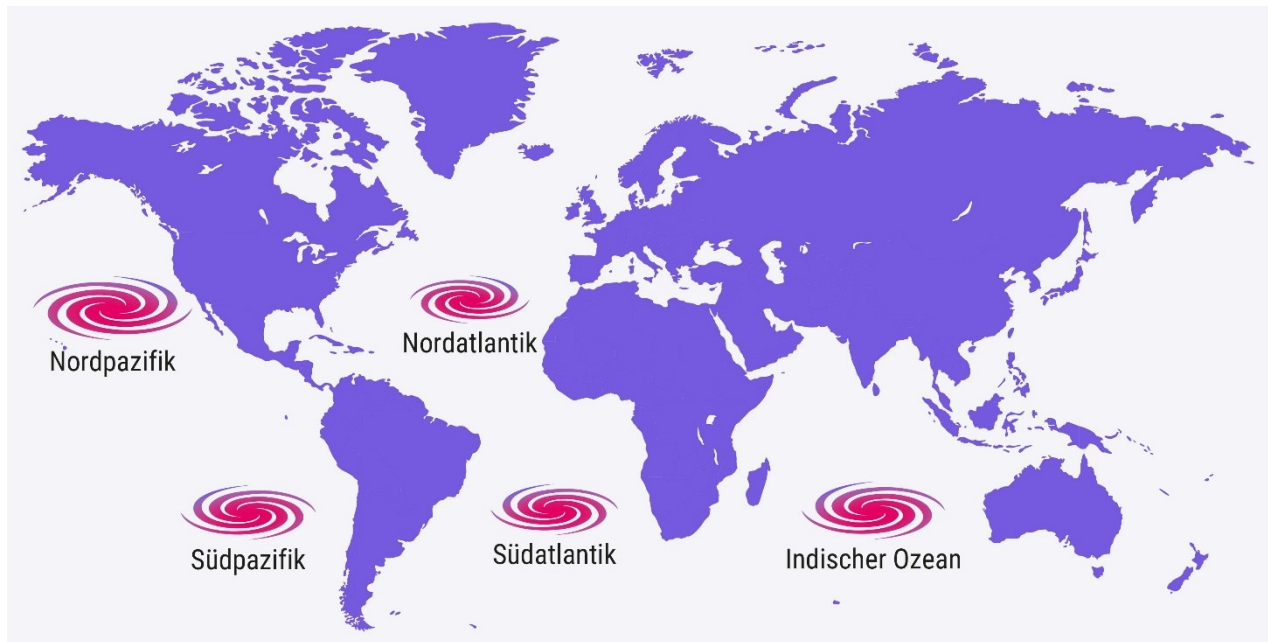
Allerdings ist diese Konzentration relativ zur Größe des Ozeans zu betrachten. Hinzmann et al. (2025, S. 25 ff.) ordnen die Konzentrationen wie folgt ein: Lediglich 1 bis 5 % des Meeresmülls sammeln sich in der nordpazifischen Akkumulationszone². Verteilt auf die Größe eines Fußballfeldes (ca. 7.000 m²) befindet sich dort demnach die Plastikmenge, die in etwa einer PET-Flasche entspricht (ca. 50 g).³ Empirische Analysen von Lebreton et al. (2018) zeigen, dass sich die Kunststoffdichte in dieser Zone auf durchschnittlich 350 g 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“⁴ denn als dichten Teppich aus schwimmenden Plastikmülls beschreiben. Zu einer ähnlichen Einschätzung kommen Rynek et al. (2024), die außerdem zeigen, dass Plastikteile auch außerhalb bekannter Akkumulationszonen in vergleichbar hohen Konzentrationen auftreten und über riesige Areale verbreitet sind. Meeresgebiete in der Nähe von Emissionshotspots, beispielsweise an Flussmündungen in Deutschland oder an großen Flüssen in Südostasien, weisen höhere lokale Konzentrationen von Mikro- und Makroplastik auf (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 Müllstrudel fungieren dennoch als langfristige Akkumulationszonen und es wird erwartet, dass die Kunststoffkonzentrationen in diesen Konvergenzzonen künftig weiter zunehmen (Rynek et al. 2024). Sie werden dadurch 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).

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=zYuvTYJ0hGk> (27.8.2025)

² Interview mit Prof. Dr. Rebecca Helm (Georgetown Universität), durchgeführt von Hinzmann et al. (2025) am 29.11.2024

³ Interview mit Günther Bonin und Dr. Harald Frank (One Earth – One Ocean e. V.), durchgeführt von Hinzmann et al. (2025) am 9.1.2025

⁴ Interview mit Günther Bonin und Dr. Harald Frank (One Earth – One Ocean e. V.), durchgeführt von Hinzmann et al. (2025) am 9.1.2025

Abbildung 2.1 Die fünf Müllstrudel (Garbage Patches)

Eigene Darstellung

In subtropischen Wirbeln sinken Kunststoffe im Vergleich zu Küstenzonen langsamer, wobei sich an den dortigen Küsten viel Plastik ansammelt, z. B. hawaiianische Inseln (Delorme et al. 2025). Der Grund dafür ist, dass sich in diesen Zonen weniger Phytoplankton befindet, wodurch der Absinkprozess langsamer sein könnte als in der Nähe von Küsten (Kaandorp et al. 2023, S. 692). Angesichts der Dunkelheit und der niedrigen Temperatur können Kunststoffteile auf dem Meeresboden als sehr stabil angesehen werden (Canals et al. 2021). Bei einer sofortigen Unterbrechung der Emissionen von Kunststoffen würden Modellierungen zufolge lediglich 10 % der Kunststoffmasse innerhalb von 2 Jahren fragmentieren und absinken und so nur sehr langsam von der Meeresoberfläche verschwinden (Kaandorp et al. 2023, S. 692). Insbesondere die meisten modernen Fischereinetze und -leinen können Jahrzehnte bis Jahrhunderte im Meer verbleiben (Canals et al. 2021).

Durch die Veränderung der Ozeanzirkulation im Zuge des Klimawandels und der Schwankungen durch die El Niño-südliche Oszillation (ENSO) sowie die pazifische Dekaden-Oszillation (PDO) könnten sich Wirbelströme und damit der großräumige Transport von schwimmendem Kunststoff in Zukunft verstärken. Stürme mit höherer Intensität könnten die Ausbreitung erhöhen. Außerdem könnte sich der Anstieg des Meeresspiegels auf die Transportmuster an der Küste auswirken und große Mengen an Kunststoffen freisetzen, die in Küstensedimenten oder zeitweise überfluteten städtischen Gebieten eingeschlossen sind (Bergmann et al. 2022, S. 332; van Sebille et al. 2020, S. 21).

2.3 Zustand der Ost- und Nordsee

Durch die Aktivitäten im Rahmen des OSPAR-⁵ und des Helsinki-Übereinkommens⁶ sowie die Aktivitäten Deutschlands im Rahmen des Runden Tisches Meeresmüll sind Einträge und Zustand der deutschen Ost- und Nordsee vergleichsweise gut dokumentiert.

Strandabfälle

An europäischen Stränden sind Plastikverpackungen und kleine Plastikartikel weit verbreitet (EEA 2023). Von den vier europäischen Meeren ist die Ostsee am wenigsten durch Strandabfälle verschmutzt (Veiga et al. 2022, S. 12). Allerdings wird der europäische Grenzwert für einen guten Zustand von weniger als 20 Makromüllteilen pro 100 m Strand (van Loon et al. 2020) nur selten erreicht. Im zuletzt evaluierten Zeitraum von 2016 bis 2021

⁵ Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR-Übereinkommen)

⁶ Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebiets (Helsinki-Übereinkommen)

überschritten 11 der 16 bewerteten Teilbecken der Ostsee diesen Grenzwert. Die deutschen Kieler und Mecklenburger Buchten wiesen dabei vergleichsweise gute Werte auf und lagen unterhalb des Grenzwertes (HELCOM 2023, S. 82). Dies könnte auch daran liegen, dass an vielen deutschen Stränden in der Hochsaison täglich Müll entfernt wird. Die am häufigsten gefundene Müllkategorie waren Plastikgegenstände und -fragmente über 2,5 cm. An Nordseestränden liegen die Gesamtzählwerte weit über dem europäischen Schwellenwert für guten Zustand von 20 Stücke/100 m (van Loon et al. 2020), wobei die Ergebnisse je nach beprobtem Strand stark variieren. Im Zeitraum von 2015 bis 2020 lag der Medianwert für Plastikabfälle im Nordseegebiet bei 161 Stücke/100 m Strand (Lacroix et al. 2022).

Schwimmende Abfälle

Im Nordostatlantik ist die Anzahl der Makroabfälle, die an der Meeresoberfläche treiben, deutlich höher als in der Ostsee (Veiga et al. 2022, S. 13). Abfälle aller Größenklassen sind dort zu finden und reichlich vorhanden (Hoehn et al. 2024). Plastik aus Flüssen konzentriert sich stärker in Zonen, wo sich Süßwasser aus Flüssen mit dem Meer mischt (Meyerjürgens et al. 2023). Ein großer Teil des in der Nordsee schwimmenden Meeresmülls wird an den Stränden Deutschlands und skandinavischer Länder abgelagert (Gutow et al. 2018, S. 768). Ein wichtiger Indikator für die Plastikbelastung der Nordsee ist die Anzahl der gestrandeten Eissturmvögel, die mit Plastikmüll im Magen gefunden werden. Eissturmvögel ernähren sich ausschließlich von Nahrungspartikeln, die an der Meeresoberfläche treiben und Meeresmüll riecht für viele Seevögel nach Nahrung (Savoca et al. 2016). Dabei kommt es zur Verwechslung mit treibenden Müllteilen, wodurch sich Kunststoff im Magen dieser Vögel ansammelt (UBA o. J.a). Im letzten Untersuchungszeitraum wurde mit mehr als 0,1 g Plastik im Magen von 51 % gestrandeter Eissturmvögel das von OSPAR (2023) festgelegte Ziel von maximal 10 % für diesen Schlüsselindikator deutlich verfehlt. Für die Ostsee gilt dieser Indikator nicht, da diese Vogelart dort nicht so stark verbreitet ist. Ähnliche Aussagen sind daher nicht möglich (UBA o. J.a). Es lässt sich dennoch sagen, dass von allen vier europäischen Meeren die Ostsee die geringste Anzahl schwimmender Abfälle aus Flüssen sowie von falsch entsorgten Kunststoffverpackungen und kleinen Kunststoffteilen zeigt (Veiga et al. 2022, S. 13).

Abfälle auf dem Meeresboden

Auf dem Meeresboden sind Abfälle deutlich höher konzentriert als an der Oberfläche – in der Ostsee zum Beispiel um einen Faktor 40 (Gutow et al. 2018, S. 768). Für die Ostsee kommt die HELCOM (2023, S. 87) auf durchschnittlich etwa 27 Kunststoffteile pro km² für den Zeitraum von 2012 bis 2021. Int-Veen et al. (2021) finden eine 7-fach höhere Konzentration von Abfällen auf dem Meeresboden der Nordsee als auf dem Meeresboden der Ostsee. Die tatsächliche Gesamtzahl von Kunststoffteilen auf dem Boden beider Meere könnte allerdings höher liegen (O'Donoghue/van Hal 2018). Deutlich höhere Konzentrationen als bei der traditionellen Erfassung mit Grundschleppnetzen konnten mit Videoaufnahmen vom Meeresboden festgestellt werden (Nogueira et al. 2023).

Mikroplastik in der Ostsee und in der Nordsee

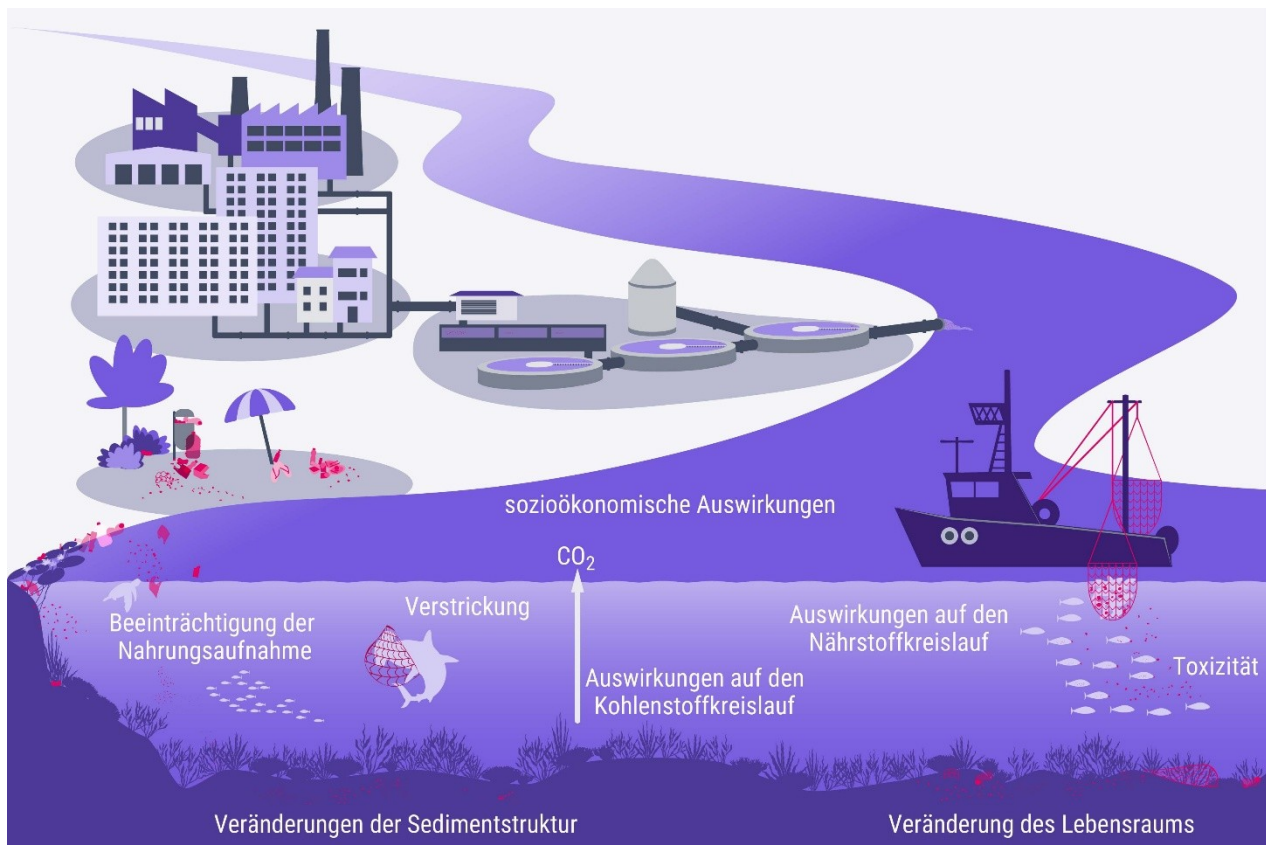
Mikroplastik ist in beiden Meeren zu finden. Der geschlossene Charakter der Ostsee erlaubt kaum Auswaschung in andere Meere, ihre geringe Tiefe begünstigt die welleninduzierte Resuspension, wobei abgelagerte Sedimente und Partikel durch Wellenbewegungen vom Meeresgrund wieder in die Wassersäule gehoben und aufgewirbelt werden. Außerdem erleichtert die lange und zerklüftete Küstenlinie tendenziell die schnelle Akkumulation an Stränden. So verweilen Mikropartikel schätzungsweise lediglich ca. 14 Tage in der Ostsee (Schernewski et al. 2020). Die Mikropartikelkonzentrationen steigen tendenziell dort an, wo sich Süßwasser aus Flüssen und salzhaltiges Wasser vermischen und nehmen zum offenen Meer hin ab (Roscher et al. 2021). Die Küstengewässer der Ostsee sind seicht und Turbulenzen verhindern eine Ablagerung von größeren Partikeln in Küstennähe. Erst nach einem Transport in tiefere Gewässer ist eine vorübergehende Ablagerung an der Sedimentoberfläche möglich (Schernewski et al. 2021, S. 872). Auch in der Nordsee ist Mikroplastik vorzufinden (Lorenz et al. 2019). Er setzt sich in Stillwasserzonen ab und reichert die Sedimente dort an, während Konzentrationen in Richtung offener Nordsee eher abnehmen (Peters o. J.b). Besonders hohe Konzentrationen fanden sich in den feinen Sedimenten der Dogger Bank (Lorenz et al. 2019). Dennoch variieren Mikroplastikkonzentrationen in beiden Meeren mit den lokalen geophysischen Bedingungen und der Jahreszeit stark. Besondere hoch sind sie im Winter, wo es häufiger zu Hochwasser kommt (Peters o. J.b; Schernewski et al. 2020). Eine Citizen-Science-Studie entlang der gesamten deutschen Küste fand geringere Mikroplastikmengen in Sedimenten von Ostseestränden als in denen der Nordsee. Der Unterschied war jedoch nicht statistisch signifikant (Walther et al. 2024).

3 Gefährdung für Meereslebewesen, Menschen und Wirtschaft

- Kunststoffabfälle im Meer wirken sich auf alle Ökosystemleistungen aus.
- Zu den potenziellen kaum umkehrbaren Auswirkungen der Kunststoffverschmutzung gehören geophysikalische Effekte, insbesondere Veränderungen der Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe.
- Kunststoffe können Lebewesen im Meer auf vielfältige Weise beeinträchtigen (z. B. durch Verstrickungen, Verletzungen und das Bewirken von Entzündungsreaktionen) und so die biologische Vielfalt und die natürliche Umwelt bedrohen.
- Sie verursachen hohe ökonomische Kosten für Fischerei, Aquakultur und Tourismus.
- Auswirkungen auf die Gesundheit sind unzureichend erforscht. Hinweise auf negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit häufen sich.

Aufgrund der potenziellen Schäden für Wildtiere und Menschen ist Plastikmüll in der Umwelt zu einem wachsenden Problem geworden (Gall/Thompson 2015; Wilcox et al. 2015). Kunststoffabfälle im Meer wirken sich auf alle Ökosystemleistungen aus (Beaumont et al. 2019; Cornacchia 2023, S. 76). Zu den potenziellen kaum umkehrbaren Auswirkungen der Kunststoffverschmutzung gehören geophysikalische Effekte und dabei insbesondere Veränderungen der Kohlen- und Nährstoffkreisläufe (Abb. 3.1). Hinzu kommen toxische Auswirkungen für den Menschen sowie sozioökonomische Auswirkungen. Insgesamt entspricht die Verschmutzung durch Plastik dem Expositionsprofil einer Bedrohung der planetaren Belastbarkeit (Villarrubia-Gómez et al. 2024). Dies bedeutet, dass die Gefahr besteht, dass die Grenze des Bereichs überschritten wird, innerhalb dessen die Menschheit sicher agieren kann, ohne die Stabilität und Gesundheit des Erdsystems unumkehrbar zu gefährden. Besonders problematisch ist die schwere Umkehrbarkeit der Akkumulation von Kunststoffen in marinen Ökosystemen, denn eine technische Entfernung bedeutsamer Mengen ist bislang kaum möglich (MacLeod et al. 2021).

Abbildung 3.1 Zentrale Auswirkungen von Plastik auf die Meeresumwelt



Eigene Darstellung nach MacLeod et al. (2021)

Geophysische Auswirkungen: Neben den indirekten Effekten der Treibhausgasemissionen, die durch die Produktion von Kunststoffen entstehen (Karali et al. 2024), kann eine Akkumulation von Kunststoffschwebstoffen die Nahrungsquellen oder den Trübungsgrad in den Lebensräumen von Cyanobakterien und Phytoplanktongemeinschaften beeinträchtigen. Abnehmende Populationen können zu einer geringeren Kohlenstoffbindung aus der Atmosphäre führen. Dies kann sich in der Folge auf die Nährstoffzufuhr und Verfügbarkeit von Sauerstoff in der Tiefsee auswirken (MacLeod et al. 2021, S. 4). Eine neue Studie zeigte kürzlich, dass Mikroplastik die Photosyntheserate im Meer um 7 % und an Land um 12 % reduziert (Zhu et al. 2025), was auch eine geringere CO₂-Bindung zur Folge haben dürfte. Außerdem hemmen Kunststoffe Korallenwachstum und die Widerstandsfähigkeit von Kaltwasserkorallenriffen und gefährden die damit verbundene biologische Vielfalt (Chapron et al. 2018). Zusammen mit den zentralen Stressoren Klimawandel und Überfischung stellt die Plastikverschmutzung eine aufkommende Bedrohung für Korallenriffe dar (Hughes et al. 2017; Pinheiro et al. 2023). Durch das Sterben von Korallenriffen und wirbellosen Organismen wie Muscheln kann sich außerdem die Regulierung der Wasserqualität verschlechtern (Cornacchia 2023, S. 81). Erhöhte Kunststoffbelastungen durch Oberflächenabflüsse können außerdem zu langfristigen Veränderungen der Eigenschaften auch an Land führen, insbesondere hinsichtlich der Fruchtbarkeit (MacLeod et al. 2021, S. 4), der physikalischen Eigenschaften und biogeochemischer Kreisläufe von Böden (Li et al. 2025; Maqbool et al. 2023; Zhao et al. 2024).

Auswirkungen auf Meeresorganismen und Lebensräume: Interaktionen von Meeresorganismen mit Makroplastikmüll (Verstrickungen und Aufnahme) wurden bereits umfangreich dokumentiert (Tekman et al. 2022). Diese können Lebewesen im Meer auf vielfältige Weise beeinträchtigen und so die biologische Vielfalt und die natürliche Umwelt bedrohen (Canals et al. 2021, S. 8). Besonders betroffen sind marine Megafauna-Arten, wie Seevögel, Meeressäuger, Meeresschildkröten und Fische (Tekman et al. 2022). Verstrickungen von Meerestieren mit Kunststoffmaterialien wurden für Hunderte von Arten dokumentiert (Kühn/van Franeker 2020), mit häufig letalen Folgen (Bertling et al. 2021, S. 22; Green 2022, S. 115 f.). Bei gefährdeten Arten oder Arten mit einer Schlüsselfunktion für das jeweilige Ökosystem kann dies auf Populationsebene gravierende Folgen haben (MacLeod et al. 2021, S. 5). Die Aufnahme von Makroplastik kann die Gesundheit der Organismen langfristig beeinträchtigen, beispielsweise durch Verletzungen und Entzündungen des Verdauungssystems, besonders wenn Objekte nicht ausgeschieden werden können. Die Aufnahme von Mikroplastik durch Wasserorganismen kann aufgrund von Partikel- und chemikalienbedingter Toxizität genauso zu Verletzungen, physiologischen Veränderungen und Beeinträchtigungen bei Nahrungszunahme, Wachstum, Fortpflanzung und Sauerstoffverbrauch führen (Green 2022, S. 116 f.). Solche kleinen Teilchen können von einer großen Bandbreite von Organismen aufgenommen werden. Außerdem können Kunststoffabfälle im Meer (und an Land) Veränderungen in der mikrobiellen Zusammensetzung verursachen und zur Verbreitung von Krankheitserregern beitragen (Cornacchia 2023, S. 80). Die Akkumulation von Kunststoffen auf dem Meeresboden behindert biogeochemische Prozesse, was zu Anoxie und Nahrungsmangel der sedimentbewohnenden Lebewesen führen (Canals et al. 2021, S. 9) und dadurch die Artzusammensetzung in dem betroffenen Gebiet verändern kann (Bertling et al. 2021, S. 23). Die Toxizität hängt genauso auch von der Abfallart ab. Geisternetze sind ein starker Stressfaktor für Küsten- und Meeresökosysteme und tragen zu einer hohen Sterblichkeit bei Fischen bei (Christensen et al. 2023, S. 19; Veiga et al. 2022, S. 84). Außerdem können sie mitunter lange Zeit im offenen Gewässer treiben, bevor sie schließlich auf den Meeresboden absinken. Dadurch bedrohen sie 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 (Hinzmann et al. 2025, S. 49).

Toxizität für Menschen: Die Plastikaufnahme durch Meeresorganismen kann sich durch den Verzehr von Fischen oder Muscheln auch auf die menschliche Gesundheit auswirken (la Farré et al. 2021, S. 7). Chemikalien, Zusatzstoffe, die aus Kunststoffen ausgewaschen werden, können ebenfalls zu (öko)toxikologischen Auswirkungen führen (MacLeod et al. 2021, S. 5). Mehr als die Kunststoffpolymere selbst sind es die Zusatzstoffe, wie Weichmacher oder Bisphenol A, die für die menschliche Gesundheit schädlich sind. Diese können toxische Wirkungen auf der zellulären Ebene haben, endokrine Effekte verursachen (Zimmermann et al. 2019), Mutationen auslösen und dadurch krebserregend wirken, wobei das Risiko für die menschliche Gesundheit über wassertransportierte Kunststoffe nicht zwangsläufig größer ist als bei anderen Expositionswegen. Der Transport von Pathogenen durch Meeresabfälle könnte weitere Risiken für die menschliche Gesundheit mit sich bringen (Werner et al. 2016). Durch den zunehmenden weltweiten Verbrauch von Plastik könnten die Interaktion von antimikrobiellen Verbindungen und Kunststoffen die Ausbreitung resistenter Mikrobenstämme verschärfen (Green 2022, S. 122).

Sozioökonomische Auswirkungen: Meeresmüll kann die Wirtschaftlichkeit der Fischerei durch hohe Kosten für die Entfernung von Müll aus den Netzen und durch Schäden an den Fanggeräten aufgrund von Fehlfängen beeinträchtigen. Bei Schiffen können außerdem Probleme und hohe Kosten durch verhedderte Propeller und verstopfte Kühlsysteme entstehen (Werner et al. 2016, S.39 ff.). Außerdem können Plastikabfälle Meeresorganismen in Aquakulturen und Wildbeständen durch Verschlucken oder Übertragung von Viren, Krankheitserregern und toxischen Schadstoffen schädigen, was zu einer Verringerung des (Fang-)Ertrags führen kann. Außerdem wirkt sich die sichtbare Verschmutzung durch Meeresmüll erheblich auf das Erholungserlebnis am Meer aus (Cornacchia 2023, S. 80; Wyles et al. 2016).

Schließlich können die Effekte der Plastikbelastung kaum allein betrachtet werden, sondern nur im Zusammenspiel mit der Exposition gegenüber weiteren Stressoren, wie der Überfischung sowie Änderungen von Temperatur, Nährstoffzufuhr, Sauerstoffgehalt, pH-Wert und Chemikalienbelastung (MacLeod et al. 2021, S. 6).

4 Stand aktueller Entwicklungen von Technologien zur Entfernung von Kunststoffen aus Abwasser und Gewässern

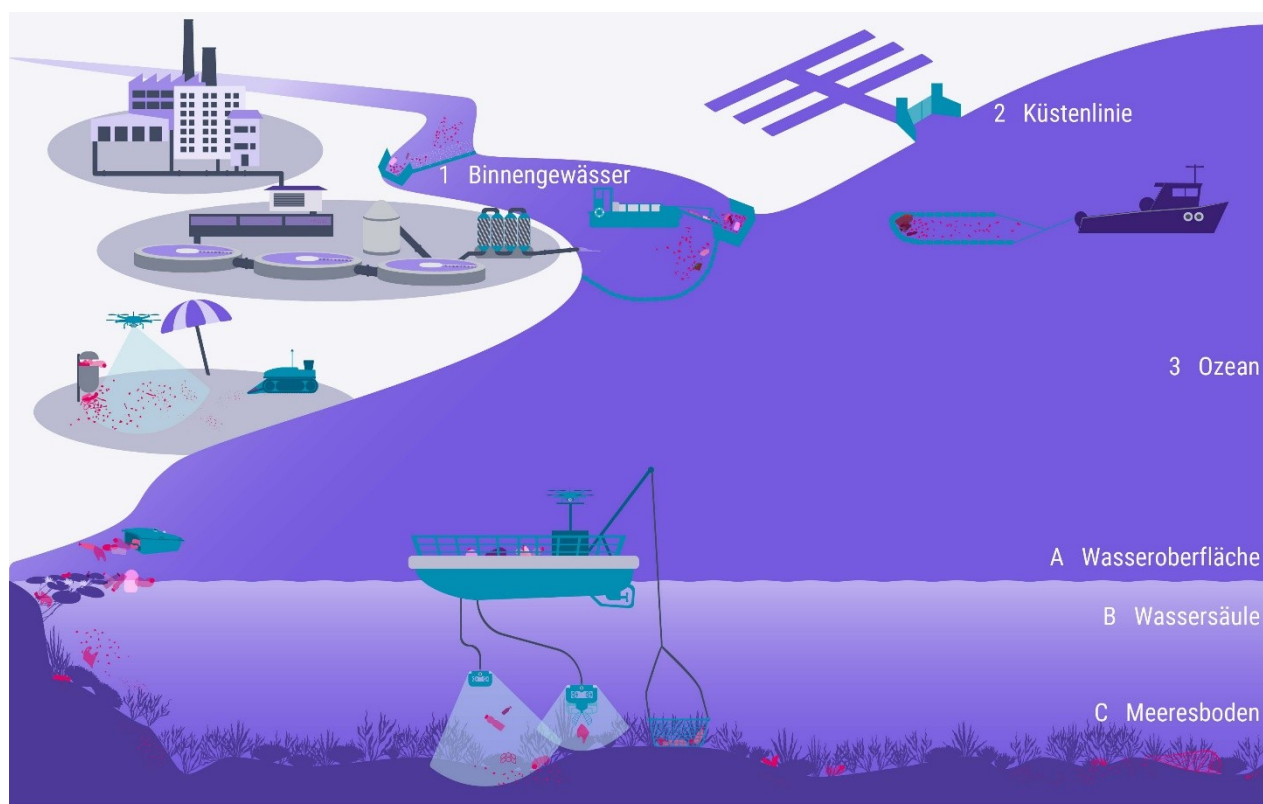
- Die Vielfalt der existierenden Technologien spiegelt die Vielfalt von Quellen, Abfallgrößen und Anwendungsbereichen wider.
- Mechanische Lösungen für die Entfernung von treibendem Makroplastik an der Wasseroberfläche machen den größten Anteil der Technologien aus.

Um Plastikeinträge in Meere und den Ozean zu reduzieren, sind verschiedene Technologien geeignet. Das TA-Kompakt fokussiert auf solche Technologien, die am Ende des Lebenszyklus ansetzen, nachdem Kunststoffe produziert, verbraucht und entsorgt wurden. Die Ergebnisse dieses Kapitels beruhen maßgeblich auf dem Gutachten von Bellou (2025).

Technologien für unterschiedliche Umweltkompartimente, vertikale Zonen und Abfallgrößen

Technologien zur Entfernung von Kunststoffen (TEK) aus Gewässern und Abwasser können in unterschiedlichen Umweltkompartimenten und verschiedenen vertikalen Zonen zum Einsatz kommen (Abb. 4.1).

Abbildung 4.1 Überblick über Anwendungsbereiche von Technologien zur Entfernung von Kunststoffen



Abfall-/Partikelgröße

- Makro einschließlich Meso: 0,5 cm bis > 2,5 cm
- Mikro: 1 µm bis ≤ 5 mm
- Nano: 1 nm bis ≤ 1 µm

Anwendungsbereich

Umweltkompartimente

- 1 Binnengewässer: Kläranlagen, Flüsse, Seen, Kanäle
- 2 Küstenlinie: Küstengewässer, Häfen, Mündungen, Fjorde, Ästuar und Strände
- 3 Ozean: offenes Meer

vertikaler Bereich

- A Wasseroberfläche
- B Wassersäule
- C Meeresboden

Eigene Darstellung nach Bellou et al. (2021, S. 517); Übersetzung TAB

Sie können direkt an Punktquellen ansetzen, wie Abläufen von Kläranlagen, Regenwasserkanälen im Trennsystem oder auch Mischwasserüberläufen. Andere Technologien wurden dazu entwickelt, in Binnengewässern (z. B. Flüsse) vorhandene Kunststoffe zu entfernen, bevor sie die Meere und den Ozean erreichen (1). Schließlich können manche Technologien eingesetzt werden, wenn Kunststoffabfälle bereits das Meer erreicht haben – in Häfen und an Stränden (2) oder dann, wenn sie sich vom Land entfernt haben und sich auf offener See befinden (3). Dort können die Technologien in unterschiedlichen vertikalen Zonen angewendet werden, von der Wasseroberfläche (A) über die gesamte Wassersäule (B) bis hin zum/auf den Meeresboden (C). Dem Einsatzort entsprechend weisen TEK eine hohe Vielfalt auf und sind auf die Entfernung von Abfällen unterschiedlicher Typen und Größen ausgerichtet, von Mikroplastik bis hin zu Fischereinetzen.

Technologien für die Reinigung und Prävention

TEK lassen sich in Präventions- und Reinigungstechnologien unterscheiden. Unter Präventionstechnologien werden technologische Lösungen verstanden, die darauf abzielen, Abfalleinträge in aquatische Systeme bereits vor dem Eintrag in Gewässer abzufangen und zurückzuhalten. Dazu gehören neben Technologien für Kläranlagen und Kanalisationen beispielsweise auch Lösungen, die in Waschmaschinen eingesetzt werden, um Mikrofasern herauszufiltern. Reinigungstechnologien bezeichnen Technologien, die der Entfernung von bereits angefallenen Abfällen aus aquatischen Ökosystemen dienen (Bellou et al. 2021). Auch Technologien, die für die Säuberung von terrestrischen Küstenzonen (z. B. Strände) konzipiert wurden, zählen zu den Reinigungstechnologien. Manche Technologien verfügen außerdem über Sensorsysteme zur Detektion von Akkumulationsbereichen. Diese ermöglichen, TEK gezielt dort einzusetzen, wo sie am effektivsten wirken können (Bellou 2025, S. 8 f.). Insgesamt wurde zwischen 2015 und 2020 ein starker Anstieg innovativer Technologien beobachtet, auch in Deutschland (Bellou 2025, S. 46 ff. u. 80 ff.). Während Präventionstechnologien schon länger hierzulande entwickelt, eingesetzt und sogar exportiert werden – Deutschland hat beispielsweise einen komparativen Vorteil bei den Abwasserbehandlungstechnologien (EFI 2025, S. 108), ist ein Entwicklungsschub in den letzten Jahren insbesondere bei den Reinigungstechnologien festzustellen (Bellou 2025, S. 59).

Fokus technologischer Entwicklungen auf die Entfernung von treibendem Makroplastik an der Wasseroberfläche

Der Fokus der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten lag in den letzten Jahren laut Bellou (2025, S. 57 f.) stark auf der Entfernung von Makroabfällen. Nur wenige Technologieentwicklungen zielen explizit auf die Entfernung von kleineren Plastikpartikeln ab. Zu den Technologien, die für die Entfernung von Mikroplastik geeignet sind, zählen vor allem stationäre Technologien, die Einträge aus der Kanalisation in Gewässer minimieren sollen. Besonders selten sind Technologien zur Entfernung von Mikroplastik unter den Reinigungstechnologien zu finden, die Plastik aus Gewässern selbst entfernen sollen. Dies liegt daran, dass die Entwicklung von Systemen, die auf Plastikteile mit einer Größe von 5 mm oder kleiner abzielen, technologisch deutlich anspruchsvoller ist als die Entwicklung von Systemen für größere Plastikteile (Leone et al. 2023, S. 6).

Technologien wurden insbesondere für den Einsatz in Flussmündungen und landgebundenen Gewässerzonen entwickelt sowie für den Einsatz in Häfen und in Küstengebieten. Im Vergleich dazu richten sie nur sehr wenige Technologien auf die Entfernung von Plastik aus offenen Meeren und dem Ozean (Bellou 2025, S. 61). Außerdem zielen die meisten Technologien auf die Entfernung von Abfällen ab, die an der Wasseroberfläche treiben (Bellou 2025, S. 57).

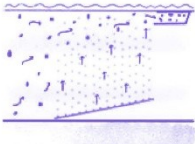
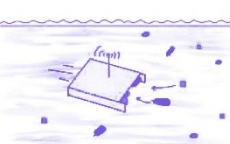
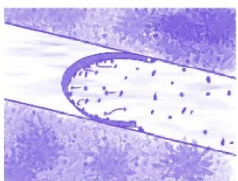
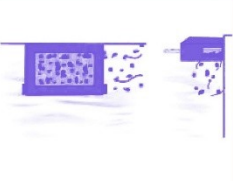
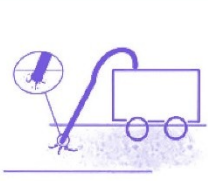
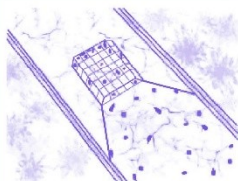
Dominanz mechanischer Ansätze – biologische Lösungen noch in der Entwicklung

Technologische Lösungsansätze zur Entfernung von Abfällen lassen sich darin unterscheiden, dass sie entweder mobil (wie beispielsweise Boote) oder fest installiert sind und stationär Kunststoffabfälle einfangen (z. B. in Kläranlagen oder in der Kanalisation). Manche mobile Technologien werden von Menschen vor Ort gesteuert, während andere autonom oder ferngesteuert agieren (Hinzmann et al. 2025, angelehnt an Moulaert 2021). Viele der Systeme sind mechanische Vorrichtungen, wie in Abbildung 4.2 zu erkennen ist. Die gängigsten Technologiekategorien werden in Kapitel 5 näher beschrieben.

Zu den innovativen Lösungen, die sich noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden, gehören außerdem biologische Lösungen. Untersucht werden Muscheln, die Mikroplastik aufnehmen, daneben Quallenschleim, Makrophyten und Makroalgen, die als Klebstoff für Plastikpartikel in der Wassersäule fungieren können. Außerdem werden Lösungen für die Entfernung von Mikroplastik aus Abwasser erforscht, wie beispielsweise Bakterien, die entweder von Natur aus in der Lage sind, Kunststoffe im Abwasser zu zersetzen, oder so

verändert werden, dass sie dies tun können. Noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden sich Aerogele aus Proteinfasern sowie magnetische Flüssigkeiten, die zur Bindung von Mikroplastikpartikeln eingesetzt werden sollen, um diese anschließend mithilfe von Magneten aus dem Wasser zu entfernen (Royal Society 2024, S. 12 f.).

Abbildung 4.2 Überblick über gängige Technologietypen

Luftbarrieren	Boote und Räder	Detektionssysteme	Drohnen und Roboter	von Schiffen gezogene großskalige Barrieren
				
schwimmende fest installierte Barrieren	Sandfilter	schwimmende Mülleimer	Sauger	schwimmende fest installierte Barriere mit Behälter
				

Grafische Darstellungen der Kategorien von Kunststoffsanierungstechnologien, wie sie in Schmaltz et al (2020) klassifiziert sind, zeigen die Vielfalt der derzeit existierenden Kunststoffsanierungstechnologien. Diese werden in verschiedenen Umgebungen eingesetzt, verwenden einzigartige Methoden und zielen auf unterschiedliche Arten der Kunststoffverschmutzung ab (alle Abbildungen sind Originale und wurden von den Autoren dieses Artikels entwickelt).

Quelle: nach Falk-Andersson et al. (2023, S. 13305), farblich angepasst; Übersetzung TAB

5 Technologiebewertung und Einsatzmöglichkeiten

- Stationäre Reinigungstechnologien ermöglichen eine gezielte Reinigung von Akkumulationsorten, zum Beispiel in Häfen und an Flussmündungen. Mobile Technologien sind flexibler, verbrauchen in der Regel aber mehr Energie.
- Während Präventionstechnologien durch ihre vorgelagerte Platzierung keine direkten Auswirkungen auf Meeresökosysteme haben, können sich Reinigungstechnologien zur Entfernung von Kunststoffen aus Gewässern unbeabsichtigt negativ auf die dortigen Ökosysteme auswirken.
- Kleinere Mikroplastikpartikel, die bereits im offenen Meer treiben oder auf den Meeresboden gesunken sind, lassen sich beim aktuellen Stand der Technik nicht effektiv zurückholen.
- Die Datenlage zum Energieverbrauch und zu den Auswirkungen existierender Technologien auf Meeresorganismen ist sehr lückenhaft und auch ihre Wirksamkeit ist bislang unzureichend erforscht.
- Problematisch sind vor allem die vielfach fehlenden Infrastrukturen für die Verwertung oder umweltgerechte Beseitigung der Abfälle im globalen Süden.

Um Plastikabfälle entlang der Verschmutzungskette – von der Quelle über den Transportweg bis hin zur Senke – zu bekämpfen, werden drei Typen von Technologien eingesetzt, die jeweils auf unterschiedliche Phasen und Orte der Verschmutzungskette abzielen. Zum ersten sind Technologien zur Behandlung von Abwasser und Regenwasser (Kap. 5.1) zu nennen. Diese Systeme wirken an der Quelle der Verschmutzung und verhindern, dass Schadstoffe überhaupt in Gewässer gelangen. Sie gehören zu den Präventionstechnologien und können als dezentrale Lösungen auch in bestehenden Infrastrukturen integriert werden. Die zweite Gruppe bilden stationäre Technologien (Kap. 5.2): Diese Anlagen dienen der Rückhaltung und Entfernung von Kunststoff- und anderen Abfällen an kritischen Übergangszonen zwischen Binnengewässern und Meeren bzw. an Flussmündungen sowie in Häfen. Zum dritten sind mobile Technologien zur Reinigung von Akkumulationszonen zu nennen. Diese flexiblen Systeme ermöglichen die gezielte Entfernung von Schadstoffen in bereits belasteten Bereichen (Kap. 5.3). Die Inhalte dieses Kapitels, insbesondere die Bewertung der stationären und mobilen Technologien, basieren auf der Analyse von Hinzmann et al. (2025). Die ausführlichere Darstellung ist im Gutachten zu finden.

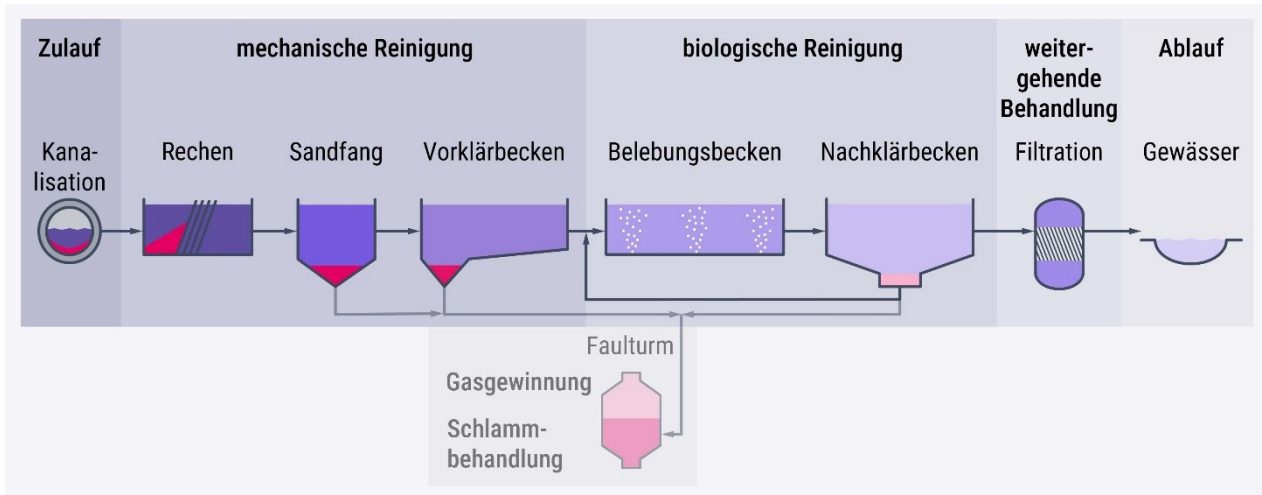
5.1 Behandlung von Abwasser und Regenwasser

Um den Eintrag von Kunststoffen in Gewässer über Klärwasser, Mischwasserentlastungen und Niederschlagswasser zu minimieren, stehen vor allem Technologien für Kläranlagen (Kap. 5.1.1) und Technologien für die Abwasser- und Regenwasserkanalisation (Kap. 5.1.2) zur Verfügung.

5.1.1 Kläranlagen

Kläranlagen sind bereits hochgradig technologisiert. In konventionellen Kläranlagen werden 100% des Makroplastiks zurückgehalten (Breitbarth 2018). Außerdem werden 90 bis 96% der Mikroplastikpartikel über die mechanische Reinigungsstufe (Rechen, Sandfang, ggf. Vorklärung) und die biologische Reinigung (Belebungsverfahren) aufgefangen (Fuhrmann et al. 2021, S. 736) (Abb. 5.1).

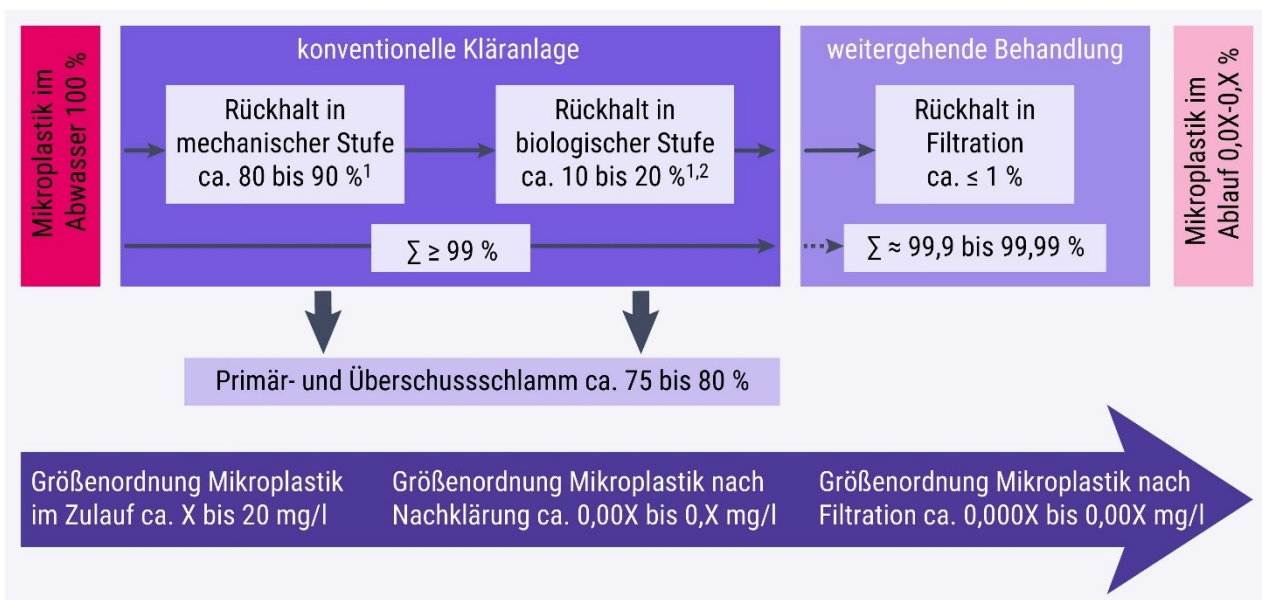
Abbildung 5.1 Relevante Reinigungsstufen für die Entfernung von Mikroplastik in deutschen Kläranlagen



Eigene Darstellung

Durch den Einsatz weitergehender Behandlung kann der Rückhalt von Mikroplastik auf nahezu 100% erhöht werden (Fuhrmann et al. 2021, S. 735) (Abb. 5.2).

Abbildung 5.2 Größenordnungen von Eliminationsraten und Massenkonzentrationen für Mikroplastik in kommunalen Kläranlagen



1 Talvitie/Heinonen (2014)

2 Bauerfeld/Meyer (2020)

Quelle: nach Fuhrmann et al. (2021, S. 735)

Dafür kommen verschiedene Technologien in Betracht, insbesondere nachgeschaltete Filteranlagen, z. B. Sand- und Tuchfilter, Mikrosiebe oder Membranverfahren (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1 Überblick über zentrale Technologien für die Entfernung von Kunststoffpartikeln in Kläranlagen

Technologien	Anwendungsgebiete	entfernbare Plastikgröße
Membranverfahren Membranbioreaktoren kombinieren die gewöhnliche biologische Abwasserreinigung mit einer Membranfiltration. Membranbioreaktoren und andere Membranverfahren filtern Abwasser so, dass selbst kleinste Partikel effektiv zurückgehalten werden.	Kläranlagen	m
Sandfilter 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.	kommunale Kläranlagen industrielle Kläranlagen	m
Agglomerationsfixierungsreaktion Die Agglomeration basiert auf der Dosierung von Hybridkieselgelkompositionen, die gezielt Mikroplastikpartikel zu größeren Aggregaten verbindet.	industrielle Kläranlagen	m/ggf. n

m = besonders zur Entfernung von Mikroplastik geeignet; n = Nanopartikel

Quelle: gekürzt nach Hinzmann et al. (2025, S. 6 ff.)

Einsatzmöglichkeiten

In Kläranlagen kann die Effizienz der Rückhaltung von Plastik zwar weiter verbessert werden, doch findet hier bereits eine weitgehende Elimination größerer Partikel statt (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 6 u. 39 ff.). Außerdem müssen alle Kläranlagen mit einer Kapazität von mehr als 150.000 Einwohnerwerten bis 2045 mit einer 4. Reinigungsstufe nachgerüstet werden. Das legt die Richtlinie (EU) 2024/3019⁷ (Kommunalabwasserrichtlinie) fest. Damit sollen Einträge problematischer Stoffe wie Stickstoff und Phosphor sowie langlebige toxische Chemikalien reduziert werden. Die vierte Reinigungsstufe kann durch verschiedene Verfahren realisiert werden, wobei die Wahl der Methode an die spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten der jeweiligen Kläranlage angepasst werden soll. Zu den gängigen Verfahren einer vierten Reinigungsstufe gehört der Einsatz von Pulveraktivkohle (PAK) und granulierter Aktivkohle (GAK) zur Adsorption von Mikroschadstoffen sowie fortgeschrittene oxidative Verfahren, wobei durch Zugabe von Ozon Spurenstoffe chemisch verändert werden. Allerdings zielen diese Verfahren nicht auf die Entfernung von Mikroplastik. Ihre Effektivität hinsichtlich des Rückhalts von Mikroplastik ist außerdem umstritten (Sturm et al. 2023) bzw. nicht ausreichend erforscht. Daher werden innovativere Filtrationsverfahren entwickelt, wie beispielsweise Tuchfiltersysteme, oder auch Agglomerationsfixierungsverfahren, die Partikel zu leichter entfernbaren Partikelverbünden bilden. Solche Verfahren könnten laut Hersteller eine vierte Reinigungsstufe ergänzen (Wasser 3.0 2023 u. 2024). Ergänzend zur Ozonung oder Aktivkohleadsorption lassen sich außerdem Sandfilter als zusätzliche Reinigungsstufe bzw. Schlussfiltration installieren, um u. a. die Mikroplastikentfernung zu verbessern (Wolff et al. 2021), wobei Unsicherheit hinsichtlich der Wirksamkeit von Sandfiltern zur Retention von Mikroplastik bestehen (Scheer et al. 2022b, S. 74). In Deutschland wurden bereits rund 50 Kläranlagen mit Sandfiltern nachgerüstet⁸.

Neben PAK und GAK kann der Einbau eines physischen Filtrationssystems für Mikropartikel bzw. eines Membranverfahrens (z. B. Mikro-, Ultra-, Nanofiltration oder Umkehrosmose) als vierte Reinigungsstufe dienen, wodurch auch feinste Partikel inklusive Mikroplastik zurückgehalten werden können. Diese Art von Technik ist zwar wirksam und erprobt, allerdings sehr wartungs-, kosten- und energieintensiv (Masch/Bitter 2021). Außerdem sind Membranbioreaktoren zur Rückhaltung von Mikroplastik in kommunalen Kläranlagen der Schnellsandfiltration zum Beispiel nicht eindeutig überlegen (Bayo et al. 2020). Eine Alternative bieten Flotations- und Sedimentationsverfahren. Diese Verfahren sind deutlich energieeffizienter als Membranverfahren, allerdings weniger

⁷ Richtlinie (EU) 2024/3019 vom 27. November 2024 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Neufassung)

⁸ Interview mit Dr. Tim Fuhrmann (Emscher Wassertechnik GmbH), durchgeführt von Hinzmann et al. (2025) am 9.1.2025

wirksam. Daher werden Ergänzungsverfahren zur Steigerung der Effizienz entwickelt, wie die Zugabe von Flockungsmitteln. Für ausgewählte Kunststoffsorten (PE, PA, PVC) konnten durch Flockungsmittel erfolgreich Mikroplastikpartikel in leichter entfernbare größere Agglomerate überführt werden (Masch/Bitter 2021). Erforscht und in der Erprobung sind außerdem biologische Verfahren, bei denen Würmer und Mikroorganismen Mikroplastik abbauen (HSWT o. J.), sowie Zyklonfilter, die als vierte Reinigungsstufe dienen können, um Mikroplastik bis zu 10 µm Durchmesser aus dem Abwasser zu entfernen (BMFTR 2025; ECOFARIO 2025). Ein weiteres Forschungsgebiet zur Entfernung von Plastik aus dem Wasser ist die Entwicklung von Eisenoxidnanopartikeln. Diese Nanopartikel können sich an die Oberfläche von Mikroplastikpartikeln binden und mit ihnen zu größeren Agglomeraten verklumpen. Durch die magnetische Eigenschaft des Eisenoxids können diese Agglomerate dann effizient eingesammelt werden, indem sie mit einem Magneten aus dem Wasser gezogen werden (Sarcletti et al. 2021). Wissenschaftlich valide Ergebnisse zum Vergleich von Technologien zur Rückhaltung von Mikroplastik gibt es allerdings nur wenige. Grundsätzlich sind Analysen von Mikroplastikkonzentrationen oft mit hohen Messunsicherheiten behaftet, sodass Ergebnisse zur Wirksamkeit der Reinigungstechnologien nicht sehr belastbar sind (Scheer et al. 2022a, S. 9 u. 15).

In der plastikproduzierenden und plastikverarbeitenden Industrie mit hohen Konzentrationen insbesondere für Mikroplastik ist der Einsatz von Sandfiltern, Agglomerationsfixierungsreaktionen und/oder Membranen sinnvoll, bei kommunalem Abwasser ist dies bei Abwägung der Kosten bzw. des Material- und Energieaufwands im Vergleich zum Nutzen flächendeckend eher nicht zu empfehlen⁹ (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 40 ff.). Grundsätzlich sind durch die neuen europäischen Regelungen Verbesserungen beim Rückhalt von Mikroplastik zu erwarten. Die für die vierte Reinigungsstufe vorgesehenen Technologien sollen hinsichtlich des Rückhalts von Mikroplastik bereits Verbesserungen mit sich bringen (Scheer et al. 2022a, S. 11). Hierdurch ist für Partikel über 10 µm von einer Rückhaltung von über 95 % auszugehen. Zwar können nachgeschaltete Filtrationseinheiten die Rückhaltung von Partikeln weiter verbessern. Allerdings tragen kommunale Kläranlagen nur einen geringeren Anteil an den gesamten direkten Mikroplastikemissionen in Gewässer bei (Scheer et al. 2022a, S. 9 f.). Daher ist derzeit die Einführung weiterer technologischer Maßnahmen im Bereich der kommunalen Kläranlagen zunächst nicht als prioritär anzusehen. Vielmehr stellt sich die Frage, wie schnell und in welcher Anzahl Anlagenbetreiber eine Nachrüstung der vierten Reinigungsstufe umsetzen und ob nicht auch Kommunen mit weniger als 150.000 Einwohner/innen nachrüsten könnten (Hinzmann et al. 2025, S. 40).

Im Vergleich zu Technologien, die in Flüssen oder im Meer zum Einsatz kommen, haben Technologien, die in Kläranlagen – sowie auch in der Kanalisation – eingesetzt werden, den Vorteil, kaum bis keine Nebenwirkungen auf Tiere und Lebensräume mit sich zu bringen (Hinzmann et al. 2025, S. 28). Da ein Teil der Plastikfracht sich im Klärschlamm wiederfindet, birgt eine Ausbringung des Klärschlammes, z. B. in der Landwirtschaft, dennoch das Risiko, Plastik in die Umwelt freizusetzen (Hinzmann et al. 2025, S. 38).

5.1.2 Kanalisation

Mit geschätzten ca. 22 % wird ein erheblicher Teil des Abwassers, das in Deutschland produziert wird, nicht in Kläranlagen behandelt (Bertling et al. 2018, S. 21). Der Großteil des unbehandelten Niederschlagwassers stammt aus der Trennsystemkanalisation, in der mit Mikroplastik belastetes Regenwasser nicht systematisch behandelt wird, sowie aus Mischwasserentlastungen, die durch Überlastung bei Starkregen ungereinigtes Abwasser in Gewässer einleiten. Für die Behandlung von Misch- und Niederschlagswasser kommen Regenrückhalte- oder Sedimentationsbecken sowie Filter und Netze in Betracht (Fuhrmann et al. 2021, S. 738; Günthert/Faltermaier 2023, S. 22) (Tab. 5.2).

⁹ Interview mit Dr.-Ing. Tim Fuhrmann (Emscher Wassertechnik GmbH), durchgeführt von Hinzmann et al. (2025) am 9.1.2025

Tabelle 5.2 Technologien für die Behandlung von Misch- und Niederschlagswasser

Technologien	Anwendungsgebiete	entfernbare Plastikgröße
Regenrückhalte- bzw. Sedimentationsbecken Es handelt sich um stationäre Anlagen, die den Wasserabfluss verlangsamen und so Sedimente und Partikel durch Schwerkraft abscheiden.	Regenwasserkanalisation, Mischwasserentlastungsanlagen	M
Netze und Filter Netze filtern Makroplastik, während Filter (z. B. Tuchfilter, Mikrosiebe, Gullyfilter, Lamellenfilter) Mikroplastik bis 10 µm entfernen können. Ihre Anwendung kann verhindern, dass Plastik insbesondere bei Starkregen ungeklärt in Gewässer gelangt. Die unter TEK für Kläranlagen erwähnten Sandfilter können ebenfalls in der Kanalisation eingesetzt werden und entfernen Mikroplastik größer als 10 µm. Sandfilter sind mit Tuchfiltern kombinierbar.	Straßenabflüsse, Regenrückhalte- und Sedimentationsbecken, stark belastete Mischwasserentlastungsanlagen	M/m

M = besonders zur Entfernung von Makroplastik geeignet; m = besonders zur Entfernung von Mikroplastik geeignet

Quelle: gekürzt nach Hinzmann et al. (2025, S. 6 ff.)

Anwendungsbereiche und Effektivität

Regenrückhalte- bzw. Sedimentationsbecken wie auch andere passiv wirkende Bauwerke, die die Fließgeschwindigkeit des Wassers verringern und Partikel durch Schwerkraft abscheiden, haben sich als äußerst zuverlässige Methode zur Reduzierung von Schmutzfrachten, einschließlich Plastik, etabliert (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 39 f.). Sie puffern gewässerschädliche Abflussspitzen aus der Siedlungsentwässerung ab. In der Mischwasserkanalisation ist dem Regenrückhaltebecken häufig ein Regenüberlaufbecken nachgeschaltet. Letzteres stellt zusätzliche Kapazitäten für kleine bis mittlere Regenereignisse bereit. Das Regenüberlaufbecken füllt sich während des Niederschlags und wird während und nach dem Regenereignis zur Kläranlage geleitet. Dadurch gelangt bei diesen Ereignissen kein bzw. weniger ungereinigtes Mischwasser in die Gewässer (Weiß 2020b). In einer Trennkanalisation gelangt das Wasser aus dem Regenwasserkanal direkt in das Regenrückhaltebecken (Weiß 2020a).

Regenrückhaltebecken können 77 bis 99 % der Plastikfracht zurückhalten (Rasmussen et al. 2024). Ihre Vorteile liegen außerdem in ihrer einfachen Funktionsweise und ihrem geringen Energieverbrauch. Es wird keine kontinuierliche Energiezufuhr benötigt, sondern nur zur Reinigung der Anlage selbst (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 8). Bei Starkregenereignissen kann ihre Effizienz jedoch abnehmen, da die Partikelabscheidung durch die verkürzte Verweilzeit erschwert wird. Zudem benötigen Regenrückhaltebecken ausreichend Platz und die regelmäßige Entfernung des abgesetzten Materials erfordert einen Unterhaltungsaufwand, der die Betriebskosten erhöht. In deutschen Städten werden diese Becken bereits häufig eingesetzt, um Verschmutzungen durch Oberflächenabfluss zu reduzieren. Allerdings finden sich solche Anlagen vor allem in Mischsystemen. Der größte Teil des Niederschlagswassers wird daher nicht ausreichend behandelt (Bertling et al. 2021, S. 42).

Für den Rückhalt von sehr kleinen Partikeln (z. B. kleiner als 100 µm), worin der größte Teil des Reifenabriebs besteht, sind die standardgemäß installierten Sedimentationsanlagen für die kanalisierte Straßenentwässerung nicht geeignet. Um die Effizienz beim Rückhalt von Mikroplastik insbesondere in stark belasteten Zonen (z. B. neben Autobahnen und Parkplätzen) zu steigern, empfiehlt sich eine Kombination von Regenrückhaltebecken mit weiterführenden Technologien wie Tuchfiltern oder Mikrosieben (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 8 ff. u. 39). Diese Filtertechnologien entfernen Mikroplastikpartikel mit einer Effizienz von bis zu 99 %. Sie 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. In der Schweiz wurden bereits einige Straßenabwasser-Behandlungsanlagen (SABA) gebaut, die mit Tuchfiltern ausgestattet sind (ASTRA 2010).

Filtersysteme für Oberflächenabflüsse können auch dezentral an Einleitungsstellen von Oberflächenabfluss in die Kanalisation eingebaut werden. Dabei handelt es sich um Filter und Fallen für Grobstoffe, die in Einläufen oder

Ausläufen der Kanalisation eingesetzt werden, um Makroplastik (z.B. Plastikflaschen oder -tüten) aufzufangen. Solche Filtersysteme am Straßenrand werden weiterentwickelt, um ihre Effizienz insbesondere beim Rückhalt von Mikroplastik zu erhöhen, ihre Wartungsfreundlichkeit zu optimieren (UD 2021) und ihre Wirkung bei Starkregenereignissen zu steigern (GKD 2024; Reichel 2022).

Einsatzmöglichkeiten

Besonders hoch ist die Effizienz von Technologien zur Plastikentfernung in der Kanalisation an bisher ungeschützten Standorten (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 29 und 38 f.). Um Einträge aus Oberflächenabfluss in Trennsystemen und aus Mischwasserentlastungsanlagen bei Mischsystemen zu reduzieren, würde sich die Installation von Sedimentation- oder Regenrückhaltebecken und/oder von Filteranlagen in Schächten an belasteten Oberflächenabflüssen und in Mischwasserentlastungsanlagen anbieten. Wegen der hohen Zahl an Einleitpunkten ist es dabei wichtig, Akkumulationszonen zu identifizieren, an denen Einträge möglichst effektiv verringert werden können. Akkumulationszonen sind Orte, 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), Einkaufsviertel (Schmaltz et al. 2020, S. 106067), Parkplätze in Gewerbe- und Industriegebieten oder auch Flughäfen (UBA o. J.b) sowie stark belastete Regeneinleitungs- und Mischwasserentlastungsanlagen. Mithilfe von Stoffstrommodellen können die relevanten Einleitungsstellen lokalisiert und der Ressourceneinsatz optimiert werden (ReMiPla¹⁰). Dies ist umso wichtiger, als die Kosten stark von der Anzahl und Lage der zu installierenden Systeme abhängen.

5.2 Stationäre Technologien an Flussmündungen und Häfen

Stationäre Technologien werden dort eingesetzt, wo Plastik durchfließt bzw. sich ansammelt. Das gilt zum einen für Fließgewässer. Dort wird Plastik eingefangen, das flussabwärts treibt. Zum anderen gilt das in Küstenbereichen und Häfen für dasjenige Plastik, das an der Wasseroberfläche treibt. Zu den stationären Technologien gehören Gitterkonstruktionen aus Metall und Maschennetze, schwimmende, fest installierte Barrieren, Müllräder, schwimmende Mülleimer sowie Luftblasenvorhänge (Tab. 5.3).

¹⁰ <https://ewlw.de/remipla/> (19.2.2025)

Tabelle 5.3 Überblick über wichtige Typen stationärer Technologien

Technologien	Anwendungsgebiete	entfernbarer Plastikgröße
schwimmende, fest installierte Barrieren Über einen Fluss gespannte oder an strategischen Stellen platzierte schwimmende Barriere, welche an der Wasseroberfläche treibenden Müll auffängt. Die Entnahme des Mülls kann manuell oder mit Hilfe weiterer Technologie erfolgen (z. B. Boote, Kräne).	Fließgewässer	M/größere Partikel
fest installierte Gitterbarrieren und Maschennetze Bis zum Flussboden reichende Gitterkonstruktion aus Metall oder Kunststoff, die den Abfall blockiert und in eine fest installierte Vorrichtung leitet. Angesammelte Abfälle werden in der Regel manuell oder mechanisch durch Harken entfernt.	Fließgewässer	M/größere Partikel
Müllräder Mithilfe von Absperrungen werden den Fluss hinuntertreibende Abfälle zu einem fest installierten Müllradschiff geleitet. An einem großen Wasserrad installierte Rechen heben die Abfälle auf ein Förderband, das diese dann aus dem Wasser auf die Müllcontainer auf einer stationären Plattform in der Nähe des Ufers befördert. Das Wasserrad wird von der Flussströmung angetrieben, bei Bedarf zusätzlich durch Solarpaneele.	Häfen, Flussmündungen, Ausläufe von Fließgewässern	M/größere Partikel
schwimmende Mülleimer Schwimmende Abfallbehälter können in ruhiger, geschützter Umgebung in Häfen 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.	Häfen, Küsten, Binnengewässer	M/m
Luftblasenvorhang 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.	Fließgewässer, Häfen	M/m (> 1mm)

M = besonders zur Entfernung von Makroplastik geeignet; m = besonders zur Entfernung von Mikroplastik geeignet

Quelle: gekürzt nach Hinzmann et al. (2025, S. 12 ff.)

Anwendungsbereiche und Effektivität stationärer Technologien

Stationäre Technologien können oft in mehreren Anwendungsbereichen an unterschiedlichen Orten eingesetzt werden, Luftblasenvorhänge beispielsweise in Kanälen, Flüssen oder auch kleineren Fließgewässern (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 12 ff. u. 32 ff.). Ihr größter Vorteil besteht darin, dass sie nach ihrer Installation nicht kontinuierlich von Menschen bedient werden müssen bzw. nur dann, wenn die eingesammelten Abfälle wegtransportiert werden müssen. Allerdings sind sie per Definition weniger flexibel als mobile Technologien. Einmal installiert, können sie in der Regel nur auf einen Teil der Wasserstraße einwirken. Außerdem braucht es eine zusätzliche Infrastruktur, um die gesammelten Abfälle an Land zu transportieren. Stationäre Systeme mit externer Stromzufuhr sind besonders effektiv in Bereichen mit hohem Schiffsverkehr und geringer Wasserströmung, z. B. in Häfen und Kanälen. Dort können sie Plastik sammeln, ohne den Schiffsverkehr zu stören. In

Gebieten mit starker Flussströmung verlieren stationäre Technologien allerdings an Effektivität, da starke Strömungen den Motor überfordern können (Leone et al. 2023, S. 107854). Insgesamt sind Effektivitätsdaten stark gestreut, denn die Wirksamkeit immobiler Lösungen hängt in hohem Maße von der Abfallmenge an den Einsatzorten ab (Brouwer et al. 2023, S. 6). Gängige stationäre Technologien wie Gitterbarrieren und Maschennetze, aber auch schwimmende Barrieren und Müllräder, zielen vorrangig darauf ab, Makroplastik und großes Mikroplastik aus dem Wasser zu entfernen. Denn die Entwicklung von Systemen, die auf Plastik mit einer Größe von 5 mm oder weniger abzielen, ist technologisch anspruchsvoller als die Entwicklung von Systemen, die auf makroskopische Plastikartikel abzielen (Leone et al. 2023, S. 107854). Trotz dieser Schwierigkeiten wurden einige Technologien gezielt dafür konzipiert, zusätzlich Mikroplastik aus dem Wasser zu entfernen. So können schwimmende Mülleimer Makro- und Mikroplastik, einschließlich Kunststoffpellets und -fragmente, ab einer Größe von ca. 0,1 cm in geschützten und ruhigen Gewässern sammeln (Parker-Jurd et al. 2022). Auch Luftblasenvorhänge, die außer in Häfen auch in Fließgewässern eingesetzt werden können, sind in der Lage, Partikel ab einer Größe von 1 mm einzufangen. Die meisten Technologien sind für eine Beseitigung von Plastik an der Wasseroberfläche geeignet, wobei festinstallierte Gitterbarrieren und Maschennetze sowie Luftblasenvorhänge auch Plastik in der Wassersäule entfernen können, letztere sogar über die gesamte Flussbreite.

Nebenwirkungen

Stationäre Technologien verbrauchen in der Regel weniger Energie als mobile Technologien, da letztere nicht nur Energie für die Sammlung von Abfällen, sondern auch für ihre Fortbewegung aufwenden müssen (dazu und zum Folgenden Hinzmann 2025, S. 31). Dennoch benötigen selbst passive Technologien, die ohne Energiezufuhr mit Hilfe der Strömung Plastikmüll einfangen, meist energieverbrauchende Geräte wie beispielsweise einen Kran, um die eingefangenen Abfälle abzutransportieren. Zunehmend werden erneuerbare Energien für den Betrieb der Technologien eingesetzt (Moulaert et al. 2021). Luftblasenvorhänge verbrauchen bereits bei ihrem Betrieb Energie. Die Anlage, die in Amsterdam im Einsatz ist (Abb. 5.4), wird mit erneuerbaren Energien betrieben und verbraucht in etwa so viel Energie wie eine elektrische Kehrmaschine.¹¹ Der Energieverbrauch ist naturgemäß von der Länge der installierten Barriere abhängig (Moulaert et al. 2021).

Auf die belebte Umwelt wirken sich die Technologien nicht zwangsläufig positiv aus. Flüsse und Flussmündungen dienen beispielsweise als Laich- und Aufzuchtgebiete für eine Reihe von Fischarten, darunter auch kommerziell relevante, und sorgen als Übergangszone zwischen aquatischen und terrestrischen Lebensräumen für einen grundlegenden Nährstoffkreislauf. Wenn Technologien in solchen Zonen eingesetzt werden, können die Organismen, ihre Habitate oder Nährstoffkreisläufe gestört werden (Helinski et al. 2021). Ein Gitter oder Maschennetz aus Metall oder Kunststoff, das von der Flussoberfläche bis zum Grund des Flussbettes reicht, kann die Bewegung von Fischen und anderen größeren Wasserorganismen verhindern (Silva et al. 2021). Schwimmende, fest installierte Barrieren sind hingegen so konzipiert, dass sie vor allem Plastik einfangen, das an der Oberfläche treibt. Fische und andere Flussbewohner können normalerweise unter den Strukturen an der Oberfläche durchschwimmen (Blettler et al. 2023). Allerdings besteht für Organismen, die die Luft-Wasser-Grenzschicht bewohnen, trotzdem die Gefahr, dass sie sich in den Strukturen an der Oberfläche verfangen – insbesondere dann, wenn der eingefangene Müll und das Treibgut nicht regelmäßig entfernt werden (Silva et al. 2021). Selbst kleinräumige Technologien, wie schwimmende Mülleimer, die in Küstengebieten und Häfen eingesetzt werden, sammelten laut einigen Studien deutlich größere Mengen an Meereslebewesen als an Plastik ein (EIA/Ocean Care 2023; Paris et al. 2022; Parker-Jurd et al. 2022). Dank der sehr langsamen Bewegung ihrer Räder können Tiere Müllrädern hingegen meist ausweichen bzw. entkommen (Silva et al. 2021). Auch Luftblasenvorhänge haben diese Wirkungen nicht. Ein weiterer Vorteil dieser Technologie besteht darin, dass sie den Sauerstoffgehalt des Gewässers leicht erhöhen kann, was sich positiv auf das lokale Ökosystem auswirken und toxische Algenblüte verhindern kann (Eveleens o. J.). Ein interviewter Experte befürchtete allerdings, dass sich durch die Luftblasenvorhänge Strömungen ändern könnten, was sich auf die Verteilung von Nährstoffen im Wasser oder das Verhalten von Fischen auswirken könnte¹². Bei beiden Systemen können passiv an der Oberfläche treibende Lebewesen und Mikroorganismen sowie organisches Material dennoch mitgefangen werden und dadurch dem Nahrungsnetz entzogen werden. Allerdings fehlt es grundsätzlich an Daten, um zuverlässige Aussagen zu den genauen Auswirkungen der Technologien treffen zu können (Bellou 2025; Griffin et al. 2024, S. 7; Hinzmann et al. 2025).

¹¹ <https://thegreatbubblebarrier.com/technology/> (10.1.2025)

¹² Interview mit Prof. Dr. Tim van Emmerik, Universität Wageningen, Niederlande, geführt am 12.12.2024 von Bergmann et al. (2025)

Einsatzmöglichkeiten

Strategisch platzierte Müllräder können an Fluss- oder Kanalmündungen insbesondere nach starken Niederschlägen Plastikeinträge in die Gewässer schnell wieder entfernen. In Deutschland, wo Starkregenereignisse in ihrer Häufigkeit aufgrund des Klimawandels zunehmen werden (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 42 ff.), könnten Müllräder daher immer relevanter werden. In der Praxis hat sich gezeigt, dass sie in Kombination mit schwimmenden Barrieren (wie im Hafen von Baltimore) (Abb. 5.3), bei starken Regenfällen besonders effektiv arbeiten, denn hier treffen zwei zentrale Faktoren zusammen: eine stärkere Strömung und eine erhöhte Menge an Plastikmüll. Bei starken Niederschlägen werden herumliegende Müllteile aus urbanen Gebieten in die Regenwasserabflüsse befördert und gelangen ungefiltert in die Flüsse bzw. Hafenbecken. Die Anlagen arbeiten semiautonom und ohne externe Energiezufuhr.¹³ Dies ist allerdings vor allem für größere Müllteile relevant. Mikroplastik und Plastikteile in der Wassersäule und vom Grund werden nicht erfasst.

Abbildung 5.3 Das Müllrad „Mr. Trash Wheel“ an der Mündung des Jones Falls River im inneren Hafen von Baltimore



Quelle: Dicklyon (CC BY-SA 4.0; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mr._Trash_Wheel--Baltimore_MD.jpg; 27.1.2025)

Für eine umfangreiche Entfernung von Makroplastik und größeren Mikroplastikteilen an Flussmündungen oder in Häfen sind Luftblasenvorhänge eine denkbare Lösung (Abb. 5.4). Ebenso wie Müllräder können sie große Abfallmengen effektiv aus dem Wasser entfernen. Allerdings gehören sie zu den Lösungen mit vergleichsweise hohen Investitionskosten, wobei die Höhe stark von den jeweiligen Standortbedingungen (z. B. Breite, Nutzung, Strömung) abhängig ist.¹⁴ Im Vergleich liegen die Bau- und Installationskosten für ein Müllrad sogar tendenziell höher (ITTN o. J.). Schwimmende Barrieren zählen hingegen zu den kostengünstigsten TEK und werden häufig in Entwicklungsländern eingesetzt.¹⁵ Für einen belastbaren Vergleich müssten die Investitionskosten in Relation zu den Sammel- bzw. Entsorgungskapazitäten für Kunststoffabfälle unterschiedlicher Größen gesetzt und zusätzlich Betriebs- sowie Instandhaltungskosten berücksichtigt werden. Entsprechende Daten sind bislang jedoch kaum öffentlich zugänglich (Bellou 2025, S. 91 ff.).

¹³ <https://www.mrtrashwheel.com/> (15.1.2026)

¹⁴ <https://thegreatbubblebarrier.com/> (15.1.2026)

¹⁵ Z. B. <https://plasticfischer.com/> (15.1.2026)

Abbildung 5.4 Luftblasenvorhang in Amsterdam

Quelle: The Great Bubble Barrier B.V. (<https://thegreatbubblebarrier.com/bubble-barrier-amsterdam/>; 8.5.2025)

5.3 Mobile Technologien zur Reinigung von Akkumulationszonen und Geisternetzen

Mobile Technologien umfassen bemannte Boote und sonstige Wasserfahrzeuge sowie unbemannte Technologien, die autonom oder ferngesteuert agieren (Tab. 5.4). Sie werden eingesetzt, um flexibel Plastikabfälle dort einzusammeln, wo höhere Konzentrationen nachgewiesen werden. Verbreitet sind Müllsammelboote, die mithilfe von Netzen und Körben Abfälle passiv sammeln, sowie solche, die mithilfe eines Hydraulikarms gezielt Abfälle auf ein Förderband heben (siehe dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 19 ff.). Kleinteilige mobile Interventionen können auch mit Kajaks oder Paddelbrettern oder im Rahmen von Tauchaktivitäten erfolgen (Royal Society 2024, S. 13).

Tabelle 5.4 Überblick über wichtige mobile Technologietypen

Technologien	Anwendungsgebiete	entfernbarer Plastikgröße
Müllsammelboote mit Netzen oder Körben Fahrende Boote fangen schwimmenden Plastikmüll ein und sammeln diesen in Netzen, Körben oder anderen Behältern.	Häfen, Binnengewässer, Küstengewässer	n. a.
Müllsammelboote mit Förderbandtechnik Fahrende Boote (häufig Katamarane) nutzen Leitpfosten oder verstellbare Hydraulikarme, um Abfälle an der Wasseroberfläche auf ein Förderband zu leiten und so einzufangen.	Fließgewässer, Küstengewässer	n. a.
Müllsammelroboter und -drohnen Mobile Systeme zur Sammlung von Plastikmüll an der Wasseroberfläche, die entweder ferngesteuert werden oder weitgehend autonom arbeiten.	Häfen, Binnengewässer, Küstengewässer	M/m
Tauchroboter zur Müllsammlung Mobile Systeme zum Aufspüren und Sammeln von Kunststoffabfällen auf dem Gewässergrund und teilweise in der Wassersäule, die entweder ferngesteuert werden oder autonom arbeiten.	Binnengewässer, Küstengewässer, Ozean	M
von Schiffen gezogene Schleppnetze Schleppnetze, die eingesetzt werden, um Plastikmüll aus Gewässern zu entfernen. Sie können von verschiedenen Schiffstypen gezogen werden.	Küstengewässer, Ozean	n. a.
von Schiffen gezogene schwimmende Barrieren Große schwimmende Barrieren werden von Schiffen durch das offene Meer gezogen, um Plastikmüll an der Wasseroberfläche einzusammeln.	Küstengewässer, Ozean	n. a.

M = besonders zur Entfernung von Makroplastik geeignet; m = besonders zur Entfernung von Mikroplastik geeignet; n.a. = auf Anbieterwebseite nicht explizit angegeben

Quelle: gekürzt nach Hinzmann et al. (2025, S. 18 ff.)

Auch zur Entfernung von Plastik an Stränden werden mobile Technologien angewendet (Royal Society 2024, S. 13 f.; Schmaltz et al. 2020). Neben von Traktoren gezogenen oder vom Bediener geschobenen Rechen- und Siebssystemen¹⁶ und selbstfahrenden Robotern¹⁷, die an touristisch stark frequentierten Stränden eingesetzt werden und nicht speziell auf Makroplastik, sondern auf jegliches Treibgut ausgelegt sind, gehört dazu auch die manuelle Filterung mithilfe einfacher Siebe oder Trommelfilter. Diese Technologien werden entsprechend dem Fokus der vorliegenden Untersuchung im Folgenden nicht näher betrachtet.

Anwendungsbereiche und Wirksamkeit

Gängige mobile Lösungen zielen auf die Entfernung treibender Kunststoffe an der Oberfläche ab. Über 90 % der Technologien, die in Meeren und Flüssen eingesetzt werden können, sind zunächst für die Entfernung von schwimmendem Kunststoff ausgelegt, wobei die oberen Schichten der Wassersäule teils mitgereinigt werden können (Bellou et al. 2025, S. 71). Das gelingt beispielsweise mit schwimmenden Barrieren. Technologische Lösungen, die auf die Entfernung von Kunststoffabfällen in tieferen Wasserkompartimenten bzw. auf dem Gewässergrund abzielen, wie Tauchroboter, machen einen geringen Anteil aller Lösungen aus (Bellou et al. 2025, S. 71 f.). Auch wenn die entfernbare Plastikgröße nicht immer explizit angegeben wird (Hinzmann et al. 2025, S. 19 ff.), liegt der Fokus der meisten Technologien, die in Meeren, Häfen, Küstengebieten und Flüssen eingesetzt werden, auf der Entfernung von Makroabfällen (Bellou 2025, S. 63).

¹⁶ Z. B. <https://strandreinigung.de/> (30.6.2025)

¹⁷ Z. B. <https://www.probotica.hr/projects/seeker-cleaning-robot/> (1.7.2025)

Mobile Lösungen bringen mit Abstand die höchsten Investitions- wie auch Betriebs- und Wartungsausgaben mit sich. Zugleich haben sie die größten Aufnahmekapazitäten und können große Mengen an Makroplastik von der Wasseroberfläche entfernen (Brouwer et al. 2023, S. 5). Am effektivsten ist ihr Einsatz in der Nähe von Emissionsquellen an Küsten, Flussmündungen oder Häfen (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 27 u. 31 f.), da die Plastikkonzentrationen mit der Entfernung zur Küste abnehmen. In weiter entfernten Akkumulationszonen, den Müllstrudeln (Kap. 2.2), sind zwar teilweise auch höhere Konzentrationen anzutreffen, allerdings werden nur 2 % des Ozeanplastiks ins offene Meer transportiert und verbleibt an der Oberfläche. Ein erheblicher Anteil des dort gesammelten Abfalls zerkleinert sich, wird besiedelt und sinkt schließlich auf den Meeresboden (van Sebille et al. 2020)¹⁸. Außerdem stieg die Menge kleinerer – schwer entfernbarer – Plastikfragmente zwischen 2015 und 2022 im pazifischen Müllstrudel deutlich schneller als die Menge größerer schwimmender Objekte (Lebreton et al. 2024). Vor diesem Hintergrund kann durch den Einsatz von TEK nur ein sehr kleiner Bruchteil der Abfälle aus den Müllstrudeln entfernt werden. Entsprechend ist die Wirksamkeit von Aufräumaktionen im offenen Ozean insgesamt begrenzt und verursacht deutlich höhere Kosten als der Einsatz anderer Technologien (Hinzmann et al. 2025, S. 53; Royal Society 2024, S. 16). Außerdem steigt mit der Entfernung von der Emissionsquelle die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Abfälle durch die lange Verweilzeit im Wasser bereits zersetzt haben, was eine mechanische Entfernung maßgeblich erschwert (Leone et al. 2023, S. 107854).

Nebenwirkungen

TEK unterscheiden sich stark in ihrem Energiebedarf für den Betrieb der Technologien und mit Blick auf die genutzten Energiequellen. Alle mobilen TEK (z. B. Roboter, Boote, Schiffe, schwimmende Mülleimer) benötigen Energie für ihren Betrieb. Einige Technologien werden nach wie vor mit fossilen Energieträgern angetrieben (vor allem Boote und Schiffe) und verursachen entsprechend Treibhausgasemissionen. Einige Technologieanbieter integrieren allerdings erneuerbare Energien oder sind bestrebt, künftig eine Nutzung erneuerbarer Energien zu ermöglichen (Hinzmann et al. 2025, S. 32). Auf Grundlage der systematischen Datenerfassung durch Bellou (2025, S. 90 ff.) zeigt sich, dass diese Bestrebungen eher als erste positive Tendenzen in Richtung Nachhaltigkeit zu sehen sind. Die überwiegende Mehrheit der Herstellerangaben enthält entweder gar keine oder nur unspezifische Informationen zu Energiequellen, Energieverbrauch oder zu den ökologischen Risiken für Ökosysteme und Meereslebewesen.

Mobile Technologien ermöglichen es durch ihre geringen Fahrgeschwindigkeiten (großen) Fischen und Meeressäugtieren in den meisten Fällen auszuweichen (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 25, 28 f). Allerdings werden viele Lebewesen wie Algen, Seegras, Weichtiere und Quallen gefangen. Insbesondere solche mobilen Technologien, die mithilfe von Schleppnetzen Meeresabfälle sammeln, haben deutlich negative ökosystemare Auswirkungen. Lebewesen, die mit den Netzen in Berührung kommen, verfangen sich darin und sterben oft. Durch den langen Verbleib der Netze im Wasser beginnen ihre Körper zu verwesen oder sich zu zersetzen. 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)¹⁹. Beruhen die Technologien auf Saugtechnik, können Meereslebewesen in die Systeme eingezogen werden (Silva et al. 2021, S. 42). Wird das mechanische Fangen von Abfällen mit einer manuellen Sortierung kombiniert (Abb. 5.5), können Tiere wieder ins Wasser zurückgeführt werden. Es gibt jedoch noch keine Daten dazu wie hoch die Überlebensrate dieses Beifangs ist. Durch eine selektive manuelle Entnahme von Abfällen aus dem Wasser können die Auswirkungen auf Ökosysteme besonders gering gehalten werden (Bergmann et al. 2023).

Einsatzmöglichkeiten

In Flüssen entstehen an Flussbiegungen oder Brückenpfeilern häufig Ansammlungen von Plastikabfällen. Plastikmüllakkumulationszonen können mit mobilen Technologien, wie kleinen Müllsammelbooten mit Förderbandtechnik, gezielt aufgesucht werden, um den Müll einzusammeln. Grundsätzlich können Müllsammelboote effizient dort eingesetzt werden, wo hohe Konzentrationen an Makroplastik vorzufinden sind und so größere Mengen an Plastikmüll mit einem vertretbaren Zeit- und Energieaufwand eingesammelt werden können (dazu und zum

¹⁸ Hinzmann et al. (2025, S. 52) weisen darauf hin, dass diese Zahlen Schätzungen sind. Andere gehen davon aus, dass wesentlich mehr Plastik auf den Meeresgrund sinkt. Für das Mittelmeer wird z. B. geschätzt, dass 49 bis 63 % des Meeresmülls wieder an die Küsten gespült werden und 37 bis 51 % gesunken sind (Kaandorp et al. 2020).

¹⁹ Interview mit Prof. Dr. Rebecca Helm (Georgetown Universität, USA), durchgeführt vom Gutachterteam Hinzmann et al. (2025) am 29.11.2024.

Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 43 ff.). Gegebenenfalls kann ergänzend eine einfache schwimmende Barriere aufgebaut werden. Die Strömung des Flusses wird genutzt, um mit Hilfe der Barriere an der Oberfläche treibende Abfälle zu konzentrieren. Diese werden anschließend dem Förderband zugeführt. Zusätzlich können solche Interventionen durch Sammlungen im Uferbereich ergänzt werden. Der Einsatz solcher Technologien ist insbesondere für große, stark verschmutzte Flüsse relevant, die es derzeit vor allem in Ländern mit fehlenden oder unzureichendem Abfallmanagement gibt (z. B. in Südostasien, Afrika; Meijer et al. 2021). Die Kombination aus Barrieren und kleinen Booten mit Förderbandtechnik hat sich als sehr effizient erwiesen, beispielsweise in Indonesien auf der Insel Java (Abb. 5.5). In Deutschland 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 Kunststoffe und andere Materialien in die Fließgewässer gelangen. In solchen Fällen bietet sich auch hierzulande die Kombination von Müllsammelbooten mit Barrieren an, um einer weiteren Verteilung von Kunst- und anderen möglichen Schadstoffen stromabwärts entgegenzuwirken.

Abbildung 5.5 Einsatz einer schwimmenden festinstallierten Barriere in Kombination mit einem Müllsammelbot mit semipassivem Förderband in Jakarta



Quelle: One Earth – One Ocean e. V.

Fishing-for-Litter-Initiativen, bei welchen Fischerboote Säcke erhalten, um Plastik und Müll zu sammeln, der sich während der normalen Fischereitätigkeit in ihren Netzen angesammelt hat (Royal Society 2024, S. 14), können technologische Aktivitäten zur Entfernung von Plastik gut ergänzen (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 49). Anstatt Plastik und andere Abfälle, die sich 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. Über das KIMO-Programm „Fishing For Litter“ (FFL), ein Zusammenschluss von bisher 80 Kommunen in Europa, erhalten die teilnehmenden Fischereifahrzeuge ca. ein Kubikmeter große, strapazierfähige Säcke für die Sammlung der Abfälle. Sobald die Säcke voll sind, werden sie angelandet und zu ausgewiesenen FFL-Behältern im Hafen gebracht. Von dort werden sie zur Entsorgung mitgenommen und ggf. sortiert, gewogen, erfasst und recycelt (Wyles et al. 2019). Diese Methode erfordert nur eine minimale Änderung der Fangroutinen, ist daher äußerst kostengünstig²⁰ und verursacht keine zusätzlichen Energieverbräuche. Das FFL-System ist inzwischen eine international anerkannte Initiative (Wyles et al. 2019). In Deutschland wird es über EU- und Länderförderung finanziell unterstützt. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass auch Müll vom Meeresboden

²⁰ <https://www.fishingforlitter.org/> (27.1.2025)

erfasst wird, wenn Grundschieppnetze zum Einsatz kommen. In Deutschland sind derzeit 170 Schiffe und 18 Häfen an Nord- und Ostsee beteiligt.²¹ Durch die Nutzung ihrer Anwesenheit auf See wird das vorhandene Arbeitskräftepotenzial ausgeschöpft, anstatt separate Fahrten zu finanzieren, die einen zusätzlichen ökologischen Fußabdruck auch im Sinne von Beifang und Zerstörung von Habitaten zu Folge hätten.

Die gezielte *Identifikation verlorener Geisternetze und -leinen* ist angesichts ihrer besonders großen negativen Auswirkungen im Meer zentral, um die Seeschifffahrt sicherer zu machen und Schäden für die Meeresumwelt zu verringern (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 48). Einen Ansatz zur Bergung von Geisternetzen verfolgt z. B. das Ocean Voyages Institute (OVI), eine gemeinnützige Organisation mit Hauptsitz in San Francisco, USA. Das OVI beteiligt sich an Clean-up-Aktionen, bei denen Plastikmüll, insbesondere Geisternetze und -leinen, also verlorenes Fischfanggerät, aus dem Wasser geholt werden. Zur Müllbeseitigung verzichtet die Organisation auf eigene Technologien und greift stattdessen auf bewährte Satelliten- und Drohnentechnologien sowie Informationen der Schifffahrtsgemeinschaft zurück. Forschungsschiffe, kommerzielle Schiffe (Handel, Fischerei) und Segler/innen melden Sichtungen von Geisternetzen und anderen Müllansammlungen an das OVI. Außerdem können Schiffe, die größere Treibnetze sichten, einen vom OVI zur Verfügung gestellten GPS-Tracker an ihnen befestigen. Die Tracker geben wertvolle Hinweise auf potenzielle Plastikakkumulationszonen, also Meeresstellen, in denen Plastikmüll in hoher Konzentration vorgefunden wird. Die getrackten Teile werden anschließend vom OVI-Team mit einem Segelschiff eingesammelt. 2019 wurden dank der GPS-Tracker 40 t Müll aus dem Meer geholt (dazu Mejia-Muñoz (2019).

Eine andere Option, um den Verlust von Fanggeräten zu reduzieren, stellen *Systeme zur Kennzeichnung von Fanggeräten* zusammen mit Anreizen für eine adäquate Entsorgung bzw. Verwertung dar (Bergmann et al. 2023). Entsprechende Programme gibt es bereits beispielsweise in Norwegen und Island. Sie sollen dazu beitragen, solche Praktiken zu institutionalisieren. Langfristig könnte die Verwendung vollständig biologisch abbaubarer Materialien für Netze sowie ein Verbot von besonders kurzlebigen Komponenten, wie an Grundnetzen angebrachte und meist aus Kunststoff bestehenden Schutzfäden, um diese vor Abrieb am Meeresboden zu schützen, zur Zielerreichung beitragen (Mejia-Muñoz 2019).

5.4 Fazit und übergreifende Erwägungen

Technologien zur Entfernung von Kunststoffabfällen aus aquatischen Ökosystemen weisen eine hohe Heterogenität auf und eignen sich für unterschiedliche Umweltkompartimente. Präventionstechnologien setzen gezielt an punktuellen Emissionsquellen an, während Reinigungstechnologien Verschmutzungen aus diffusen Quellen entgegenwirken sollen. Einige sind eher für hochkonzentrierte Akkumulationszonen ausgelegt oder zum Auffangen von Kunststoffabfällen an strategisch wichtigen Zuflussorten, während andere auf die Reinigung größerer Flächen abzielen. Auch zielen die Lösungen auf unterschiedliche Umweltkompartimente ab. Einige Technologien sind eher für den Einsatz an der Oberfläche konzipiert, andere zielen auf die Entfernung von Plastik aus der Wassersäule, und einige wenige suchen gezielt nach Abfällen am Gewässergrund, wo sich Plastik anreichert (Bellou 2025, S. 8 f.). Außerdem unterscheiden sie sich in der Größe der entfernbaren Plastikpartikel. Auch wenn einzelne Technologien Plastik in unterschiedlichen Größen entfernen können, zeigen sich Unterschiede in der Effizienz je nach Partikelgröße. Die in Studien ermittelten Effizienzwerte beziehen sich zudem oft nur auf spezifische Partikelgrößen (z. B. Mikroplastik > 10 µm) oder einzelne Umweltkompartimente (z. B. Wasseroberfläche). Außerdem sind die Angaben zum möglichen Beitrag bei der Plastikentfernung ungenau, da sich die angegebenen Mengen auf Abfälle aller Arten, gezielt nur auf Plastikabfälle oder auf das insgesamt gesammelte Material (inklusive organisches Material) beziehen können (Hinzmann et al. 2025, S. 29 ff.).

Technologien sind dann besonders effektiv, wenn sie mit Blick auf Tiefe, Breite, Durchflussmenge, Saisonalität, Verschmutzungsgrad am Einsatzort ausgewählt und angepasst werden (Silva et al. 2021, S. 6). Auch die Anpassung an lokale Bedingungen, wie Schiffsverkehr und Vorgaben des Artenschutzes, ist entscheidend für den Erfolg (Hinzmann et al. 2025, S. 54). Diese hohe Kontextabhängigkeit erschwert jedoch den direkten Vergleich der Wirksamkeit und möglicher Nebenwirkungen zwischen verschiedenen Technologien (Bellou 2025, S. 107). Insgesamt ist die Wirksamkeit von Reinigungstechnologien nur sehr begrenzt erforscht, mit teilweise widersprüchlichen Ergebnissen (Griffin et al. 2024). Sowohl Bellou (2025) als auch Hinzmann et al. (2025) problematisieren die großen Wissenslücken bzw. die fehlende Dokumentation von Wirkungen und Nebenwirkungen.

²¹ <https://fishingforlitter.org/germany/> (27.1.2025)

Generell lässt sich feststellen, dass nur sehr wenige Technologien in der Lage sind, Mikroplastik aus Gewässern zu entfernen. Während stationäre Lösungen, wie Gitter, Netze und Müllräder, vergleichsweise hohe Rückhaltequoten für Makroplastik aufweisen und besonders in urbanen Gebieten und an Akkumulationszonen mit hoher Belastung effektiv sind (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 54 ff.), weisen mobile Technologien eine hohe Flexibilität auf und sind besonders geeignet, um akute Belastungen nach Hochwasserereignissen oder in stark verschmutzten Gebieten zu bewältigen. Der Einsatz dieser Technologien in Flüssen und Küstenregionen bietet das Potenzial, den Eintrag von Plastik in den Ozean signifikant zu reduzieren. Sowohl stationäre als auch mobile Technologien sind allerdings insbesondere für durch Makroplastik stark verschmutzte Gewässer geeignet. In Flüssen mit einer relativ geringen Verschmutzung durch Makroplastik können diese Technologien daher keine große Wirkung entfalten. Viel effektiver können dann Filtersysteme aus der Abwassertechnik sowie Regenrückhaltebecken und nachgeschaltete Filtersysteme Einleitungen von Mikroplastik in Gewässer und so auch in die Meere reduzieren. Zusätzliche Vorteile von stationären Technologien, die in Häfen und in touristischen Gegenden eingesetzt werden, sind, dass sie zum Zweck der Umweltbewusstseinsbildung und zur Sammlung von Daten über die Plastikverschmutzung der Gewässer genutzt werden können.

Problematisch sind die Auswirkungen einiger Technologien auf Meereslebewesen und ihre Habitate. Während Technologien, die in Mischwasserentlastungsanlagen, Regenrückhaltebecken oder Kläranlagen eingesetzt werden, sehr gezielt Stoffe aus dem aquatischen Medium entfernen können und durch ihre vorgelagerte Platzierung keine direkten Auswirkungen auf Ökosysteme haben, können sich Technologien zur Entfernung von Kunststoffen aus Gewässern unbeabsichtigt negativ auf die dortigen Ökosysteme auswirken. Hinzmann et al. (2025, S. 27 ff.) fassen die häufigsten ökologischen Risiken auf Grundlage von Bergmann et al. (2023), Falk-Andersson et al. (2020, 2023) und Leone et al. (2022) wie folgt zusammen:

- *Entfernung von organischem Material:* Algen, Mangroven, Seegras oder an der Oberfläche treibende und haftende Lebewesen und Mikroorganismen werden durch die TEK unbeabsichtigt gefangen und/oder aus dem Wasser geholt. Dies kann zentrale Habitate im Wasser und das Gleichgewicht der Nahrungsnetze erheblich stören. Die Entnahme von Algen, die als Beifang aus dem Ökosystem unbeabsichtigt entnommen werden, führt zu einer Lücke im Nahrungssystem und verringert zudem die CO₂-Bindung.
- *Beifang:* Auch Fische oder andere tierische Wasserlebewesen werden durch die TEK unbeabsichtigt gefangen und/oder aus dem Wasser geholt und Biomasse aus der Nahrungskette entfernt. Dies ist besonders bedrohlich für in ihrem Bestand bereits stark dezimierte und bedrohte aquatische Arten. Vor dem Hintergrund des beschleunigten Artensterbens ist der Schutz bedrohter Arten durch den Einsatz zusätzlicher neuer Technologien besonders wichtig.
- *Zerstörung von Lebensräumen:* Korallenriffe am Meeresboden oder Algenmatten an der Wasseroberfläche oder in der Wassersäule können durch den Einsatz von TEK zerstört werden.

Während die Entfernung von organischem Material sowohl durch stationäre als auch mobile Technologien für die Reinigung von Gewässern erfolgen kann, ist das Problem des Beifangs und der Zerstörung von Lebensräumen vor allem bei mobilen Technologien stark ausgeprägt. Hinzmann et al. (2025, S. 27 ff.) weisen darauf hin, dass sich sowohl (Mikro-)Plastik als auch aquatisches Leben aufgrund z. B. bestimmter Strömungen teilweise in denselben Zonen akkumulieren, z. B. an der Küste von Hawaii. So befinden sich fast 100 % der größeren Fischlarven und über 95 % des schwimmenden Plastikmülls in den ruhigeren Zonen des Oberflächenabflusses. Dies macht die selektive Entfernung von Plastik sehr schwierig (Whitney et al. 2021). Hinzu kommen Störungen, die durch die Technologien verursacht werden, wie Unterwasserlärm.

Neben der Wirksamkeit bei der Entfernung des Plastiks, den negativen Wirkungen auf Meereslebewesen und den verursachten Treibhausgasemissionen wirkt sich auch die Verwertung der eingesammelten Kunststoffabfälle auf die Ökobilanz aus (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 33 ff. u. 51 ff.):

- *Repariert und wiederverwendet werden können vor allem große Müllteile.* Schätzungsweise gehen jährlich auf globaler Ebene Fischfanggeräte im Umfang von mindestens 640.000 t verloren oder werden im Meer entsorgt (Wasave et al. 2025). Fischernetze, -leinen (Charter/Carruthers 2022) und andere Fischfanggeräte sind größtenteils aus langlebigen, synthetischen Materialien hergestellt und stellen gerade wegen ihrer hohen Belastbarkeit, Reißfestigkeit und Haltbarkeit ein ökologisches Problem dar (Do/Armstrong 2023; Wasave et al. 2025). Allerdings sind Potenziale eher für ausgemusterte Fischernetze vorhanden als für Netze, die im Meer treiben oder auf dem Meeresboden liegen. Denn die Qualität von Fischereiausrüstung ist aufgrund ihrer langen Verweildauer im Meer oft schlecht und Reparaturen kaum möglich (Bertling/Nühlen 2019).

- *Recycelt werden können zurückgeholte Abfälle in der Regel kaum.* Ein mechanisches Recycling von Kunststoffabfällen aus Gewässern und Abwasser ist zwar technisch möglich, dennoch kostenintensiv. Denn Kunststoffabfälle, die lange Zeit im Wasser blieben, weisen eine schlechte Qualität auf und müssen zunächst eine umfangreiche Sortierung und intensive Reinigung durchlaufen. Sie sind mit Sand und Schlamm vermischt, oftmals von Organismen (Muscheln, Seepocken, Algen etc.) besiedelt (Ronkay et al. 2021; Schneider et al. 2018) und können durch Wetter- und Umwelteinflüsse stark verwittert sein (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 Recyclinganlagen beschädigen (Wyles et al. 2019). Auch das Recycling von verllorener Fischereiausrüstung erfordert einen mehrstufigen, kostenintensiven Aufbereitungsprozess, der zwar wünschenswert, aber in der Praxis kaum realisierbar ist (Bertling/Nühlen 2019). Plastik aus Abwässern ist aufgrund von Verunreinigungen aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht ebenfalls nicht sinnvoll zu recyceln (Malinović et al. 2022; Okoye et al. 2022). Auch mit Depolymerisation, oder anderen thermochemischen Recyclingverfahren, wie Pyrolyse oder Vergasung, können zwar im Labor hohe Reinheitsgrade erzielt werden. Allerdings sind diese Verfahren noch deutlich teurer als mechanische Recyclingverfahren und sie erfordern einen sehr hohen Energieeinsatz (Hinzmann et al. 2025, S. 37).
- *Die energetische Verwertung stellt für die meisten Abfälle einen geeigneten Verwertungspfad dar, auch wenn dadurch Treibhausgasemissionen entstehen.* In Baltimore können aus jeder Tonne Müll, der mithilfe der Technologie aus dem Wasser entfernt und einer Verwertungsanlage übergeben wird, durchschnittlich 500 kWh Strom erzeugt werden. Das entspricht in etwa dem durchschnittlichen Tagesbedarf an Strom von 16,5 Haushalten in den Vereinigten Staaten.²²

Zwar werden aus Meeresplastik und insbesondere aus alter Fischereiausrüstung Produkte hergestellt (Charter/Carruthers 2022). Dazu zählen Schmuck und Schuhe, die in Entwicklungsländern in Kooperationen mit Nichtregierungsorganisation verarbeitet werden (Glavee-Geo et al. 2023). Allerdings sind über die meisten Produkte kaum Informationen zu den Materialien oder dem Anteil an Meeresplastik vorhanden (Charter/Carruthers 2022). Vor diesem Hintergrund können die Herstellung von Produkten aus recycelten Meeresabfällen oder auch die Wiederverwendung von Meeresabfällen zu künstlerischen Zwecken zwar Menschen für das Problem der Plastikverschmutzung sensibilisieren. Allerdings stellen sie zum aktuellen Zeitpunkt keine skalierbaren Verwertungspfade dar.

Wichtig ist vor allem, dass eine Deponierung oder Lagerung der Abfälle nicht dazu führt, dass sie wieder wesentlich zurück in die Umwelt gelangen bzw. Schadstoffe in Böden, das Grundwasser oder die Luft abgeben (Schneider et al. 2023). In vielen Regionen der Erde können Kunststoffabfälle, die aus Gewässern zurückgeholt werden, nur deponiert werden (Falk-Andersson et al. 2023). Dafür sollen die vorgesehenen Müllhalden hohe Umweltstandards erfüllen. Insbesondere dürfen keine Chemikalien in angrenzende Gewässer oder in den Boden austreten (Falk-Andersson et al. 2023, S. 13308). Sofern keine geeigneten Infrastrukturen für eine Verwertung vorhanden sind, ist die Deponierung einer Müllverbrennung an offenen Feuern vorzuziehen. Denn bei einer Müllverbrennung an offenen Feuern werden Schadstoffe und giftige Dämpfe ungefiltert in die Atmosphäre entlassen und stellen zudem ein Gesundheitsrisiko dar (Cottom et al. 2024).

Eines der Hauptprobleme besteht allerdings darin, dass es in vielen Erdregionen bisher keine ausreichenden Infrastrukturen gibt, um Kunststoffabfälle fachgerecht zu behandeln (Winterstetter et al. 2021) oder zu deponieren (EIA/Ocean Care 2023). Lange Transportwege hin zu Orten, an denen die erforderlichen Infrastrukturen verfügbar sind, sind wiederum mit hohen Kosten²³ und weiteren negativen Umwelteffekten, wie Emissionen und Unterwasserlärm durch Schiffe,²⁴ verbunden. Außerdem reichen die Kapazitäten – auch in Industrieländern – für die Mengen, die jährlich in Gewässer eingetragen werden, bei Weitem nicht aus (Hinzmann 2025, S. 33 ff.).

²² Angaben durch Hinzmann et al. (2025) entnommen aus dem Trash Wheel Collection Data Sheet, frei zugänglich unter <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1b8Lbe-z3PNb3H8nSsSjrwK2B0ReAblL2/edit?gid=1414297924#gid=1414297924> (15.1.2026).

²³ Interview mit Prof. Dr. Martin Wittmaier (Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft an der Hochschule Bremen GmbH), durchgeführt von Hinzmann et al. (2025) am 16.12.2024.

²⁴ Interview mit Prof. Dr. Rebecca Helm (Georgetown Universität, USA), durchgeführt von Hinzmann et al. (2025) am 29.11.2024.

6 Geltender regulatorischer Rahmen und Aktivitäten gegen Meeresmüll

- Emissionen von Kunststoffen werden in der EU umfangreich reguliert. In den letzten Jahren lag der Fokus neuer Regulierungen verstärkt auf der Vermeidung von Littering und von Mikroplastikemissionen. Reinigungstechnologien sind bisher kaum Gegenstand von Regulierung oder Normierung gewesen.
- Um die grenzüberschreitenden Auswirkungen der Verschmutzung durch Plastik zu reduzieren, fördert Deutschland internationale Projekte gegen Meeresmüll und für saubere Meere insgesamt.
- Im Rahmen der internationalen Verhandlungen über ein Abkommen zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung werden internationale Reinigungsmaßnahmen diskutiert. Finale Entscheidungen darüber und über einen finanziellen Rahmen stehen noch aus.

Die Bekämpfung der Verschmutzung von Meeren und Gewässern durch Kunststoffe wird durch mehrere europäische Richtlinien und Verordnungen geregelt, die auf unterschiedliche Stufen der Wertschöpfungskette von Produkten und Abfällen abzielen, auf unterschiedliche Wirtschaftssektoren, die Meeresabfälle verursachen (z. B. Schifffahrt und Fischerei), sowie auf verschiedene Umweltkompartimente, die durch Plastikabfälle verschmutzt werden können (z. B. Süßwasserressourcen, Meere) (Veiga et al. 2022, S. 29). Abbildung 6.1 illustriert die Anwendungsbereiche der wichtigsten EU-Regularien. Zu den Regulierungen, die auf landbasierte Einträge abzielen, gehören Vorschriften für Kläranlagen, Regenwasserableitungen und Mülldeponien, die vielfach in nationalen Regulierungen und Standards konkretisiert wurden. Zu den Regulierungen, die auf meeresbasierte Einträge abzielen, zählen Anforderungen an die Einleitung von Schiffsabfällen oder auch Bestimmungen zur Bergung von verloren gegangenen Fanggerät. Zusätzlich zu den schon länger bestehenden Regulierungen, die in Abbildung 6.1 zu sehen sind, kommen die kürzlich beschlossenen neuen Anforderungen an Wirtschaftsakteure und Transportunternehmen, Verluste von Kunststoffpellets zu vermeiden und zu verringern (EK 2025c). Eine tabellarische Beschreibung der relevantesten Regularien ist im Kapitel 9.1 zu finden.

Zum Schutz von Küsten, Meeren und dem Ozean bildet die Richtlinie 2008/56/EG (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie)²⁵ das wichtigste Instrument der EU. Die Richtlinie verpflichtet die Mitgliedstaaten dazu, die Belastung der Meeresgebiete durch Meeresmüll zu überwachen und nationale Meeresstrategien zu entwickeln, um einen „guten Umweltzustand“ beizubehalten bzw. zu erreichen. Nationale Strategien umfassen regelmäßige Bewertungen des Zustandes der Meeresumwelt, die Festlegung von Zielen und Vorgaben und die Einführung von Maßnahmen zur Verbesserung ihres Zustands (EK 2024a). Außerdem sollen Quellen und Eintragspfade von Meeresmüll identifiziert und quantifiziert sowie negative Auswirkungen auf Meereslebewesen dokumentiert werden. Konkretisiert werden die Vorgaben der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie für das Monitoring in einem Beschluss der Europäischen Kommission²⁶. Außerdem werden auf EU-Ebene fortlaufend quantitative Schwellenwerte für die Operationalisierung der Kriterien für den guten Umweltzustand festgelegt (Bundesregierung 2023, S. 10). 2021 legte die Europäische Kommission mit dem Aktionsplan „Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden“ einen Rahmen und Reduktionsziele für die Verschmutzung von Wasser, Böden und Luft fest. Darin wird eine Reduzierung von Kunststoffabfällen im Meer um 50 % und eine Reduzierung des in die Umwelt freigesetzten Mikroplastiks um 30 % bis 2030 angestrebt (EK 2021). Kürzlich hat die Europäische Kommission einen Europäischen Pakt für die Meere vorgelegt (EK 2025b). Dort ist die Stärkung finanzieller Unterstützung unter anderem zur Beschleunigung der Einführung neuer Technologien sowie der Kapazitäten für die Meeresbeobachtung vorgesehen. Außerdem soll ein europäisches Netzwerk von Teststandorten für Meerestechnologien eingerichtet werden, um die Innovation und den Einsatz wichtiger Meerestechnologien zu beschleunigen (EK 2025b). Die Kommission wird außerdem im Rahmen der Europäischen Wasserresilienzstrategie die Bekämpfung von landbasierten Verschmutzungsquellen stärken (EK 2025a).

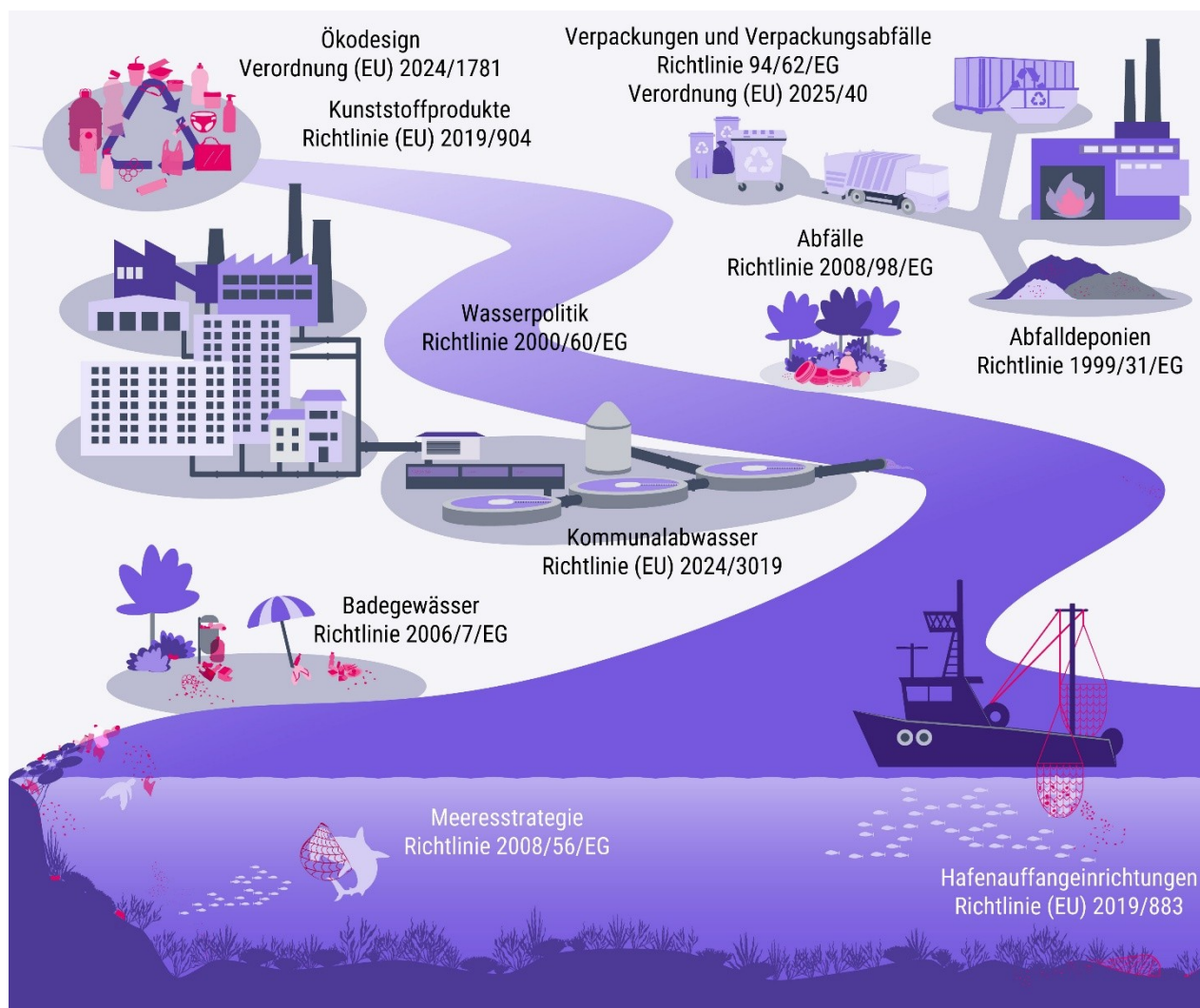
Maßgeblich für den Schutz der deutschen Meere sind außerdem supranationale regionale Vereinbarungen. Für den Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks ist das OSPAR-Übereinkommen, an dem Deutschland mit weiteren 14 Staaten Mitglied ist, maßgeblich. Die Vertragsparteien haben sich dazu verpflichtet, vorbeugende Maßnahmen zu ergreifen, sobald hinreichender Grund zur Annahme besteht, dass durch Einträge von Stoffen

²⁵ Richtlinie 2008/56/EG vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie)

²⁶ Beschluss (EU) 2017/848 der Kommission vom 17. Mai 2017 zur Festlegung der Kriterien und methodischen Standards für die Beschreibung eines guten Umweltzustands von Meeresgewässern und von Spezifikationen und standardisierten Verfahren für die Überwachung und Bewertung sowie zur Aufhebung des Beschlusses 2010/477/EU

oder Energie Gefährdungen für die menschliche Gesundheit, lebende Ressourcen oder Meeresökosysteme entstehen oder rechtmäßige Nutzungsmöglichkeiten der Meere (z. B. Erholung) beeinträchtigt werden. Zum Schutz der Meeresumwelt im Ostseeraum bildet das Übereinkommen von Helsinki zum Schutz der Ostsee (Helsinki-Übereinkommen), das von allen Anrainerstaaten der Ostsee unterzeichnet wurde, den zentralen Rahmen. Es verpflichtet die Vertragsparteien, im gesamten Einzugsgebiet der Ostsee Maßnahmen zur Verringerung der landseitigen Verschmutzung zu ergreifen (EK 2024a). Die Vertragsparteien werden dazu angehalten, den Vorsorge- und Verursacherprinzipien zu folgen, die beste verfügbare Technik einzusetzen und die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse und Managementansätze zu berücksichtigen. Regionale Aktionspläne konkretisieren die Ziele beider Übereinkommen.

Abbildung 6.1 Relevante europäische Richtlinien sowie Verordnungen und von ihnen erfasste Bereiche



Eigene Darstellung; siehe auch Tabelle 9.1

Die Mitgliedstaaten beider Abkommen entsenden außerdem Delegierte zur Technischen Gruppe für Meeresmüll (Technical Group on Marine Litter – TGML). Die TGML wurde auf Antrag der EU-Mitgliedstaaten zur Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie eingerichtet. Sie stellt die Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik dar und sorgt für einen guten Informationsaustausch zwischen Expert/innen und Politiker/innen. Sie erarbeitet und stellt den Mitgliedstaaten technische Empfehlungen zur Umsetzung der Anforderungen der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (z. B. Überwachungsprotokolle für Meeresmüll) zur Verfügung (EK 2024b). So wurden 2024 Leitlinien veröffentlicht, die darauf abzielen, einen gemeinsamen Rahmen für Probenahme, Analyse und Erfassung von Meeresmüll zu schaffen, um die Daten länderübergreifend vergleichbar und nutzbar zu machen.

(JRC 2023). Die Plattform EMODnet stellt aktuell die wichtigste Datenbank für Meeresmülldaten in Europa dar. Dort werden unter anderem die Daten, die im Zuge der Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie durch die Mitgliedstaaten erhoben werden, eingespeist (EK 2024c).

Zur Unterstützung der Umsetzung von nationalen Maßnahmen gegen Meeresmüll wurde der Runde Tisch Meeresmüll²⁷ etabliert. An dem runden Tisch nehmen rund 130 Expert/innen teil. Dazu gehören Vertreterinnen und Vertreter aus Wirtschaftsbereichen, die bedeutsame Emissionen verursachen, Umweltverbände, staatliche Behörden, Wissenschaftler/innen und Politiker/innen. In den Aktionsfeldern sind sowohl Maßnahmen vorgesehen, die zur weiteren Reduzierung der Einträge beitragen sollen, als auch solche, die auf eine Reduzierung des bereits vorhandenen Mülls im Meer abzielen (Runder Tisch Meeresmüll o.J.a). Außerdem sollen umweltfreundliche Methoden bzw. Handlungsanweisungen für zukünftige Reinigungsaktivitäten entwickelt und die regelmäßige Reinigung von besonders betroffenen Gebieten (Hotspots) sichergestellt werden (Runder Tisch Meeresmüll o.J.c). Für die Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie im deutschen Teil der Nord- und Ostsee ist der Bund/Länder-Ausschuss für die Nord- und Ostsee (BLANO) zuständig. Im Rahmen der BLANO-Facharbeitsgruppe „Abfälle im Meer“ arbeiten Expert/innen daran, die Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie zu unterstützen und fachlich zu begleiten, von der Bewertung des aktuellen Umweltzustands bis hin zur Erarbeitung und Umsetzung eines Nationalen Maßnahmenprogramms.

Für das Monitoring der Häufigkeiten und Zusammensetzungen von Kunststoffeinträgen in Nord- und Ostsee werden Indikatoren und Grenzwerte auf EU-Ebene festgelegt und genutzt, die gleichzeitig im Kontext der OSPAR- und Helsinki-Übereinkommen genutzt werden (Bundesregierung 2023, S. 17). Um etwaige noch vorhandene Lücken zu schließen und langfristig den Monitoringvorgaben zu Meeresabfällen der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie zu entsprechen, wurden in drei Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Umweltbundesamtes neue Monitoringansätze entwickelt und erprobt, unter anderem für das Strandmonitoring von Meso- und großem Mikromüll, Fernerkundungsmethoden für treibenden Meeresmüll, das Monitoring von verlorener Fischereiausrüstung sowie zur Beobachtung des Vorkommens von Mikroplastik in Meeressäugern, Vögeln und Fischen (Bundesregierung 2023, S. 17).

Seit 2018 setzt Deutschland einen Schwerpunkt auf die Unterstützung von Entwicklungs- und Schwellenländern in ihren Bemühungen, Meeresmüll zu vermeiden und geeignete Abfallsammel- und Recyclingsysteme einzurichten. So wurde 2019 das Förderprogramm gegen Meeresmüll „Marine Debris Framework – Regional Hubs around the Globe“ (Marine:DeFRAG) ins Leben gerufen, um Projekte zu fördern, die darauf abzielen, Abfall direkt an der Quelle zu vermeiden und so den Eintrag von Kunststoffabfällen in die Ozeane zu reduzieren. Die Förderrichtlinie für das Förderprogramm gegen Meeresmüll (BMU 2021) sieht vor, dass Maßnahmen vorrangig dort ansetzen, wo die Eintragsmengen in die Weltmeere oder die größten Umweltentlastungspotenziale bei der Entsorgung von Müll bestehen. Sie legt den Fokus auf Projekte zu Technologiekooperation und Investitionen sowie zur Implementierung von politischen Maßnahmen und Strategien in Partnerländern, die zum Empfang von Entwicklungshilfe berechtigt sind. Die Projekte sollen unterstützende Politikberatung bieten sowie Wissenstransfer und Kapazitätsaufbau betreiben. Im Fokus steht vorrangig die Vermeidung landseitiger Einträge von Meeresmüll, insbesondere von Kunststoffen²⁸. Die GIZ unterstützt das Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit bei der Umsetzung des Marine:DeFRAG und arbeitet mit lokalen regionalen und nationalen Akteuren zusammen, um Pilotprojekte zur Bekämpfung von Meeresabfällen umzusetzen, und fördert den Austausch von Wissen und Erfahrungen (GIZ 2022, S. 2).

Auch die internationale Gemeinschaft engagiert sich zunehmend im Kampf gegen Plastikmüll. So wurde 2022 auf der fünften Umweltversammlung der Vereinten Nationen (UNEA 5.2) beschlossen, ein rechtsverbindliches Abkommen zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung auszuarbeiten. Der Textvorschlag des Vorsitzenden, welcher das Ergebnis zahlreicher thematischer Beratungen ist und als Ausgangspunkt für die weiteren Verhandlungen dienen soll, sieht in Artikel 8 vor, dass sich die Vertragsparteien dazu verpflichten, an Orten, die von einer Akkumulation von Abfällen besonders betroffen sind, geeignete umweltgerechte Beseitigungs- und Reinigungsmaßnahmen zu ergreifen. Außerdem wurden Verpflichtungen der Vertragsparteien im Hinblick auf die Entwicklung, den Transfer und die Verbreitung von umweltverträglichen Technologien zur Bekämpfung von Meeresmüll diskutiert (Vayas Valdivieso 2025).

²⁷ <https://www.muell-im-meer.de/de/ueberuns-rundertisch> (16.12.2024)

²⁸ <https://www.bmuv.de/programm/foerderprogramm-gegen-meeresmuell> (9.5.2025)

7 Handlungsoptionen

- Emissionen von Abfällen zu verhindern, ist kosteneffektiver, als sie aus der Umwelt zu entfernen. In Deutschland könnten besonders belastete Kläranlagen, Straßenabflüsse im Trennsystem und Mischwasserentlastungsanlagen technologisch nachgerüstet werden.
- Wenn Kunststoffemissionen nicht vermeidbar sind, trägt das Auffangen in der Nähe der Emissionsquellen zur Reduktion von wirtschaftlichen und ökologischen Kosten bei. Bei der Auswahl sind der naturschutzfachliche und der gesellschaftliche Wert der betroffenen Akkumulationszonen sowie die zu erwartenden Nebenwirkungen zu berücksichtigen.
- Um Entscheidungsträger/innen bei Investitionsentscheidungen zu unterstützen, wäre die Einführung von Evaluierungspflichten bei der Entwicklung von Reinigungstechnologien, unter Verwendung von noch zu entwickelnden Standards für die Dokumentation vor und während des Einsatzes, ein wichtiger Schritt.
- Es wäre zu prüfen, ob die laufenden Fördermaßnahmen für internationale Projekte zur Bekämpfung von Meeresmüll den Technologietransfer zu Reinigungstechnologien ausreichend abdecken.
- Deutschland könnte sich im Rahmen der internationalen Verhandlungen über ein Abkommen zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung weiterhin für einen internationalen finanziellen Mechanismus einsetzen und die Förderbedingungen für Projekte mitgestalten.

7.1 Prävention priorisieren

Die Vermeidung von Kunststoffeinträgen in die Umwelt ist der Entfernung aus aquatischen Ökosystemen sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht grundsätzlich vorzuziehen. Eine übermäßige Konzentration auf Reinigungsmaßnahmen könnte von systemischen Lösungen ablenken, die auf eine Minimierung des Kunststoffverbrauchs abzielen, einschließlich Investitionen in umweltfreundlichere und nachhaltigere Alternativen sowie Bemühungen, zu einer Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe überzugehen (Hinzmann et al. 2025, S. 51 ff.; Royal Society 2024, S. 6).

Hinzu kommt, dass größere Abfallteile zwar mengenmäßig punktuell dominieren können, der immer noch große Rest der Kunststoffverschmutzung in der Umwelt aber aus Mikro- und Nanoplastik besteht, das sich im Meer kaum identifizieren und entfernen lässt (Hinzmann et al. 2025, S. 51 ff.). Zu den zentralen Maßnahmen gehören beispielsweise die Eindämmung von Einwegartikeln, die Stärkung von Wiederverwendung und Reparatur oder die Reduktion von Mikroplastikemissionen. Dabei wären Maßnahmen sinnvoll, die eine Internalisierung externer Kosten zur Verbesserung der Gewässerqualität gemäß dem Verursacherprinzip ermöglichen (EFI 2025, S. 114). So könnten beispielsweise auch spezifische Anforderungen an die chemische Zusammensetzung von Reifen, an Fahrgeschwindigkeit, Fahrzeuggewicht und die Beschaffenheit von Straßen maßgeblich zur Minderung der Emissionen durch Reifenabrieb beitragen (Neupert et al. 2024). Auch durch Designvorgaben für Fischfanggeräte, die Reparaturen erleichtern, Pfandsysteme, die Anreize setzen für die Rückholung von Fischfanggeräten (Schneider et al. 2023), oder auch eine Stärkung des Trackings von Geisternetzen mittels GPS-Tracker (Hinzmann et al. 2025, S. 33 f. und 48 ff.) könnten Schäden durch Geisternetze reduziert werden.

Unvermeidbare Emissionen werden idealerweise frühzeitig „abgefangen“, um zu verhindern, dass sie ins Meer gelangen (Hohn et al. 2020). So ist beispielsweise die Verhinderung von Emissionen über Einleitungen in die Kanalisation eine wesentlich kostengünstigere Lösung als der Versuch, diese mit Reinigungstechnologien nachträglich aus Gewässern zu entfernen (Brouwer et al. 2023). In Deutschland stellt die Nachrüstung von Kläranlagen mit einer vierten Reinigungsstufe eine effektive Maßnahme zur Reduktion der Emissionen von Mikroplastik dar. Betreiber größerer Kläranlagen sind dazu bis 2045 verpflichtet. Im Jahr 2024 verfügten nach Angaben der Bundesregierung erst 55 der ca. 9.000 Kläranlagen über solche Technologien (EFI 2025, S. 111). Eine finanzielle Unterstützung von Kläranlagenbetreibern könnte die Nachrüstung in den kommenden Jahren beschleunigen. Hierfür ist die in der Kommunalabwasserrichtlinie vorgesehene Beteiligung der Pharma- und Kosmetikindustrie als Umsetzung des Verursacherprinzips ein entscheidendes Instrument. Darüber hinaus könnte eine Ausweitung der Kostenbeteiligung auf die Kunststoff- und Textilindustrie erwogen werden (Hinzmann et al. 2025, S. 40). Auch könnte die Möglichkeit einer Ausweitung auf kleinere Anlagen geprüft werden, denn nach einer Schätzung im Auftrag des Verbands kommunaler Unternehmen e. V. sind derzeit in Deutschland bis 2045 nur 7,2 % der Anlagen nachrüstpflichtig (EFI 2025, S. 111) und auch kleinere Kommunen können signifikante Mengen an Mikroplastik freisetzen, wenn ihre Abwässer unzureichend gereinigt werden (Magnusson et al. 2016).

Eine weitere wirksame Option zur Reduktion der Emissionen von (Mikro-)Plastik in Deutschland ist der Einbau von Regenrückhalte- und Sedimentationsbecken sowie von Filtern in der Kanalisation (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2025, S. 39). Aufgrund der insgesamt hohen Kosten einer breitflächigen Aufrüstung können jedoch kaum alle Straßenabflüsse im Trennsystem und auch nicht alle Mischwasserentlastungsanlagen nachgerüstet werden, sondern nur solche, die eine besonders hohe Kunststofffracht aufweisen. Mithilfe von Stoffstrommodellen könnten daher prioritäre Einleitungsstellen lokalisiert werden. Derzeit investieren zwar bereits viele Kommunen in Regenrückhalte- und Sedimentationsbecken, das Ziel der Reduzierung von Plastikeinträgen wird bei der Planung jedoch selten berücksichtigt. Hier wäre zu prüfen, ob auch dafür besondere finanzielle Anreize gesetzt werden können und ob durch die durch die Europäische Wasserresilienzstrategie (EK 2025a) vorgesehenen Maßnahmen geeignete Finanzierungsmöglichkeiten für Kommunen geschaffen werden.

7.2 Standortspezifische Reinigungsinterventionen bevorzugen

Obwohl die Vermeidung an der Quelle laut der Abfallhierarchie nach Artikel 4 der Richtlinie 2008/98/EG²⁹ immer Vorrang haben sollte, können gezielte Reinigungsmaßnahmen erforderlich sein, um zu verhindern, dass die Plastikverschmutzung wichtige Infrastrukturen beeinträchtigt (z. B. Verstopfung von Abflüssen), sich wirtschaftlich negativ auf touristische Orte auswirkt oder besonders schützenswerte Ökosysteme beschädigt (OECD 2022b, S. 33).

Generell gilt, dass Reinigungstechnologien am effizientesten eingesetzt werden, dort wo Kunststoffe in hoher Konzentration vorkommen (Hinzmann et al. 2025, S. 32). Zwar standen in den letzten Jahren Technologien zur Reduktion der Müllstrudel stark im Fokus der medialen Aufmerksamkeit. Angesichts des hohen Energieverbrauchs, der hohen Kosten und der bislang begrenzten Eignung verfügbarer Technologien zur Entfernung von Mikropartikeln gilt der Einsatz mobiler TEK auf hoher See jedoch bisher als am wenigsten effektiv. Daher wird von einem großflächigen Einsatz grundsätzlich abgeraten; stattdessen werden gezielte Interventionen an besonders stark belasteten Standorten empfohlen. Am effektivsten ist es auch im Meer, Makroplastik primär in der Nähe der Emissionsquellen zu entfernen, d. h. in Küstennähe, in Häfen oder an Flussmündungen, bevor sich die Abfälle im offenen Meer verteilen (Hinzmann et al. 2025, S. 28 ff. u. 51 ff.; Royal Society 2024, S. 14). Eine signifikante Reduzierung der Plastikabfälle im Meer könnte nur durch die Entfernung von Abfällen an Flüssen oder durch eine Kombination aus stationären Technologien in Flüssen und Häfen sowie mobilen TEK für gezielte Interventionen an Akkumulationsorten erreicht werden. Strandreinigungsaktionen können ergänzend zur Reinigung von Küstenzonen beitragen (Royal Society 2024, S. 17). Um Interventionen mit dem größten Nutzen-Kosten-Verhältnis zu identifizieren, bedarf es zuverlässiger Daten, die allerdings vielfach nicht vorhanden sind (UNDP 2024, S. 25).

Bei der Auswahl der Interventionsorte sollen nicht nur Kunststoffkonzentrationen berücksichtigt werden, sondern auch der natürliche und soziale Wert der betroffenen Akkumulationszonen, die Risiken, die mit dem Verbleib von Plastik in diesem Umfeld einhergehen, sowie die Machbarkeit und Wirksamkeit der jeweiligen Intervention. So ist beispielsweise Mikroplastik, das sich am Meeresboden oder in Sedimenten festgesetzt hat, besonders schwer oder gar nicht aus der Umwelt zu entfernen (Royal Society 2024, S. 25). Der Einsatz von Technologien sollte daher vorrangig in Gebieten erfolgen, in denen sowohl die Belastung durch Plastik als auch der potenzielle Nutzen durch den Schutz empfindlicher Ökosysteme hoch sind, während gleichzeitig das Risiko ökologischer Folgeschäden gering bleibt (Falk-Andersson et al. 2023, S. 13306). Vor diesem Hintergrund zeigt insbesondere die Integration der Bergung von Geisternetzen in reguläre Fischereiaktivitäten ein vorteilhaftes Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Um sicherzustellen, dass die Technologien dort eingesetzt werden, wo sie den größten Nutzen bringen, wäre eine internationale Zusammenarbeit bei der Identifizierung von Zielorten, beim Technologietransfer sowie bei der Finanzierung von Interventionen zielführend (Bellou 2025, S. 110 f.; Jambeck et al. 2015; Schmaltz et al. 2020, S. 106067). Grundsätzlich sind die Überwachung von Stoffflüssen und die Identifizierung von Akkumulationszonen eine Daueraufgabe, um künftige Präventions- und Reinigungsmaßnahmen planen zu können (Bellou 2025, S. 109; Leone et al. 2023; van Emmerik et al. 2020).

7.3 Standards und Leitlinien entwickeln

Zur Erfassung der Effizienz von TEK werden von Technologieanbietern und in der wissenschaftlichen Literatur verschiedene Indikatoren verwendet. Diese reichen beispielsweise von der Gesamtmenge an Kunststoffabfällen, die bisher mit einer bestimmten Technologie entfernt wurde, bis hin zur technisch bedingten maximalen Menge

²⁹ Richtlinie 2008/98/EG vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, zuletzt am 18.2.2024 geändert

an Kunststoffabfällen, die pro Tag oder pro Einsatz der TEK entfernt werden kann. Auf dieser Grundlage ist es schwierig, verschiedene TEK miteinander zu vergleichen und geeignete TEK für einen bestimmten Standort auszuwählen (Hinzmann et al. 2025, S. 29). Auch Bellou (2025, S. 92 u. 107) kommt zu diesem Ergebnis. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass die Verschmutzung durch Plastik nicht gleichmäßig über Raum und Zeit verteilt ist (Eriksen et al. 2023). Die Wirksamkeit von TEK wird durch den Verschmutzungsgrad der Gewässer am Einsatzort beeinflusst. Dieser wird jedoch bisher in Testprotokollen oder Standards selten berücksichtigt (Griffin et al. 2024).

Damit TEK in Zukunft effektiver zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung eingesetzt werden können, könnten Bewertungspflichten eingeführt und Nutzungsanforderungen definiert werden (Bellou 2025, S. 105 u. 108; Hinzmann et al. 2025, S. 29 ff. u. 56; Royal Society, 2024, S. 21). Dabei wären sowohl Standards zur Messung und Dokumentation der beabsichtigten Effekte im Hinblick auf die Entfernungsraten als auch im Hinblick auf die unbeabsichtigten Wirkungen auf die marinen Ökosysteme (z. B. Beifang von Lebewesen und organischem Material) zu entwickeln, wobei auch die Verwertung der Abfälle zu berücksichtigen wäre. Die Einführung von Bewertungspflichten unter Berücksichtigung noch zu entwickelnder Standards für die Dokumentation vor und während des Einsatzes würde eine wichtige Grundlage liefern, um künftige Investitionsentscheidungen zu untermauern (Bellou 2025, S. 107; Falk-Andersson 2023, S. 13306 ff.). Erste wissenschaftliche Ansätze zur Folgenabschätzung (Egger et al. 2025) könnten herangezogen werden, um Industriestandards für die Messung der Effizienz und der Auswirkungen auf die Meeresökosysteme zu entwickeln. Außerdem würde eine erhöhte Transparenz Anreize für die Hersteller schaffen, TEK so weiterzuentwickeln, dass Beifänge und andere negative ökologische Auswirkungen reduziert oder auch Treibhausgasemissionen minimiert werden. Die Dokumentation der Abfallverwertung würde außerdem Greenwashingpraktiken verhindern (GIZ 2024). Die von der EU im Pakt für Meere vorgesehene Einrichtung eines europäischen Netzwerks von Teststandorten für Meerestechnologien (EK 2025b) bietet für die Entwicklung solcher Standards den idealen Rahmen. Deutschland könnte dabei eine führende Rolle einnehmen.

Wichtig wäre außerdem, Leitlinien für den Einsatz von TEK zu entwickeln. Leitlinien und Anleitungen gibt es zwar für freiwillige Sammelaktionen. Sie beziehen sich jedoch nur punktuell auf technologische Ansätze (Stybel et al. 2022). Spezifische Leitlinien für den Einsatz von TEK könnten die Technische Gruppe für Meeresmüll zur Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie sowie der Runde Tisch Meeresmüll im Rahmen der Entwicklung von Handlungsanweisungen für zukünftige Reinigungen besonders betroffener Gebiete erarbeiten. In Zusammenarbeit mit den Helsinki- und OSPAR-Kommissionen wären solche Leitlinien dann für den Einsatz im Nordostatlantik und in der Ostsee zu spezifizieren. Auch für die internationale Zusammenarbeit mit Entwicklungsländern sollten solche Leitlinien entwickelt bzw. angepasst werden. Hier könnte die GIZ als beratende Instanz des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung und des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit auf ihre bisherigen Arbeiten zur Ausweitung der Reinigung und Verringerung des Abfallaufkommens im Rahmen der Durchführung von Projekten der Entwicklungszusammenarbeit aufbauen (GIZ 2023, S. S. 58 u. 60 f.) und Hinweise für den Technologietransfer in besonders von Makroabfällen betroffene Regionen formulieren.

7.4 Internationale Kooperationen und Finanzierungsinstrumente ausbauen

In der Resolution 2/11 der Umweltversammlung der Vereinten Nationen (UNEA 2016) zu Plastikmüll und Mikroplastik im Meer werden die Mitgliedstaaten dazu eingeladen, auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene zusammenzuarbeiten, um Hotspots zu reinigen. Die Umweltversammlung erkennt außerdem die Notwendigkeit, umweltverträgliche Systeme und Methoden für die Beseitigung und ordnungsgemäße Entsorgung von Meeresabfällen zu entwickeln. Um eine maximale Wirksamkeit sicherzustellen und angesichts des grenzüberschreitenden Charakters des Problems sowie der hohen Kosten einiger Lösungen, bietet es sich an, Interventionen unabhängig davon zu konzipieren, ob die betroffenen Regionen die Maßnahmen selber alleine finanzieren können (Royal Society 2024, S. 25). Dies ist umso relevanter, als die Verantwortung für die Verschmutzung nicht immer eindeutig ist, insbesondere wenn die Akkumulationsgebiete sich außerhalb von nationalen Gerichtsbarkeiten befinden (Falk-Andersson et al. 2023, S. 13306). Deutschland beteiligt sich bereits unter anderem über die Clean Oceans Initiative der KfW Entwicklungsbank (KfW 2022) zusammen mit fünf weiteren Förderbanken an Reinigungsmaßnahmen und fördert internationale Projekte gegen Meeresmüll³⁰ (AFD 2025; BMU 2021). Hier wäre zu prüfen, inwieweit die geförderten Projekte einen ausreichenden Technologie- und Wissenstransfer zu solchen Technologien ermöglichen, die eine hohe Wirksamkeit bei gleichzeitig geringen Nebenwirkungen aufweisen.

³⁰ <https://www.z-u-g.org/meeresmuell/projekte/> (9.5.2025)

Darüber hinaus wäre sicherzustellen, dass die im Rahmen der Projekte erhobenen Daten zur Technologieanwendung zur Entwicklung von Qualitätsstandards für die Technologienanwendung beitragen (Bellou 2025, S. 110). Zukünftige Maßnahmen des Technologietransfers sind idealerweise an konkrete Anforderungen an die Technologien zu knüpfen, damit nur solche Projekte gefördert werden, die eine hohe Effizienz bei gleichzeitig maximalem Schutz der Ökosysteme gewährleisten. Außerdem sollte sichergestellt werden, dass ausreichende Infrastrukturen vorhanden sind, um die Verwertung der rückgeholten Abfälle zu gewährleisten. In dieser Hinsicht wären auch die Bedingungen für die Auszahlung von Mitteln aus dem Einwegkunststofffonds an Anspruchsberechtigte zur Sammlung, Reinigung und Entsorgung im öffentlichen Raum³¹ zu prüfen.

Globale Herausforderungen wie die Verschmutzung durch Plastik können nur schwer durch einzelne Länder, insbesondere im Globalen Süden gestemmt werden. Denn die hohen Kosten mancher Technologien stellen für eine breitere Anwendung im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit eine zentrale Herausforderung dar (GIZ 2023, S. 61). Zwar wurden in den letzten Jahren vielfältige öffentlich finanzierte Programme und Initiativen ins Leben gerufen, um die Mengen des Plastikmülls im Meer zu reduzieren. Aber es gibt eine Diskrepanz zwischen den öffentlichen Entwicklungsleistungen, um die Plastikverschmutzung zu bekämpfen, und den Regionen, in denen Finanzierungen und Unterstützung am dringendsten benötigt werden (OECD 2025, S. 5 f.). Zudem sind die Möglichkeiten fragmentiert und thematisch eingeschränkt. Die Einrichtung eines internationalen Finanzierungsmechanismus wird im Rahmen der Entwicklung eines völkerrechtlich bindenden internationalen Plastikabkommens diskutiert (IISD 2025). Im Rahmen der weiteren Verhandlungen könnte sich Deutschland weiterhin für innovative und hybride Finanzierungslösungen einsetzen (siehe dazu auch UNDP 2024, S. 20) und die Förderbedingungen mitgestalten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein zu starker Fokus auf das Ausgleichen von Emissionen statt deren tatsächlicher Vermeidung das Problem eher verschärfen könnte (Moon et al. 2024).

³¹ <https://www.einwegkunststofffonds.de/de> (1.7.2025)

8 Literatur

8.1 In Auftrag gegebene Gutachten

Hinzmann, M.; Knoblauch, D.; Schmitt, H.; Kraemer, R. A.; Bergmann, M. (2025): Technologische Möglichkeiten zur Reduktion von Kunststoffabfällen in den Meeren. Ecologic Institut gemeinnützige GmbH, Berlin

Bellou, N. (2025): Technologische Möglichkeiten zur Reduktion von Kunststoffabfällen in den Meeren – Wissenstand innovativer Lösungen zur Bekämpfung des Meeresmülls. Hamburg

8.2 Weitere Literatur

AFD (2025): Clean Oceans Initiative. Agence Francaise de Développement, <https://www.afd.fr/en/the-clean-oceans-initiative> (23.6.2025)

Allen, D. et al. (2022): Microplastics and nanoplastics in the marine-atmosphere environment. In: *Nature Reviews Earth & Environment* 3(6), S. 393–405, <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00292-x>

Allen, S. et al. (2020): Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. In: *PLOS ONE* 15(5), Art. e0232746, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>

Anih, D. C. et al. (2025): Biochemical effects of microplastics on human health: A comprehensive review. In: *Science International* 13(1), S. 27–34, <https://doi.org/10.17311/sciintl.2025.27.34>

ASTRA (2010): Erste technische Strassenabwasser-Behandlungsanlage der Schweiz. SABA Pfaffensteig in Bern-Bümpliz. Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern

AWI (o. J.): Verbreitung von Müllarten in untersuchten Lebensräumen (1.426 Veröffentlichungen). Alfred Wegener Institut, https://litterbase.awi.de/litter_graph?lang=de (15.1.2026)

Banerjee, I. et al. (2024): Male infertility and its link to microplastics: A sterile future. In: *Journal of Biomedical Sciences* 11(1), S. 1–3, <https://doi.org/10.3126/jbs.v11i1.69235>

Bayo, J. et al. (2020): Membrane bioreactor and rapid sand filtration for the removal of microplastics in an urban wastewater treatment plant. In: *Marine Pollution Bulletin* 156, Art. 111211, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111211>

Beaumont, N. J. et al. (2019): Global ecological, social and economic impacts of marine plastic. In: *Marine Pollution Bulletin* 142, S. 189–195, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.022>

Bellou, N. et al. (2021): Global assessment of innovative solutions to tackle marine litter. In: *Nature Sustainability* 4(6), S. 516–524, <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00726-2>

Bergmann, M. et al. (2022): Plastic pollution in the Arctic. In: *Nature Reviews Earth & Environment* 3(5), S. 323–337, <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00279-8>

Bergmann, M. et al. (2023): Moving from symptom management to upstream plastics prevention: The fallacy of plastic cleanup technology. In: *One Earth* 6(11), S. 1439–1442, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.10.022>

Bertling, J. et al. (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umwelt-schicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheit-, und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen

Bertling, J. et al. (2021): Mikroplastikeinträge in die marine Umwelt – Stand des Wissens und Handlungsoptionen. Runder Tisch Meeresmüll, AG Landbasierte Einträge, <https://doi.org/10.24406/umsicht-n-643812>

Bertling, R.; Nühlen, J. (2019): Study. As part of the MARELITT Baltic project: Recycling of abandoned, lost and discarded fishing gear (ALDFG) and end-of-life fishing gear (EOL): Sub-studies on logistics requirements and economic viability. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen

Blettler, M. C. M. et al. (2023): The challenge of reducing macroplastic pollution: Testing the effectiveness of a river boom under real environmental conditions. In: *Science of The Total Environment* 870, Art. 161941, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161941>

- BMFTR (2025): SimConDrill – Zyklonfilter zur Reduktion von Mikroplastik aus Abwasser. Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt, <https://www.innovationsatlas-wasser.de/de/produkte/simcon-drill-zyklonfilter-zur-reduktion-von-mikroplastik-aus-abwasser/> (20.6.2025)
- BMU (2021): Förderrichtlinie für das Förderprogramm gegen Meeresmüll „Marine Debris Framework – Regional hubs around the globe“ (Marine:DeFRAG) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). https://www.z-u-g.org/fileadmin/zug/Dateien/Foerderprogramme/Meeresmuell/2021_MarineDeFRAG_Foerderrichtlinie.pdf (9.5.2025)
- Borrelle, S. B. et al. (2020): Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. In: *Science* 369(6510), S. 1515–1518, <https://doi.org/10.1126/science.aba3656>
- Brännström, S. et al. (2023): Microplastic emissions from paint. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, SMED Report No 7, Norrköping
- Breitbarth, M. (2018): Kunststoffe in kommunalen Kläranlagen. Eintrag und Verteilung in ausgewählten Kläranlagen. In: *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 65(9), S. 800–807
- Brouwer, R. et al. (2023): Assessing the performance of marine plastics cleanup technologies in Europe and North America. In: *Ocean & Coastal Management* 238, Art. 106555, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106555>
- Bundesregierung (2023): Verfügbarkeit von sauberem Wasser. Antwort der Bundesregierung auf die Große Anfrage der Abgeordneten Ralph Lenkert, Ina Latendorf, Dr. Gesine Löttsch, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. – Drucksache 20/8825 –, Deutscher Bundestag, Drucksache 20/11035, Berlin
- Canals, M. et al. (2021): The quest for seafloor macrolitter: a critical review of background knowledge, current methods and future prospects. In: *Environmental Research Letters* 16, Art. 023001, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc6d4>
- Caruso, G. et al. (2022): Plastic occurrence, sources, and impacts in Antarctic environment and biota. In: *Water Biology and Security* 1(2), Art. 100034, <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2022.100034>
- Chamas, A. et al. (2020): Degradation rates of plastics in the environment. In: *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 8(9), S. 3494–3511, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
- Chapron, L. et al. (2018): Macro- and microplastics affect cold-water corals growth, feeding and behaviour. In: *Scientific Reports* 8(1), Art. 15299, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33683-6>
- Charter, M.; Carruthers, R. (2022): Products from waste fishing nets accessories, clothing, footwear, home ware and recreation. <https://cfsd.org.uk/wp-content/uploads/2022/04/Products-from-waste-fishing-gear-March-2022.pdf> (7.7.2025)
- Christensen, A. et al. (2023): Simulating transport and distribution of marine macro-plastic in the Baltic Sea. In: *PLOS ONE* 18(1), Art. e0280644, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280644>
- Cocozza, P. et al. (2025): Microplastic pollution from pellet spillage: Analysis of the Toconao ship accident along the Spanish and Portuguese coasts. In: *Marine Pollution Bulletin* 211, Art. 117430, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117430>
- Cornacchia, F. (2023): Impacts on ecosystem services due to changes in the state of the environment in the North-East Atlantic Ocean. Rijkswaterstaat Water Verkeer en Leefomgeving, London
- Cottom, J. W. et al. (2024): A local-to-global emissions inventory of macroplastic pollution. In: *Nature* 633(8028), S. 101–108, <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07758-6>
- D’Angelo, S.; Meccariello, R. (2021): Microplastics: A threat for male fertility. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(5), Art. 2392, <https://doi.org/10.3390/ijerph18052392>
- Delorme, A. E. et al. (2025): A year-long field study of buried plastics reveals underestimation of plastic pollution on Hawaiian beaches. In: *Marine Pollution Bulletin* 214, Art. 117712, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117712>
- Do, H.-L.; Armstrong, C. W. (2023): Ghost fishing gear and their effect on ecosystem services – Identification and knowledge gaps. In: *Marine Policy* 150, Art. 105528, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105528>
- ECOFARIO (2025): Modifizierte Hydroyklone. <https://www.ecofario.eco/technology> (20.6.2025)

- EEA (2023): From source to sea — The untold story of marine litter. European Environment Agency, 19.1.2023, <https://www.eea.europa.eu/publications/european-marine-litter-assessment/from-source-to-sea-the> (9.12.2024)
- EFI (2025): Jahresgutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2025. Expertenkommission Forschung und Innovation, Berlin
- Egger, M. et al. (2022): Pelagic distribution of plastic debris (> 500 µm) and marine organisms in the upper layer of the North Atlantic Ocean. In: Scientific Reports 12(1), Art. 13465, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17742-7>
- Egger, M. et al. (2025): Evaluating the environmental impact of cleaning the North Pacific garbage patch. In: Scientific Reports 15(1), Art. 16736, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00619-w>
- EIA; Ocean Care (2023): Clean-ups or clean washing? How plastic pollution clean up technology can actually harm the environment and obstruct policy progress. Environmental Investigation Agency, Ocean Care, London
- EK (2021): Auf dem Weg zu einem gesunden Planeten für alle. EU-Aktionsplan: „Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden“. Europäische Kommission, COM(2021) 400 final, Brüssel
- EK (2024a): Meeresumwelt. Europäische Kommission, https://environment.ec.europa.eu/topics/marine-environment_en?prefLang=de&etrans=de (15.11.2024)
- EK (2024b): MSFD Technical Group on Marine Litter. Europäische Kommission, https://mcc.jrc.ec.europa.eu/main/dev.py?N=41&O=434&titre_chap=TG (16.12.2024)
- EK (2024c): What is EMODnet? Europäische Kommission, https://emodnet.ec.europa.eu/en/about_emodnet (16.12.2024)
- EK (2025a): Europäische Wasserresilienzstrategie. Europäische Kommission, COM(2025) 280 final, Brüssel
- EK (2025b): Der Europäische Pakt für die Meere. Europäische Kommission, COM(2025) 281 final, Brüssel
- EK (2025c): Weniger Mikroplastik in der Umwelt: EU-Kommission begrüßt Einigung von Parlament und EU-Staaten. Europäische Kommission, https://germany.representation.ec.europa.eu/news/weniger-mikroplastik-der-umwelt-eu-kommission-begrusst-einigung-von-parlament-und-eu-staaten-2025-04-09_de (9.5.2025)
- Emmerik, T. van et al. (2020): Crowd-based observations of riverine macroplastic pollution. In: Frontiers in Earth Science 8, Art. 298, <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00298>
- Enevoldsen, H. O. et al. (2024): State of the ocean report, 2024. UNESCO Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC Technical Series 190, Paris, <https://doi.org/10.25607/4wbg-d349>
- Eriksen, M. et al. (Hg.) (2023): A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans – Urgent solutions required. In: PLOS ONE 18(3), Art. e0281596, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>
- Eriksen, M. et al.; Dam, H. G. (Hg.) (2014): Plastic pollution in the world's oceans: More than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. In: PLoS ONE 9(12), S. e111913, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- Eveleens, A. M. (o. J.): Fish and bubble barriers. The Great Bubble Barrier B.V., 16.4.2024, <https://thegreatbubblebarrier.com/fish-and-bubble-barriers/> (13.1.2026)
- Falk-Andersson, J. et al. (2020): Basic principles for development and implementation of plastic clean-up technologies: What can we learn from fisheries management? In: Science of The Total Environment 745, Art. 141117, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141117>
- Falk-Andersson, J. et al. (2023): Cleaning up without messing up: Maximizing the benefits of plastic clean-up Technologies through New Regulatory Approaches. In: Environmental Science & Technology 57(36), Art. 141117, <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01885>
- Farré, M. la et al. (2021): Microplastics in the environment (particularly in the Mediterranean). Institute of Catalan Studies, CAPCIT Report, Barcelona

- Fazey, F. M. C.; Ryan, P. G. (2016): Biofouling on buoyant marine plastics: An experimental study into the effect of size on surface longevity. In: *Environmental Pollution* 210, S. 354–360, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.026>
- Fuhrmann, T. et al. (2021): Mikroplastik-Emissionen aus Kläranlagen. In: *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 68(9), S. 730–741, <https://doi.org/10.3242/kae2021.09.003>
- Gall, S. C.; Thompson, R. C. (2015): The impact of debris on marine life. In: *Marine Pollution Bulletin* 92(1–2), S. 170–179, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041>
- Gilman, E. et al. (2021): Highest risk abandoned, lost and discarded fishing gear. In: *Scientific Reports* 11, Art. 7195, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86123-3>
- GIZ (2022): Tackling marine litter: Global partnerships and activities. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Bonn
- GIZ (2023): Towards clean oceans. Reducing plastic pollution through circular economy – Learning experiences of GIZ and its partners. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Bonn
- GIZ (2024): Position paper of sectoral department. Abandoned, lost or, otherwise discarded fishing gear. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Eschborn
- GKD (2024): Mikroplastik-Schutz im Straßenabfluss – Pilotprojekt in Dänemark. GKD – Gebr. Kufferath AG, 28.11.2024, <https://www.gkd-group.com/de-de/newsroom/news/mikroplastik-schutz-im-strassenabfluss-pilotprojekt-in-daenemark/> (23.6.2025)
- Glavee-Geo, R. et al. (2023): The role of non-profit organisations (NGOs) in value creation: Lessons from the recycling of fishing gear in Norway. In: Grimstad, S. M. F. et al. (Hg.): *Marine plastics: Innovative solutions to tackling waste*. Cham, S. 149–166, https://doi.org/10.1007/978-3-031-31058-4_9
- González-Fernández, D. et al. (2021): Floating macrolitter leaked from Europe into the ocean. In: *Nature Sustainability* 4(6), S. 474–483, <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00722-6>
- Green, D. S. (2022): Biological and ecological impacts of plastic debris in aquatic ecosystems. In: Stock, F. et al. (Hg.): *Plastics in the aquatic environment – Part I: Current status and challenges*. Cham, S. 111–133, https://doi.org/10.1007/978-3-031-31058-4_9
- Griffin, M. D. et al. (2024): Do plastic clean-up technologies work? What research does (and doesn't) tell us. In: *Marine Pollution Bulletin* 209, Part A, Art. 116978, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116978>
- Günther, F. W.; Faltermaier, S. (2023): Abwasser- und Entwässerungsleitungen. In: Horlacher, H.-B.; Helbig, U. (Hg.): *Rohrleitungen 2. Einsatz, Verlegung, Berechnung, Rehabilitation*. Berlin, S. 19–33, https://doi.org/10.1007/978-3-662-60804-3_16
- Gutow, L. et al. (2018): Distribution and trajectories of floating and benthic marine macrolitter in the south-eastern North Sea. In: *Marine Pollution Bulletin* 131, Part A, S. 763–772, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.003>
- HELCOM (2023): HELCOM Thematic assessment of hazardous substances, marine litter, underwater noise and non-indigenous species 2016-2021. Baltic Sea Environment Proceedings n°190, Helsinki Commission, Helsinki
- Helinski, O. K. et al. (2021): Ridding our rivers of plastic: A framework for plastic pollution capture device selection. In: *Marine Pollution Bulletin* 165, Art. 112095, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112095>
- Hoehn, D. P. et al. (2024): Microplastics in sea surface waters in the Southern Bight of the North Sea. In: *Frontiers in Marine Science* 11, Art. 1430307, <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1430307>
- Hohn, S. et al. (2020): The long-term legacy of plastic mass production. In: *Science of The Total Environment* 746, Art. 141115, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141115>
- Horton, A. A. (2022): Plastic pollution: When do we know enough? In: *Journal of Hazardous Materials* 422, Art. 126885, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126885>
- HSWT (o.J.): PlasticWorms. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, <https://www.hswt.de/forschung/projekt/1841-plastic-worms> (20.6.2025)

- Hughes, T. P. et al. (2017): Coral reefs in the Anthropocene. In: *Nature* 546(7656), S. 82–90, <https://doi.org/10.1038/nature22901>
- IISD (2025): Summary of the resumed fifth session of the Intergovernmental Negotiating Committee to develop an international legally binding instrument on plastic pollution, including in the marine environment: 5–15 August 2025. International Institute for Sustainable Development, Earth Negotiations Bulletin 43, <https://enb.iisd.org/sites/default/files/2025-08/enb3643e.pdf> (15.1.2026)
- Int-Veen, I. et al. (2021): Positively buoyant but sinking: Polymer identification and composition of marine litter at the seafloor of the North Sea and Baltic Sea. In: *Marine Pollution Bulletin* 172, Art. 112876, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112876>
- ITA (2025): Plastik und menschliche Gesundheit. Institut für Technikfolgen-Abschätzung der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien
- ITTN (o.J.): International Trash Trap Network. Ocean Conservancy and University of Toronto, <https://oceanconservancy.org/trash-free-seas/international-coastal-cleanup/trash-trap-network/> (11.9.2025)
- Jambeck, J. R. et al. (2015): Plastic waste inputs from land into the ocean. In: *Science* 347(6223), S. 768–771, <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Jambeck, J. R.; Walker-Franklin, I. (2023): The impacts of plastics' life cycle. In: *One Earth* 6(6), S. 600–606, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.05.015>
- JRC (2023): New guidelines for a common approach to tackle marine litter. Joint Research Centre, https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/new-guidelines-common-approach-tackle-marine-litter-2023-12-12_en (15.1.2026)
- Kaandorp, M. L. A. et al. (2020): Closing the mediterranean marine floating plastic mass budget: Inverse modeling of sources and sinks. In: *Environmental Science & Technology* 54(19), S. 11980–11989, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01984>
- Kaandorp, M. L. A. et al. (2023): Global mass of buoyant marine plastics dominated by large long-lived debris. In: *Nature Geoscience* 16(8), S. 689–694, <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01216-0>
- Karali, N. et al. (2024): Climate impact of primary plastic production. Lawrence Berkeley National Laboratory, <https://doi.org/10.2172/2336722>
- Karlsson, T. M. et al. (2018): The unaccountability case of plastic pellet pollution. In: *Marine Pollution Bulletin* 129(1), S. 52–60, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.041>
- Katija, K. et al. (2017): From the surface to the seafloor: How giant larvaceans transport microplastics into the deep sea. In: *Science Advances* 3(8), Art. e1700715, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700715>
- KfW (2022): Clean Oceans Initiative verdoppelt ihr Engagement und stellt bis 2025 rund 4 Milliarden Euro für den Schutz der Meere bereit, EBRD wird neues Mitglied. https://www.kfw.de/Über-die-KfW/Newsroom/Aktuelles/News-Details_692992.html (24.7.2025)
- Kühn, S.; Franeker, J. A. van (2020): Quantitative overview of marine debris ingested by marine megafauna. In: *Marine Pollution Bulletin* 151, Art. 110858, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110858>
- Lacerda, A. L. d. F. et al. (2019): Plastics in sea surface waters around the Antarctic peninsula. In: *Scientific Reports* 9(1), Art. 3977, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40311-4>
- Lacroix, C. et al. (2022): Abundance, composition and trends of beach litter. OSPAR Status Report 2023, OSPAR Commission, https://oap-cloudfront.ospar.org/media/filer_public/9b/9d/9b9d5004-c49a-4673-bff1-20f0e66fb0f3/p00881_beach_litter_indicator_assessment_qsr2023.pdf (4.12.2024)
- Lau, W. W. Y. et al. (2020): Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. In: *Science* 369(6510), S. 1455–1461, <https://doi.org/10.1126/science.aba9475>
- Lebreton, L. (2022): The status and fate of oceanic garbage patches. In: *Nature Reviews Earth & Environment* 3(11), S. 730–732, <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00363-z>
- Lebreton, L. et al. (2018): Evidence that the Great Pacific garbage patch is rapidly accumulating plastic. In: *Scientific Reports* 8, Art. 4666, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

- Lebreton, L. et al. (2024): Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. In: *Environmental Research Letters* 19, Art. 124054, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>
- Leone, G. et al. (2022): Integrating Bayesian Belief Networks in a toolbox for decision support on plastic clean-up technologies in rivers and estuaries. In: *Environmental Pollution* 296, Art. 118721, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118721>
- Leone, G. et al. (2023): A comprehensive assessment of plastic remediation technologies. In: *Environment International* 173, Art. 107854, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107854>
- Lewin, W.-C. et al. (2019): Bedeutung und Bewertung von Meeresmüll aus der marinen Freizeitfischerei und Maßnahmen zur Vermeidung. Thünen Institut für Ostseefischerei, Rostock
- Li, Q. et al. (2025): Microplastics alter microbial structure and assembly processes in different soil types: Driving effects of environmental factors. In: *Environmental Research* 278, Art. 121672, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121672>
- Li, W. C. et al. (2016): Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. In: *Science of The Total Environment* 566–567, S. 333–349, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.084>
- Liu, Z. et al. (2023): Anionic nanoplastic contaminants promote Parkinson’s disease-associated α -synuclein aggregation. In: *Science Advances* 9(46), Art. eadi8716, <https://doi.org/10.1126/sciadv.adi8716>
- Lobelle, D. et al. (2021): Global modeled sinking characteristics of biofouled microplastic. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans* 126(4), Art. e2020JC017098, <https://doi.org/10.1029/2020JC017098>
- Loon, W. van et al. (2020): A European threshold value and assessment method for macro litter on the coastlines: guidance developed within the Common Implementation strategy for the Marine Strategy Framework Directive MSFD Technical Group on Marine Litter. Joint Research Centre, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/54369>
- Lorenz, C. et al. (2019): Spatial distribution of microplastics in sediments and surface waters of the southern North Sea. In: *Environmental Pollution* 252, Part B, S. 1719–1729, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.093>
- MacLeod, M. et al. (2021): The global threat from plastic pollution. In: 373(6550), S. 61–65, <https://doi.org/10.1126/science.abg5433>
- Magnusson, K. et al. (2016): Microlitter in sewage treatment systems. A Nordic perspective on waste water treatment plants as pathways for microscopic anthropogenic particles to marine systems. Nordic Council of Ministers, <https://doi.org/10.6027/TN2016-510>
- Malinović, B. N. et al. (2022): Electrochemical treatment of wastewater to remove contaminants from the production and disposal of plastics: a review. In: *Environmental Chemistry Letters* 20(6), S. 3765–3787, <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01497-8>
- Mani, T. et al. (2015): Microplastics profile along the Rhine river. In: *Scientific Reports* 5, Art. 17988, <https://doi.org/10.1038/srep17988>
- Maqbool, A. et al. (2023): Macro- and micro-plastics change soil physical properties: a systematic review. In: *Environmental Research Letters* 18, Art. 123002, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0a1a>
- Masch, M.; Bitter, E. (2021): Mikroplastik aus industriellem Abwasser entfernen: Verfahrensverbesserungen durch Flockungsmittel. EnviroChemie, Factsheet 5.1, Berlin
- Meijer, L. J. J. et al. (2021): More than 1000 rivers account for 80 % of global riverine plastic emissions into the ocean. In: *Science Advances* 7(18), Art. eaaz5803, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803>
- Mejia-Muñoz, J. (2019): 18 GPS garbage trackers. One lone ship. 40 tons out of the ocean. Proof of Concept. 30.6.2019, KQED, <https://www.kqed.org/science/1944183/pacific-plastic-purge-attempt-serves-as-a-reminder-of-the-daunting-task-ahead> (30.7.2025)
- Meyer, A. N. et al. (2023): Where does Arctic beach debris come from? Analyzing debris composition and provenance on Svalbard aided by citizen scientists. In: *Frontiers in Marine Science* 10, Art. 1092939, <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1092939>

- Meyerjürgens, J. et al. (2023): Sources, pathways, and abatement strategies of macroplastic pollution: an interdisciplinary approach for the southern North Sea. In: *Frontiers in Marine Science* 10, Art. 1148714, <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1148714>
- Moon, S. et al. (2024): Unpacking plastic credits: Challenges to effective and just global plastics governance. *One Earth*, Forthcoming, <https://doi.org/10.2139/ssrn.4984333>
- Moulaert, I. et al. (2021): Aquatic plastic catchers: Overview of current technologies, knowledge gaps and future opportunities. *Vlaams Instituut voor de Zee: Oostende*, <https://dx.doi.org/10.48470/3>
- Neupert, J. W. et al. (2024): Measures to reduce the discharge of tire wear into the environment. In: *Microplastics* 3(2), S. 305–321, <https://doi.org/10.3390/microplastics3020019>
- Nihart, A. J. et al. (2025): Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. In: *Nature Medicine* 31, S. 1114–1119, <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>
- Nogueira, P. et al. (2023): Visual quantification and identification of shallow seafloor marine litter in the southernmost North and Baltic seas using an epibenthic video sledge (EVS) – A comparison to bottom trawl data. In: *Science of The Total Environment* 891, Art. 164633, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164633>
- O'Donoghue, A. M.; Hal, R. van (2018): Seafloor litter monitoring: International Bottom Trawl Survey 2018. Wageningen Marine Research, IJmuiden, <https://doi.org/10.18174/456145>
- OECD (2022a): Global Plastics Outlook. Policy Scenarios to 2060. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>
- OECD (2022b): The role of development co-operation in tackling plastic pollution. Key trends, instruments, and opportunities to scale up action (Autor/innen: Agnelli, A.; Tortora, P.). Organisation for Economic Co-operation and Development, <https://doi.org/10.1787/721355cb-en>
- OECD (2024): Policy Scenarios for Eliminating Plastic Pollution by 2040. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, <https://doi.org/10.1787/76400890-en>
- OECD (2025): Development co-operation and the elimination of plastic pollution. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris
- Okoye, C. O. et al. (2022): Toxic chemicals and persistent organic pollutants associated with micro-and nanoplastics pollution. In: *Chemical Engineering Journal Advances* 11, Art. 100310, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100310>
- Onink, V. et al. (2021): Global simulations of marine plastic transport show plastic trapping in coastal zones. In: *Environmental Research Letters* 16(6), Art. 064053, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abecbd>
- OPECST (2024): Les impacts des plastiques sur la santé humaine. Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Compte rendu de l'audition publique du 17 octobre 2024 et de la présentation des conclusions du 14 novembre 2024, Paris
- OSPAR (2023): Marine litter thematic assessment. Quality Status Report 2023, OSPAR Commission, London, https://oap-cloudfront.ospar.org/media/filer_public/41/1b/411b78c2-cb52-46e6-b239-a38a00c38ed1/p00878_qsr2023_marine_litter_ta.pdf (11.12.2024)
- Paris, A. et al. (2022): An assessment of floating marine debris within the breakwaters of the University of the South Pacific, Marine Studies Campus at Laucala Bay. In: *Marine Pollution Bulletin* 174, Art. 113290, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113290>
- Parker-Jurd, F. N. F. et al. (2022): Evaluating the performance of the 'Seabin' – A fixed point mechanical litter removal device for sheltered waters. In: *Marine Pollution Bulletin* 184, Art. 114199, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114199>
- Peters, W. (o.J.b): Vom Fluss ins Meer. Plastik in der Umwelt, <https://bmbf-plastik.de/de/node/498.html> (15.1.2026)
- Peters, W. (o.J.a): Auf der Spur von Mikroplastik in Gewässern. Plastik in der Umwelt, <https://bmbf-plastik.de/de/node/502.html> (15.1.2026)
- Pinheiro, H. T. et al. (2023): Plastic pollution on the world's coral reefs. In: *Nature* 619(7969), S. 311–316, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>

- Rasmussen, L. A. et al. (2024): Retention of microplastics and tyre wear particles in stormwater ponds. In: *Water Research* 248, Art. 120835, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120835>
- Rauert, C. et al. (2025): Assessing the efficacy of pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry for nano-plastic and microplastic analysis in human blood. In: *Environmental Science & Technology* 59(4), S. 1984–1994, <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c12599>
- Reichel, J. (2022): Audi Stiftung und TU Berlin filtern Reifenabrieb erfolgreich. *vision-mobility*, <https://vision-mobility.de/news/audi-stiftung-und-tu-berlin-filtern-reifenabrieb-erfolgreich-141459.html> (23.6.2025)
- Reisser, J. et al. (2015): The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre. In: *Biogeosciences* 12(4), S. 1249–1256, <https://doi.org/10.5194/bg-12-1249-2015>
- Roman, L. et al. (2021): Plastic pollution is killing marine megafauna, but how do we prioritize policies to reduce mortality? In: *Conservation Letters* 14(2), Art. e12781, <https://doi.org/10.1111/conl.12781>
- Ronkay, F. et al. (2021): Plastic waste from marine environment: Demonstration of possible routes for recycling by different manufacturing technologies. In: *Waste Management* 119, S. 101–110, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.029>
- Roscher, L. et al. (2021): Microplastic pollution in the Weser estuary and the German North Sea. In: *Environmental Pollution* 288, Art. 117681, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117681>
- Royal Society (2024): Legacy plastics: interventions to remove existing plastic from aquatic environments. (Autor/innen: Thompson, S. Giles, R.) <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/legacy-plastics/legacy-plastics-policy-briefing.pdf> (27.1.2025)
- Runder Tisch Meeresmüll (o. J.a): Nationales Maßnahmenprogramm. <https://www.muell-im-meer.de/de/hintergrund-massnahmenprogramm> (16.12.2024)
- Runder Tisch Meeresmüll (o. J.b): Problemdarstellung. <https://www.muell-im-meer.de/de/hintergrund-problem-darstellung> (6.12.2024)
- Runder Tisch Meeresmüll (o. J.c): Reduzierung des bereits vorhandenen Mülls im Meer. <https://www.muell-im-meer.de/de/aktionsfeld/reduzierung-des-bereits-vorhandenen-muells-im-meer> (25.11.2024)
- Rynek, R. et al. (2024): Hotspots of floating plastic particles across the North Pacific Ocean. In: *Environmental Science and Technology* 58(9), S. 4302–4313, <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05039>
- Sanderson, K. (2023): Striking images show plastic litter in the world’s most remote coral reefs. In: *Nature* 619(7970), Art. 447, <https://doi.org/10.1038/d41586-023-02271-8>
- Sarcletti, M. et al. (2021): The remediation of nano-/microplastics from water. In: *Materials Today* 48, S. 38–46, <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.02.020>
- Savoca, M. S. et al. (2016): Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. In: *Science Advances* 2(11), Art. e1600395, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>
- Scheer, H. et al. (2022a): Mikroplastik-Einträge über das Abwasser in die aquatische Umwelt. Handlungsempfehlungen und Erkenntnisse aus dem REPLAWA-Vorhaben zur Ermittlung und Verringerung von Mikroplastik-Einträgen im Bereich der Abwasserentsorgung. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin
- Scheer, H. et al. (2022b): Verbundprojekt REPLAWA: Reduktion des Eintrags von Plastik über das Abwasser in die aquatische Umwelt. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin
- Schernewski, G. et al. (2020): Transport and behavior of microplastics emissions from urban sources in the Baltic Sea. In: *Frontiers in Environmental Science* 8, Art. 579361, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.579361>
- Schernewski, G. et al. (2021): Emission, transport, and deposition of visible plastics in an estuary and the Baltic Sea – a monitoring and modeling approach. In: *Environmental Management* 68, S. 860–881, <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01534-2>
- Schmaltz, E. et al. (2020): Plastic pollution solutions: emerging technologies to prevent and collect marine plastic pollution. In: *Environment International* 144, Art. 106067, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106067>

- Schmidt, C. et al. (2017): Export of plastic debris by rivers into the sea. In: *Environmental Science & Technology* 51(21), S. 12246–12253, <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>
- Schneider, F. et al. (2018): Collected marine litter — A growing waste challenge. In: *Marine Pollution Bulletin* 128, S. 162–174, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.011>
- Schneider, F. et al. (2023): Life cycle assessment (LCA) on waste management options for derelict fishing gear. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 28, S. 274–290, <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02132-y>
- Sebille, E. van et al. (2012): Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. In: *Environmental Research Letters* 7(4), Art. 044040, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>
- Sebille, E. van et al. (2020): The physical oceanography of the transport of floating marine debris. In: *Environmental Research Letters* 15(2), Art. 023003, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6d7d>
- Seewoo, B. J. et al. (2024): How do plastics, including microplastics and plastic-associated chemicals, affect human health? In: *Nature Medicine* 30, S. 3036–3037, <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03287-x>
- Silva, J. et al. (2021): Plastic waste capture in rivers: An inventory of current technologies. Benio Ocean Initiative, Santa Barbara, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32896.92160>
- Silva, J. R. M. C. D. et al. (2023): Occurrence and distribution of legacy and emerging pollutants including plastic debris in Antarctica: Sources, distribution and impact on marine biodiversity. In: *Marine Pollution Bulletin* 186, Art. 114353, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114353>
- Sonke, J. E. et al. (2025): Global environmental plastic dispersal under OECD policy scenarios toward 2060. In: *Science Advances* 11(16), Art. eadu2396, <https://doi.org/10.1126/sciadv.adu2396>
- Spencer, M. et al. (2023): Estimating the impact of new high seas activities on the environment: the effects of ocean-surface macroplastic removal on sea surface ecosystems. In: *PeerJ* 11, Art. e15021, <https://doi.org/10.7717/peerj.15021>
- Statista (2025): Weltweite und europäische Kunststoffproduktion in den Jahren von 1950 bis 2024 (in Millionen Tonnen). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltproduktion-von-kunststoff-seit-1950> (20.1.2026)
- Sturm, M. T. et al. (2023): Comparison of AOP, GAC, and novel organosilane-based process for the removal of microplastics at a municipal wastewater treatment plant. In: *Water* 15(6), Art. 1164, <https://doi.org/10.3390/w15061164>
- Symeonides, C. et al. (2024): An umbrella review of meta-analyses evaluating associations between human health and exposure to major classes of plastic-associated chemicals. In: *Annals of Global Health* 90(1), Art. 52, <https://doi.org/10.5334/aogh.4459>
- Tekman, M. B. et al. (2020): Tying up Loose ends of microplastic pollution in the Arctic: Distribution from the sea surface through the water column to deep-sea sediments at the HAUSGARTEN Observatory. In: *Environmental Science & Technology* 54(7), S. 4079–4090, <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06981>
- Tekman, M. B. et al. (2022): Impacts of plastic pollution in the oceans on marine species, biodiversity and ecosystems. WWW Germany, Berlin, <https://doi.org/10.5281/zenodo.5898684>
- Trasande, L. et al. (2024): Chemicals used in plastic materials: An estimate of the attributable disease burden and costs in the United States. In: *Journal of the Endocrine Society* 8(2), Art. bvad163, <https://doi.org/10.1210/jendso/bvad163>
- UBA (o. J.a): Indikator: Kunststoffmüll in der Nordsee. Umweltbundesamt, Stand 28.7.2025, www.umweltbundesamt.de/n47327de (5.8.2025)
- UBA (o. J.b): Regenwasserbewirtschaftung. Umweltbundesamt, Stand 29.7.2024, www.umweltbundesamt.de/n76055de (4.4.2025)
- UD (2021): Mikroplastik herausfiltern, wo es entsteht. Umweltdialog, <https://www.umweltdialog.de/de/UMWELT/plastik-muell/2021/Mikroplastik-herausfiltern-wo-es-entsteht.php> (20.6.2025)
- UNDP (2024): Combatting Plastic Pollution for Sustainable Development: A snapshot of UNDP’s work in 12 countries. United Nations Development Programme, New York

- UNEA (2016): 2/11. Marine plastic litter and microplastics. United Nations Environment Assembly of the United Nations Environment Programme, UNEP/EA.2/Res11, Nairobi
- UNEP (2021): From Pollution to Solution. A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution. United Nations Environment Programme, Nairobi
- Vayas Valdivieso, L. (2025): Chair's revised text proposal. Intergovernmental Negotiating Committee, Second Part of the Fifth Session (INC-5.2), https://resolutions.unep.org/incres/uploads/chairs_revised_draft_text_proposal_-_15.08.25_at_00.482.pdf (15.1.2026)
- Veiga, J. et al. (2022): Marine litter in Europe – An integrated assessment from source to sea. European Topic Centre on Inland, Coastal and Marine Waters, ETC/ICM Technical Report 05/2022, <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-icm/products/etc-icm-reports/etc-icm-report-5-2022> (9.12.2024)
- Venghaus, D. et al. (2021): Abschlussbericht. Reifenabrieb in der Umwelt – RAU. Berlin
- Villarrubia-Gómez, P. et al. (2024): Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. In: One Earth 7(12), S. 2119–2138, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>
- Walther, B. A. et al. (2024): Microplastic detectives: a citizen-science project reveals large variation in meso- and microplastic pollution along German coastlines. In: Frontiers in Environmental Science 12, Art. 1458565, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1458565>
- Wasave, S. et al. (2025): A bibliometric review on ghost fishing: Impacts on marine environment and governing measures. In: Marine Pollution Bulletin 212, Art. 117604, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117604>
- Wasser 3.0 (2023): Weitergehende Abwasser-Behandlung trifft auf Mikroplastik-Entfernung mit Wasser 3.0 PE-X® – neueste Erkenntnisse aus den Langzeitversuchen publiziert. Wasser 3.0 gGmbH, 29.4.2023, <https://wasserdreinnull.de/blog/entfernung-von-mikroplastik-aus-dem-abwasser/> (19.6.2025)
- Wasser 3.0 (2024): Kläranlagen – keine Endstation für Mikroplastik. Wasser 3.0 gGmbH, 8.1.2024, <https://wasserdreinnull.de/blog/mikroplastik-in-klaeranlagen/> (19.6.2025)
- Weiß, G. (2020a): Regenrückhaltebecken. UFT Umwelt- und Fluid-Technik, <https://www.uft.eu/uft-wiki/eintrag/regenrueckhaltebecken/> (7.4.2025)
- Weiß, G. (2020b): Regenüberlaufbecken. UFT Umwelt- und Fluid-Technik, <https://www.uft.eu/uft-wiki/eintrag/regenueberlaufbecken/> (7.4.2025)
- Werner, S. et al. (2016): Harm caused by marine litter. European Commission. Joint Research Centre, <https://data.europa.eu/doi/10.2788/690366>
- Whitney, J. L. et al. (2021): Surface slicks are pelagic nurseries for diverse ocean fauna. In: Scientific Reports 11, Art. 3197, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81407-0>
- Wilcox, C. et al. (2015): Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing. In: PNAS 112(38), S. 11899–11904, <https://doi.org/10.1073/pnas.1502108112>
- Winterstetter, A. et al. (2021): A review of technological solutions to prevent or reduce marine plastic litter in developing countries. In: Sustainability 13(9), Art. 4894, <https://doi.org/10.3390/su13094894>
- Wolff, S. et al. (2021): Elimination of Microplastics by Downstream Sand Filters in Wastewater Treatment. In: Water 13(1), Art. 33, <https://doi.org/10.3390/w13010033>
- Wyles, K. J. et al. (2016): Factors that can undermine the psychological benefits of coastal environments: Exploring the effect of tidal state, presence, and type of litter. In: Environment and Behavior 48(9), S. 1095–1126, <https://doi.org/10.1177/0013916515592177>
- Wyles, K. J. et al. (2019): An evaluation of the Fishing For Litter (FFL) scheme in the UK in terms of attitudes, behavior, barriers and opportunities. In: Marine Pollution Bulletin 144, S. 48–60, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.035>
- Zhang, C. et al. (2022): Microplastics may be a significant cause of male infertility. In: American Journal of Men's Health 16(3), Art. 15579883221096549, <https://doi.org/10.1177/15579883221096549>
- Zhang, Y. et al. (2023): Plastic waste discharge to the global ocean constrained by seawater observations. In: Nature Communications 14, Art. 1372, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37108-5>

- Zhang, Z. et al. (2025): Electric forces can enhance the emission of microplastics into air. In: *Environmental Pollution* 376, Art. 126405, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126405>
- Zhao, S. et al. (2024): Microplastic pollution promotes soil respiration: A global-scale meta-analysis. In: *Global Change Biology* 30(7), Art. e17415, <https://doi.org/10.1111/gcb.17415>
- Zimmermann, L. et al. (2019): Benchmarking the in vitro toxicity and chemical composition of plastic consumer products. In: *Environmental Science & Technology* 53(19), S. 11467–11477, <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02293>

9 Anhang**9.1 Europäischer Regulierungsrahmen für die Meerespolitik****Tabelle 9.1 Überblick über den europäischen Regulierungsrahmen für die Meerespolitik**

Anwendungsbereich	EU-Instrument	kurze Beschreibung
bereichsübergreifend	EU-Aktionsplan: „Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden“ (2021)	Null-Schadstoff-Vision für 2050 und Null-Schadstoff-Ziele für 2030, um die Vermeidung von Umweltverschmutzung an der Quelle zu fördern und Abfälle, Plastikmüll im Meer und die Freisetzung von Mikroplastik in die Umwelt zu reduzieren
landbasierte Quellen	Aktionspläne für die Kreislaufwirtschaft (2015, 2020)	langfristige Ziele, um die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling wichtiger Abfallströme, wie z. B. Verpackungen, zu verbessern. Definition von Maßnahmen zur Reduzierung von Kunststoffabfällen für Schlüsselprodukte wie Verpackungen, verbindliche Anforderungen an den Gehalt an recyceltem Kunststoff, Beschränkungen für absichtlich zugesetztes Mikroplastik und Maßnahmen zur Verhinderung der unbeabsichtigten Freisetzung von Mikroplastik
	Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft (2018)	Ziele und Maßnahmen zur integrierten Regulierung der Gestaltung, Verwendung, Wiederverwendung und des Recyclings von Kunststoffen. Themen: Recyclingfähigkeit, biologische Abbaubarkeit, Toxizität und Wiederverwendbarkeit.
	Richtlinie 94/62/EG und Verordnung (EU) 2025/40 über Verpackungen, Verpackungsabfälle sowie Kunststofftragetaschen	Vermeidung der Entstehung von Verpackungsabfällen und ihrer Umweltauswirkungen, verstärkte Wiederverwendung von Verpackungen und Recycling von Verpackungsabfällen, Recyclingziele für Kunststoffverpackungen, Einführung von Systemen der erweiterten Herstellerverantwortung für alle Verpackungen, Verpflichtung der Mitgliedstaaten, Maßnahmen zur Senkung des Verbrauchs von leichten Kunststofftragetaschen einzuführen. Einführung verbindlicher Anforderungen an Rezyklate, Wiederverwendbarkeit, Kompostierbarkeit; Kennzeichnung von Verpackungen.
	Richtlinie 1999/31/EG über Abfalldeponien	Anforderungen an Deponien, zum Schutz von Menschen und Umwelt (z. B. Distanz zu Gewässern und Küsten), Begrenzung des Anteils der deponierten festen Siedlungsabfälle auf 10% des gesamten Siedlungsabfallaufkommens bis 2035 und Einführung von Annahmeverboten für verwertungsfähigen Abfällen ab 2030
	Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle	Bedingungen für die Bewirtschaftung aller Arten von Abfällen. Themen: Nachhaltigkeit, Effizienz der Ressourcennutzung und Werterhaltung von Materialien

Anwendungsbereich	EU-Instrument	kurze Beschreibung
	Richtlinie (EU) 2019/904 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt	Einschränkung der Verwendung und verstärkter Sammlung der zehn am häufigsten an Europas Stränden und in Meeren gefundenen Einwegplastikartikel
	Verordnung (EG) Nr. 2024/1157 über die Verbringung von Abfällen	Vorschriften für die Verbringung von Abfällen, einschließlich Kunststoffen, Beschränkung der Ausfuhr von Kunststoffabfällen in Drittländer. Verbot der Ausfuhr von gefährlichen Kunststoffabfällen und von schwer recycelbaren Kunststoffabfällen aus der EU in Nicht-OECD-Länder
	Richtlinie 2019/883/EU über Hafenauffangeinrichtungen für die Entladung von Abfällen von Schiffen	Anreize zur Reduktion der Einleitung von Schiffsabfällen und Ladungsrückständen ins Meer, auch von Fischereifahrzeugen und Sportbooten, Anreize zur Entsorgung an Land von eigenen Abfällen, Altfanggeräten und passiv gefischten Abfällen
meeresbasierte Quellen	Verordnung (EG) Nr. 1224/2009 zur Einführung einer gemeinschaftlichen Kontrollregelung zur Sicherstellung der Einhaltung der Vorschriften der gemeinsamen Fischereipolitik	Bestimmungen zur Bergung von verlorengegangenen Fanggerät
	Richtlinie (EU) 2019/904 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt	Verpflichtung der Mitgliedstaaten, über Fanggeräte, die Kunststoffe enthalten, und über Systeme zur erweiterten Herstellerverantwortung für die Sammlung und Reinigung von entsorgten oder geborgenen Fanggeräten zu berichten
	Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik	Ziele und Maßnahmen zur Erreichung eines guten ökologischen Zustands von Binnen- und Küstengewässern
Eintragspfade	Richtlinie 91/271/EWG über die Behandlung von kommunalem Abwasser und Richtlinie (EU) 2024/3019 (Neufassung)	Anforderungen an Sammlung, Behandlung und Ableitung von Abwasser sowie Wiederverwendung und Energieneutralität
	Richtlinie 2008/56/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie)	Indikator 10 betrifft Meeresabfälle und sieht vor, dass die Eigenschaften und Mengen der Meeresabfälle die Küsten- und Meeresumwelt nicht schädigen; Vorgaben zu Zielsetzung, Überwachung und Umsetzung von Maßnahmenprogrammen zur Erreichung eines guten Umweltzustands
Zustand und Wirkung der Verschmutzung von Meeren	Richtlinie 2006/7/EG über die Qualität der Badegewässer und deren Bewirtschaftung	Bestimmungen zur Überwachung von Badegewässern und bei Verschmutzung Umsetzung geeigneter Maßnahmen

Quelle: angelehnt an Veigna (2022, S. 30 ff.)

9.2 Abbildungen

	Seite
Abbildung 2.1 Die fünf Müllstrudel (Garbage Patches)	14
Abbildung 3.1 Zentrale Auswirkungen von Plastik auf die Meeresumwelt	16
Abbildung 4.1 Überblick über Anwendungsbereiche von Technologien zur Entfernung von Kunststoffen	19
Abbildung 4.2 Überblick über gängige Technologietypen	21
Abbildung 5.1 Relevante Reinigungsstufen für die Entfernung von Mikroplastik in deutschen Kläranlagen.....	23
Abbildung 5.2 Größenordnungen von Eliminationsraten und Massenkonzentrationen für Mikroplastik in kommunalen Kläranlagen	23
Abbildung 5.3 Das Müllrad „Mr. Trash Wheel“ an der Mündung des Jones Falls River im inneren Hafen von Baltimore.....	30
Abbildung 5.4 Luftblasenvorhang in Amsterdam.....	31
Abbildung 5.5 Einsatz einer schwimmenden, festinstallierten Barriere in Kombination mit einem Müllsammelbot mit semipassivem Förderband in Jakarta.....	34
Abbildung 6.1 Relevante europäische Richtlinien sowie Verordnungen und von ihnen erfasste Bereiche.....	39

9.3 Tabellen

Tabelle 5.1 Überblick über zentrale Technologien für die Entfernung von Kunststoffpartikeln in Kläranlagen	24
Tabelle 5.2 Technologien für die Behandlung von Misch- und Niederschlagswasser	26
Tabelle 5.3 Überblick über wichtige Typen stationärer Technologien.....	28
Tabelle 5.4 Überblick über wichtige mobile Technologietypen	32
Tabelle 9.1 Überblick über den europäischen Regulierungsrahmen für die Meerespolitik.....	56

