



Herausragende Masterarbeiten

Autor*in

—
Julia Steinhart

Studiengang

Nachhaltige Entwicklungszusammenarbeit, M.A.



Masterarbeitstitel

**Die Belastung der Meere durch Plastik –
Lösungsansätze für einen umweltfreundlichen
Umgang mit Plastikabfällen**

R
TU
P

Distance and Independent
Studies Center
DISC

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung.....	1
1.1 Relevanz des Themas und Problemstellung.....	1
1.2 Aufbau und Zielsetzung.....	2
2 Plastik im Kontext von Nachhaltigkeit	3
2.1 Plastik im Spannungsfeld zwischen Innovation und Umweltauswirkungen	3
2.2 Die Rolle von Plastik in der nachhaltigen Entwicklung	5
2.3 Die quantitative Dimension der Plastikverschmutzung in den Meeren	8
3 Ursachen für die Plastikverschmutzung der Meere	12
3.1 Die unsachgerechte Entsorgung von Plastikabfällen	12
3.2 Ein unzureichender Recyclingkreislauf	14
3.3 Handel mit Plastikmüll	16
4 Auswirkungen von Plastikabfällen in Meeren	20
4.1 Ökologische Folgen von Plastik im Meer	20
4.2 Gesellschaftliche Folgen von Plastik im Meer.....	23
4.3 Ökonomische Folgen von Plastik im Meer.....	25
5 Maßnahmen zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung der Meere	28
5.1 Politische Lösungsansätze	28
5.1.1 Globales UN-Abkommen gegen Plastikmüll	28
5.1.2 Maßnahmen der EU	29
5.1.3 Lösungsansätze aus Deutschland	30
5.2 Förderung von Recycling und Kreislaufwirtschaft	32
5.2.1 Recycling von Meeresplastik	32
5.2.2 Kreislaufwirtschaft als Schlüssel zur Reduzierung von Plastikmüll.....	33

5.3	Wirtschaftliche Perspektiven und Maßnahmen zur Bekämpfung von Plastikmüll im Meer	34
5.3.1	Ein Blick auf die Rolle der Plastikindustrie	34
5.3.2	Plastikgutschriften: Ein Ansatz zur Reduktion von Plastikmüll im Meer	36
5.3.3	Reduzierung des Plastikverbrauchs.....	37
5.4	Die Rolle der Bevölkerung bei der Umsetzung von Maßnahmen	37
6	Fallbeispiel: The Ocean Cleanup	39
6.1	Design des Projektes.....	39
6.2	Ausblick auf zukünftige Maßnahmen	42
6.3	Bewertung des Projektes.....	43
7	Fazit und weiterer Forschungsbedarf.....	45
	Literaturverzeichnis.....	VI
	Eigenständigkeitserklärung	XII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Überblick über die Hauptwirbel in den Ozeanen (Quelle: Leal Filho et al., 2021)	9
Abbildung 2: Anteil des behandelten Plastiks nach Abfallwirtschaftskategorie vor Recyclingverlusten, in OECD-Ländern, Nicht-OECD-Ländern und weltweit im Jahr 2019 (Quelle: OECD, 2022a)	15
Abbildung 3: Die zehn Länder mit den höchsten Plastikmüll-Exporten weltweit im Jahr 2018 (Quelle: Nier, H., 2019)	17
Abbildung 4: Größe von System 03 (außen) im Vergleich zu System 02 (innen) (Quelle: TOC, 2023).....	40
Abbildung 5: Überblick über die Maßnahmen zum Schutz der Meerestiere in System 03 (Quelle: TOC, 2024a).....	41

Abkürzungsverzeichnis

AEPW	Alliance to End Plastic Waste
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
CEFIC	European Chemical Industry Council / Verband der Europäischen chemischen Industrie
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COVID 19	Coronavirus Disease 2019 / Coronavirus-Krankheit 2019
DNV	Det Norske Veritas - Internationale Klassifikationsgesellschaft
EU	Europäische Union
EPR	Extended Producer Responsibility / Erweiterte Herstellerverantwortung
G7	Die Gruppe der Sieben führenden Industrienationen
G20	Gruppe der Zwanzig (19 Länder und die Europäische Union)
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GPGP	Great Pacific Garbage Patch / Großer Pazifischer Müllfleck
HTL	Hydrothermale Verflüssigung
IUCN	International Union for Conservation of Nature and Natural Resources
kg	Kilogramm
KI	Künstliche Intelligenz
km ²	Quadratkilometer
MASH	Marine Animal Safety Hatch
mg	Milligramm
mm	Millimeter
m ²	Quadratmeter

NGO	Non-Governmental Organization / Nichtregierungsorganisation
nm	Nanometer
OCS	Operation Clean Sweep
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development / Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
pH-Wert	Maß für den sauren oder basischen Charakter einer wässrigen Lösung
PBDEs	Polybromierte Diphenylether
PEF	Processed Engineered Fuel
PFAS	Per- und polyfluorierte Chemikalien
PRT	Plastic Removal Technologies / Reinigungstechnologien
RDF	Refuse-Derived Fuels
SDG	Sustainable Development Goal
TOC	The Ocean Cleanup
UBA	Umweltbundesamt
µm	Mikrometer
UNEA	United Nations Environment Assembly / Umweltversammlung der Vereinten Nationen
UNEP	United Nations Environment Programme / Umweltprogramm der Vereinten Nationen
UN	United Nations / Vereinte Nationen
USD	US-Dollar
WHO	World Health Organization / Weltgesundheitsorganisation
WWF	World Wide Fund For Nature

1 Einleitung

1.1 Relevanz des Themas und Problemstellung

Plastik ist ein wichtiges Material bei der Produktion vieler Produkte. Es ist günstig herstellbar, gut formbar und bietet viele Vorteile gegenüber anderen Materialien. Jedoch werden Verpackungen, Plastiktüten und Wegwerfartikel oft nur einmal verwendet, was zu großen Mengen an Plastikabfällen weltweit führt. Obwohl diese Artikel im Alltag kurzlebig sind, dauert ihr Abbau sehr lange. Eine Plastikflasche braucht etwa 450 Jahre, um sich zu zersetzen. Die unsachgerechte Entsorgung von Plastikabfällen ist zu einem großen Problem nachhaltiger Entwicklung geworden. Dies lässt sich insbesondere in den Meeren feststellen. Plastikabfälle gelangen durch unsachgemäße Entsorgung, mangelndes Abfall- oder Abwassermanagement sowie touristische Aktivitäten über Flüsse, Niederschlagswasser und Wind in die Ozeane. Es wird geschätzt, dass aktuell etwa drei Viertel des Mülls im Meer aus Plastikabfällen bestehen, was ungefähr 140 Millionen Tonnen entspricht. Plastikabfälle verursachen erhebliche Schäden in terrestrischen und aquatischen Ökosystemen. Sowohl Makroplastik als auch Mikro- und Nanoplastik haben negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Fauna. Der Plastikmüll im Ozean hat weitreichende Folgen, die über die bloße Ästhetik hinausgehen. Er bedroht Meerestiere, die sich darin verfangen und Teile des Plastikmülls verschlucken können. Dies kann zu einer Anreicherung von giftigen Chemikalien im Organismus führen. Zudem gelangt Plastik über die Nahrungskette auch in den menschlichen Körper, die langfristigen Auswirkungen auf die Gesundheit sind noch nicht vollständig erforscht. Neben den ökologischen Schäden führen Plastikabfälle zu Navigationsschwierigkeiten für Schiffe, verursachen Einkommenseinbußen in der Tourismusbranche aufgrund verschmutzter Strände sowie Einkommensverluste bei Fischern. Des Weiteren führt die Verschmutzung der Meere ebenfalls zu hohen wirtschaftlichen Verlusten. Nur etwa 5% des Wertes von Plastikverpackungen wird recycelt, der Rest wird entsorgt. In zahlreichen Gebieten der Welt sind Plastikmüll und Abfallverschmutzung eine wachsende Herausforderung für Ökosysteme und Menschen. Auch der Export von Plastikmüll aus dem Globalen Norden und Europa in den Globalen Süden trägt zu dieser Problematik bei. Oftmals fehlt es den Ländern im Globalen Süden an Abfall- und Abwassermanagement-Systemen um den Plastikmüll sachgerecht Entsorgen zu können. Dies hat zur Folge, dass der Plastikmüll an Land über Flüsse ins Meer gespült wird. In der Agenda 2030, dem globalen Aktionsplan der Vereinten Nationen mit 17 Zielen für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs), spielt die unsachgemäße Entsorgung von Plastikabfällen eine bedeutende Rolle und beeinflusst verschiedene SDGs

direkt. Eine angemessene Trennung und Sammlung von Plastikabfällen sowie eine nachhaltige Bewirtschaftung durch die Reduzierung des Verbrauchs, Recycling und Abfallentsorgung sind entscheidend, um die Umweltauswirkungen zu minimieren.

1.2 Aufbau und Zielsetzung

Ziel dieser Masterarbeit ist es, die aktuellen Probleme und Auswirkungen der Plastikverschmutzung in den Meeren zu analysieren und darauf aufbauend Lösungsansätze für einen umweltfreundlichen Umgang mit Plastikabfällen zu entwickeln. Im Mittelpunkt steht die Frage, welche Strategien und globalen Maßnahmen erforderlich sind, um die Menge an Plastikabfällen in den Ozeanen zu reduzieren und gleichzeitig einen nachhaltigen Umgang mit Plastik zu fördern. Die Arbeit basiert auf einer systematischen Literaturrecherche und ist in sieben Kapitel gegliedert. Zu Beginn wird Plastik im Kontext der Nachhaltigkeit betrachtet, wobei sowohl die Bedeutung von Plastik für die nachhaltige Entwicklung als auch die quantitative Dimension der Plastikbelastung der Meere thematisiert werden. Im dritten Kapitel werden die Ursachen der Plastikverschmutzung näher untersucht, wie etwa unsachgemäße Entsorgung und unzureichende Recyclinginfrastrukturen. Kapitel vier widmet sich den ökologischen, gesellschaftlichen und ökonomischen Auswirkungen des Plastikmülls in den Meeren. Im weiteren Verlauf werden verschiedene Maßnahmen zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung vorgestellt, darunter politische Lösungsansätze, die Förderung von Recycling und Kreislaufwirtschaft sowie wirtschaftliche Perspektiven. Zudem wird auch die Rolle der Bevölkerung bei der Umsetzung dieser Maßnahmen beleuchtet. Ein Fallbeispiel, The Ocean Cleanup, wird im Hinblick auf Projektdesign, Bewertung und zukünftige Maßnahmen analysiert. Abschließend wird in Kapitel sieben ein Fazit gezogen, das die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit zusammenfasst und Anregungen für zukünftige Forschungsansätze zu diesem Thema bietet.

2 Plastik im Kontext von Nachhaltigkeit

Das Verhältnis zwischen Plastik und Nachhaltigkeit ist komplex und ambivalent. Einerseits stellt Plastik einen vielseitigen Werkstoff dar, der in zahlreichen Sektoren wie der Verpackungsindustrie, dem Bauwesen, der Medizin und der Hygieneindustrie unverzichtbar ist. Aufgrund seiner Eigenschaften, wie Leichtigkeit, Formbarkeit und Beständigkeit, ist es besonders vorteilhaft für Anwendungen, die eine hohe Funktionalität und Haltbarkeit erfordern. Plastik trägt daher in vielen Bereichen zur Effizienz und Wirtschaftlichkeit bei. Andererseits sind die ökologischen Herausforderungen, die mit der Verwendung von Plastik verbunden sind, erheblich. Ein zentrales Problem ist die begrenzte Recyclingfähigkeit von Plastik. Die überwiegende Mehrheit des verwendeten Plastiks kann nur eingeschränkt recycelt werden und nach ein bis zwei Recyclingzyklen ist es oft nur noch für die Verbrennung oder Deponierung geeignet. Dies wird durch die chemische Struktur des Plastiks verstärkt, das aus synthetischen Polymeren besteht, die auf Kohlenstoffverbindungen basieren und die Wiederverwertung erschweren. Infolgedessen trägt Plastik zur Umweltverschmutzung bei, insbesondere durch Einwegprodukte wie Plastiktüten und -flaschen, die in Ozeanen und auf Deponien landen und dort Hunderte von Jahren benötigen, um sich zu zersetzen. Diese Abfälle schädigen nicht nur die Tierwelt, sondern auch die gesamten Ökosysteme (Unnerstall, 2021; Holzbour, 2020).

2.1 Plastik im Spannungsfeld zwischen Innovation und Umweltauswirkungen

Plastik zeichnet sich durch Effizienz und Vielseitigkeit aus. Es ist leicht, kostengünstig, formbar und langlebig, was es zu einem idealen Material für eine Vielzahl von Produkten macht. Die kommerzielle Plastikproduktion begann in den 1950er Jahren und verzeichnete seitdem einen erheblichen Anstieg, der zur Schaffung eines globalen Marktes führte, dessen Wert 2021 auf etwa 593 Milliarden USD geschätzt wurde. Für den Zeitraum von 2021 bis 2030 wird ein weiteres Wachstum mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 3,7 % prognostiziert. Besonders in den letzten Jahren stieg die Nachfrage nach Plastikprodukten in der Industrie, da diese zunehmend als Alternativen zu Metallen und Legierungen angesehen werden. Dieses Wachstum ist auf mehrere Faktoren zurückzuführen, darunter der Produktionsprozess, die Verfügbarkeit von Rohstoffen, die steigenden Anforderungen der Endverbraucher sowie verschiedene soziopolitische Rahmenbedingungen (Sharma et al., 2023). Der Ausbruch der COVID-19-Pandemie im Jahr 2020 führte zu einem Anstieg der Nachfrage nach Plastik in der medizinischen und pharmazeutischen Industrie. Der weltweite Anstieg der COVID-19-Fälle verstärkte den Bedarf an Plastikpolymeren für Anwendungen wie Testgeräte, Beatmungsgeräte, medizinische Taschen, Handschuhe und Masken. Laut der

Weltgesundheitsorganisation (WHO) waren monatlich 76 Millionen Einweghandschuhe und 89 Millionen Masken erforderlich, um die Virusbekämpfung zu unterstützen (Sharma et al., 2023). Einweg-Plastikverpackungen machen mit rund 40 % den größten Teil des globalen Plastikverbrauchs aus. Schätzungen zufolge werden weltweit jede Minute etwa zwei Millionen Plastiktüten und eine Million Plastikflaschen verbraucht (Sharma et al., 2023).

Die Plastikindustrie hat etwa 90 % ihrer Produkte für den einmaligen Gebrauch entwickelt, was wahrnehmbare Auswirkungen auf die Umwelt hat. Schätzungen zufolge landen rund 80 % des Plastikmülls auf Deponien, wodurch jährlich bis zu 2,4 Millionen Tonnen Plastikabfälle in Gewässer gelangen. Die Beständigkeit von Plastik ist problematisch, da Plastikabfälle oft über Jahrhunderte in der Umwelt verbleiben und beim Abbau in Mikroplastik und Nanoplastik zerfallen. Diese kleinen Partikel können in die Nahrungskette gelangen und stellen potenzielle Gesundheitsrisiken für Menschen und andere Organismen dar. Auch die Emissionen von Treibhausgasen, die während unterschiedlicher Prozesse im Lebenszyklus von plastikbezogenen Produkten entstehen, stellen eine essenzielle Gefahr für die Umwelt dar, da sie zur globalen Erwärmung beitragen. Plastikprodukte werden aus fossilen Brennstoffen wie Rohöl, Gas und Kohle hergestellt. Dabei werden in jeder Phase ihres Lebenszyklus Treibhausgase freigesetzt. Zudem ist die Herstellung von Plastik sehr ressourcenintensiv, was zur Erschöpfung natürlicher Ressourcen und zur Erhöhung von Treibhausgasemissionen beiträgt – ein Aspekt, der den Zielen der Nachhaltigkeit widerspricht, die eine Reduzierung des CO₂-Ausstoßes und einen verantwortungsvollen Umgang mit Ressourcen anstreben (Sharma et al., 2023; Veith et al., 2024). Lediglich ein Viertel des weltweit produzierten Plastiks wird recycelt, was auf das Fehlen eines effektiven Abfallmanagementsystems zurückzuführen ist. Sowohl Behörden als auch die Industrie arbeiten an verschiedenen Ansätzen zur Bewirtschaftung von Plastikabfällen; jedoch tragen einige dieser Methoden zur Erhöhung der Treibhausgasemissionen bei. Insbesondere die Verbrennung von Abfällen, auch als Waste-to-Energy bezeichnet, führt zur Freisetzung erheblicher Mengen an Treibhausgasen, vor allem CO₂, sowie hochgiftiger Chemikalien (Sharma et al., 2023).

Angesichts dieser Herausforderungen gibt es jedoch auch Fortschritte in der Plastikrecyclingtechnologie und der Kreislaufwirtschaft. Viele Unternehmen arbeiten daran, geschlossene Kreisläufe zu schaffen, in denen Plastik wiederverwendet wird, um die negativen Auswirkungen zu verringern und die Nachhaltigkeit zu fördern. Die Entwicklung alternativer Materialien, wie biologisch abbaubarem Plastik, stellt einen wichtigen Schritt in Richtung einer umweltfreundlicheren Zukunft dar und kann dazu beitragen, die

Abhängigkeit von herkömmlichem Plastik zu verringern. Darüber hinaus ist ein bewusster Umgang mit Plastik entscheidend. Durch die Verwendung wiederverwendbarer Produkte und das Vermeiden von Einwegplastik kann jede Person zur Förderung der Nachhaltigkeit beitragen. Bildung und Aufklärung über die Umweltauswirkungen von Plastik sind ebenfalls essenziell, um ein stärkeres Bewusstsein und verantwortungsbewusstes Handeln zu fördern. Die Herausforderungen, die Plastik im Hinblick auf Nachhaltigkeit mit sich bringt, sind ebenso vielfältig wie die Möglichkeiten zur Verbesserung. Um die negativen Folgen von Plastik zu verringern und gleichzeitig seine Vorteile zu nutzen, ist eine Kombination aus technologischen Innovationen, politischem Engagement und einem veränderten Konsumverhalten notwendig (Sharma et al., 2023).

2.2 Die Rolle von Plastik in der nachhaltigen Entwicklung

Eine Entwicklung ist nachhaltig, wenn sie sowohl die Bedürfnisse der heutigen als auch der zukünftigen Generationen berücksichtigt. Der Begriff umfasst wissenschaftlich-technische sowie ethisch-normative Aspekte und ist von zahlreichen Konfliktpotenzialen begleitet, bietet jedoch auch viele Lösungsansätze. Im Mittelpunkt stehen dabei die Gerechtigkeit innerhalb der heutigen Generation (intragenerationelle Gerechtigkeit) sowie zwischen den Generationen (intergenerationelle Gerechtigkeit). Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Balance zwischen dem Erhalt natürlicher Ressourcen und der Förderung gesellschaftlicher sowie wirtschaftlicher Entwicklung. Ziel nachhaltiger Entwicklung ist es, alle drei Dimensionen – ökologische, soziale und ökonomische – gleichzeitig und gleichrangig anzustreben, wobei die Komplementarität dieser Dimensionen gefördert werden soll. Durch ihre wechselseitige Ergänzung können Synergieeffekte entstehen, die sowohl intra- als auch intergenerationale Gerechtigkeit unterstützen (Holzbaur, 2020; Hauff, 2022).

Die Agenda 2030, ein globaler Aktionsplan der 2015 von den Vereinten Nationen verabschiedet wurde, verfolgt das Ziel, bis 2030 eine nachhaltige Entwicklung in den Bereichen Soziales, Ökologie und Wirtschaft zu fördern. Im Zentrum stehen die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs), die ein breites Spektrum an Themen umfassen. Darunter Armutsbekämpfung, Gesundheit, Bildung, Gleichstellung der Geschlechter, Zugang zu sauberem Wasser, bezahlbare und saubere Energie, Klimaschutz sowie gerechte Arbeitsbedingungen. Die SDGs bieten eine grundlegende Orientierung und Prinzipien für eine nachhaltige Entwicklung (Holzbaur, 2020; Veith et al., 2024). Sie sind universell, miteinander verknüpft und betreffen alle Länder, unabhängig von ihrem Entwicklungsstand. Sie zielen darauf ab, sozial, wirtschaftlich und ökologisch ausgewogene Lösungen für globale Herausforderungen zu bieten. Die

Agenda 2030 fordert eine enge Zusammenarbeit zwischen den Ländern, um eine integrative Entwicklung zu fördern, die niemanden zurücklässt (Veith et al., 2024).

Die globalen Herausforderungen im Zusammenhang mit Plastikabfällen haben in den letzten Jahren zunehmend an Aufmerksamkeit gewonnen. Im Rahmen der SDGs haben die Vereinten Nationen einen klaren Leitfadens für nachhaltige Entwicklungsziele geschaffen, der auch den verantwortungsvollen Umgang mit Plastik einschließt. Plastikabfälle spielen eine zentrale Rolle in der Diskussion über nachhaltige Entwicklung und haben direkte Auswirkungen auf mehrere SDGs (Veith et al., 2024). Im Folgenden werden fünf SDGs im Zusammenhang mit Plastikabfällen betrachtet:

- **SDG 6 (Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen)** zielt darauf ab, den Zugang zu sauberem Wasser und Sanitäreinrichtungen für alle Menschen zu gewährleisten. Im Kontext von Plastikabfällen betrifft dieses Ziel insbesondere die Verschmutzung von Gewässern durch Plastikmüll, einschließlich Mikroplastik. Plastikabfälle, die in Flüsse, Seen und Ozeane gelangen, verschlechtern die Wasserqualität und gefährden die aquatische Umwelt sowie die Gesundheit von Menschen und Tieren. Die Reduktion von Plastikabfällen und eine verbesserte Abfallentsorgung tragen entscheidend zur Realisierung dieses Ziels bei, indem sie helfen, die Wasserressourcen zu schützen und die Verschmutzung durch Plastikmüll zu minimieren.
- **SDG 11 (Nachhaltige Städte und Gemeinden)** zielt darauf ab, Städte und Siedlungen inklusiver, sicherer, widerstandsfähiger und nachhaltiger zu gestalten. Im Zusammenhang mit Plastikabfällen bedeutet dies, dass Städte Strategien entwickeln müssen, um die Verschmutzung durch Plastik zu reduzieren, Abfallmanagementsysteme zu verbessern und die Wiederverwertung von Plastik zu fördern. Die Reduktion von Plastikabfällen trägt zur Verringerung von Umweltverschmutzung bei, schützt öffentliche Räume und verbessert die Lebensqualität der Stadtbewohner. Eine nachhaltige städtische Entwicklung umfasst zudem die Förderung von Kreislaufwirtschaftsmodellen, die es ermöglichen, Plastikabfälle zu recyceln und wiederzuverwenden, anstatt sie in Deponien oder der Umwelt zu entsorgen.
- **SDG 12 (Nachhaltiger Konsum und Produktion)** fordert eine ressourcenschonendere und umweltfreundlichere Gestaltung von Produktions- und Konsumprozessen. Im Kontext von Plastikabfällen bedeutet dies, den Verbrauch von Einwegplastik zu reduzieren, nachhaltigere Alternativen zu fördern und das Recycling von Plastikmaterialien zu verbessern. Ziel ist es, Abfallmengen zu verringern

und die Lebensdauer von Produkten durch Kreislaufwirtschaftsmodelle zu verlängern, wodurch Plastikabfälle minimiert und die Umweltbelastung reduziert werden. Eine nachhaltige Produktion und verantwortungsvoller Konsum tragen somit maßgeblich dazu bei, Plastikabfälle zu verringern und die Ressourcen effizienter zu nutzen.

- **SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz)** zielt darauf ab, den Klimawandel zu bekämpfen und die globalen Klimamaßnahmen zu verstärken. Im Zusammenhang mit Plastikabfällen spielt die Reduzierung von Plastik eine wichtige Rolle, da die Produktion und Entsorgung von Plastik erhebliche Treibhausgasemissionen verursachen. Die Herstellung von Plastik aus fossilen Brennstoffen trägt direkt zur Erhöhung des CO₂-Ausstoßes bei. Plastikabfälle, die auf Mülldeponien landen oder verbrannt werden, setzen ebenfalls schädliche Gase frei. Durch die Verringerung des Plastikverbrauchs, die Förderung von Recycling und die Entwicklung umweltfreundlicherer Alternativen kann der CO₂-Fußabdruck der Plastikproduktion gesenkt und ein Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden.
- **SDG 14 (Leben unter Wasser)** zielt darauf ab, die Ozeane, Meere und marinen Ressourcen zu schützen und nachhaltig zu nutzen. Plastikabfälle stellen eine der größten Bedrohungen für die Meeresumwelt dar, da sie in Gewässer gelangen und die Lebensräume von Meerestieren verschmutzen. Insbesondere Mikroplastik, das von größeren Plastikstücken abgebaut wird, wird von Meereslebewesen aufgenommen und kann in der Nahrungskette landen. Die Reduzierung von Plastikabfällen und die Verbesserung des Abfallmanagements sind daher entscheidend, um die Verschmutzung der Meere zu verringern, die biologische Vielfalt zu schützen und die Gesundheit mariner Ökosysteme zu fördern (UN, 2024; Veith et al., 2024).

Um Plastik nachhaltig in die Entwicklung zu integrieren, ist eine umfassende Transformation erforderlich. Dazu gehören die Reduktion und Vermeidung von Einwegplastik durch politische Maßnahmen wie Verbote und die Förderung biologisch abbaubarer Alternativen. Zudem spielt die Förderung von Recycling und Kreislaufwirtschaft eine zentrale Rolle, um Plastik in den Produktionskreislauf zurückzuführen und den Bedarf an fossilen Rohstoffen zu verringern. Darüber hinaus werden zunehmend nachhaltigere Materialalternativen wie biobasierte Stoffe entwickelt, die weniger Umweltschäden verursachen. Eine ordnungsgemäße Sammlung und nachhaltige Bewirtschaftung von Plastikabfällen kann ebenfalls dazu beitragen, das Produktionsvolumen und die Emissionen

von Plastik zu senken. Dies kann einen positiven Beitrag zur Erreichung der Nachhaltigkeits-Ziele leisten (Veith et al., 2024).

2.3 Die quantitative Dimension der Plastikverschmutzung in den Meeren

Im Jahr 2022 betrug die weltweite Plastikproduktion etwa 400 Millionen Tonnen. In den letzten fünf Jahrzehnten haben sich rund fünf Milliarden Tonnen Plastikabfälle auf Depo-nien oder in der Umwelt angesammelt (Dos Passos et al., 2024). Fast zwei Drittel der Plastikabfälle stammen aus Plastiken mit einer Lebensdauer von weniger als fünf Jah-ren, wobei 40 % aus Verpackungen, 12 % aus Konsumgütern und 11 % aus Kleidung und Textilien stammen (OECD, 2022a). Jährlich gelangen 5 bis 13 Millionen Tonnen Plastikmüll vom Land in die Ozeane. Dieser Plastikmüll ist global in Küstengebieten, Flussmündungen, flachen Küstenregionen, Schelfgebieten sowie in den tiefsten Teilen des Ozeans zu finden. Aufgrund der globalen Ozeanzirkulation sammeln sich schwimm-fähige Plastikpolymere in den Oberflächengewässern großer Ozeanwirbel. Etwa 5,25 Billionen Plastikpartikel mit einem Gesamtgewicht von rund 269.000 Megatonnen treiben auf der Meeresoberfläche, mit Konzentrationen von bis zu 580.000 Partikeln pro km². Der Transport von Plastikmüll in die Ozeane steht in direktem Zusammenhang mit der globalen Produktion, der schnellen Entsorgung nach einmaligem Gebrauch und der mangelhaften Abfallbewirtschaftung. Angesichts der prognostizierten Zunahme der Plas-tikproduktion und der unzureichenden Entsorgungsstrategien wird erwartet, dass sich die Menge an Plastikabfällen in der Umwelt bis 2050 verdoppeln wird (Hohn et al., 2020). In der Plastikforschung erfolgt die Einteilung von Plastik anhand seiner Größe in die Ka-tegorien Makro-, Meso-, Mikro- und Nanoplastik. Makroplastik bezieht sich auf größere Plastikgegenstände, die einen Durchmesser von mehr als 2,5 cm aufweisen, wie etwa Einkaufstüten. Mesoplastik umfasst Objekte mit einer Größe von mehr als 5 mm. Mikro-plastik bezeichnet Plastikpartikel, die kleiner als 5 mm sind, während Nanoplastik noch kleinere Partikel umfasst, die weniger als 100 nm groß sind. Obwohl diese Größenklas-sifikationen weitgehend akzeptiert sind, existieren auch abweichende Definitionen (Hengstmann & Tamminga, 2022).

Wenn Plastik in die Ozeane gelangt, wird es durch die zirkulierenden Strömungen oft auf den Meeresboden transportiert. Je nach Dichte schwimmt ein Teil des Abfalls an der Oberfläche, wo er von den Strömungen in die großen Müllwirbel der Subtropen getragen wird. Abbildung 1 bietet einen schematischen Überblick über die weltweiten Wirbel. Es gibt sechs bedeutende Wirbel: den Nordatlantikwirbel, den Südatlantikwirbel, den Ost-pazifikwirbel, den Nordpazifikwirbel, den Südpazifikwirbel und den Indischen Ozeanwir-bel (Leal Filho et al., 2021). In den Meereswirbeln entstehen sogenannte Ozean-

Müllflecken (Garbage Patch), in denen sich Müll ansammelt. Dieser Prozess wird durch Meeresströmungen bedingt, die das Ozeanwasser global zirkulieren lassen. Neben der Zirkulation des Wassers fördern diese Strömungen auch den Transport von Meeresmüll, insbesondere von festen Abfällen, die aus Küstenregionen eingetragen werden (Leal Filho et al., 2021; Dos Passos et al., 2024).

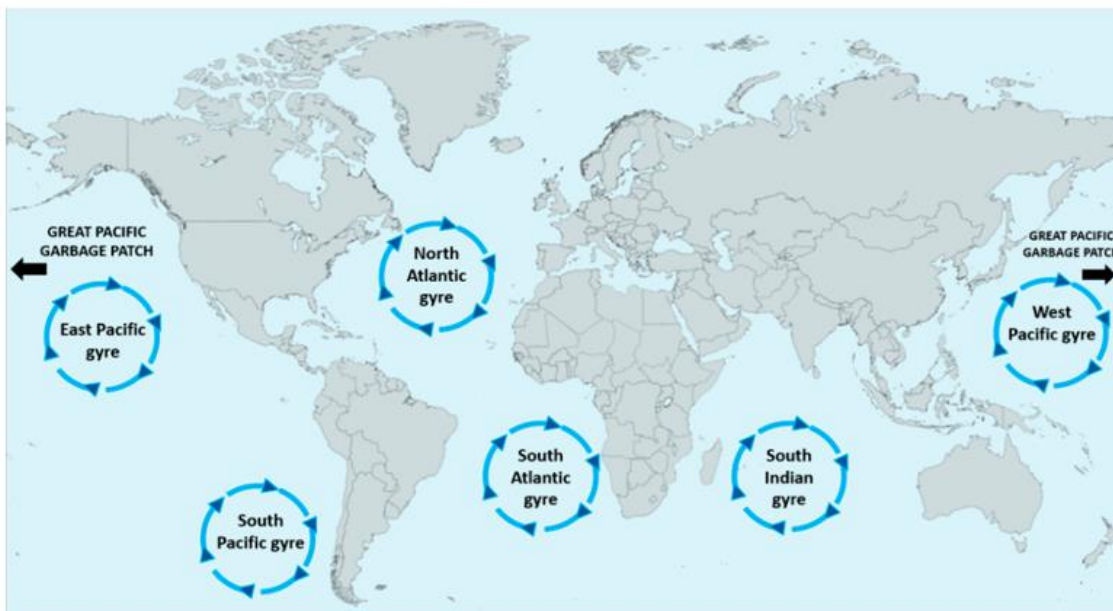


Abbildung 1: Schematischer Überblick über die Hauptwirbel in den Ozeanen (Quelle: Leal Filho et al., 2021)

Der größte Müllfleck der Welt ist der Große Pazifische Müllfleck (Great Pacific Garbage Patch), der sich im nordpazifischen Wirbel befindet. Mit einer geschätzten Fläche von 1,6 Millionen km² ist er etwa dreimal so groß wie Frankreich. Der Fleck besteht derzeit aus schätzungsweise 80.000 Tonnen Trümmern, was einer Dichte von 50 kg/km² oder 50 mg/m² entspricht. Studien haben gezeigt, dass mehr als 75 % des Mülls in diesem Gebiet aus Trümmern mit einer Größe von mehr als 5 cm bestehen. Zudem wurde festgestellt, dass mindestens 46 % des Mülls von Fischernetzen und Fanggeräten stammen. Ein erheblicher Teil des Plastikmülls in der Region besteht außerdem aus Mikroplastik. Die Verschmutzung in diesem Gebiet wächst offenbar schneller als in den umliegenden Regionen. Der südpazifische Müllfleck, der sich in den südpazifischen Wirbeln befindet, erstreckt sich schätzungsweise über rund 2,6 Millionen km². Der Müll konzentriert sich dabei stärker im Zentrum des Wirbels als an den Rändern. Aufgrund der intensiveren Fischereiaktivitäten in dieser Region enthält der Müll einen erheblichen Anteil an Angelschnüren und Netzen. Da diese Materialien in kleinere Fragmente zerfallen sind, setzt sich der Müll überwiegend aus Mikroplastik zusammen (Leal Filho et al., 2021). Der nordatlantische Müllfleck, der größte seiner Art in der Region, wurde 1976 entdeckt und

befindet sich im nordatlantischen Wirbel. Seine genaue Größe ist unbekannt, jedoch wird geschätzt, dass er sich über Hunderte von Kilometern erstreckt. Im Vergleich zum bekannteren Nordpazifikfleck enthält dieser Fleck eine höhere Konzentration an Müll pro km². Der Müllfleck im Indischen Ozean, der sich im entsprechenden Wirbel befindet, hat eine geschätzte Ausdehnung von 2,1 bis 5,0 Millionen km². Trotz der ständigen Bewegung des Mülls und der Gegenströmung wird der Müllfleck als ein verschwindendes Gebiet beschrieben, dessen Größe laut Computermodellen nicht weiter zunehmen dürfte. Der südatlantische Plastikwirbel enthält den kleinsten der fünf Müllflecken, dessen Größe etwa 0,7 Millionen km² beträgt. Studien zeigen, dass Flaschen aus Asien die größte Müllquelle in diesem Gebiet sind. Besonders Flaschen, die auf der Inselgruppe Tristan da Cunha landeten, gelten als Hauptursache des Müllflecks, was hauptsächlich auf das Abladen solcher Flaschen durch Schiffe zurückzuführen ist (Leal Filho et al., 2021, Lebreton, 2022). Die zentralen Bereiche der Müllflecken weisen eine höhere Dichte auf und enthalten den größten Teil der Masse im Vergleich zu den weniger dichten Rändern. Daher konzentrieren sich die Versuche zur Quantifizierung der Müllfleckenmasse hauptsächlich auf diese zentralen Regionen. Die genaue Bestimmung der Größe der Müllflecken bleibt jedoch aufgrund der kontinuierlichen Bewegung des Mülls durch Meeresströmungen und Winde eine komplexe Herausforderung. Seit dem Frühjahr 2020 ist zudem ein neues Element hinzugekommen: gebrauchte Gesichtsmasken (Leal Filho et al., 2021).

Nicht nur die Ozeane weltweit sind von der zunehmenden Plastikverschmutzung betroffen. Auch europäische Gewässer, wie das Mittelmeer, gehören zu den am stärksten belasteten Gewässern der Erde. Im Mittelmeer sind die Plastikanteile ähnlich hoch wie in den ozeanischen Müllstrudeln. Obwohl das Mittelmeer nur etwa 1% der weltweiten Gewässer ausmacht, enthält es rund 7% des globalen Mikroplastiks. Aufgrund seiner fast vollständigen Umrandung durch drei Kontinente ist der Austausch von Wasser und Plastik mit den offenen Weltmeeren sehr begrenzt. Dadurch sammelt sich das Plastik immer weiter an, und das Mittelmeer entwickelt sich zur Plastikdeponie Europas. Auch in anderen europäischen Meeren sind hohe Konzentrationen von Plastik zu finden. In der Nordsee wurden im Durchschnitt 11 kg Müll pro km² festgestellt (HBS & BUND, 2019).

Die weltweite Plastikproduktion, die 2019 etwa 368 Millionen Tonnen betrug, wird bis 2050 voraussichtlich 34 Milliarden Tonnen erreichen, was zu einem weiteren Anstieg der Müllberge führen wird. Eine konservative Schätzung geht von einem jährlichen Anstieg von 2,5 % aus, basierend auf früheren Trends. Die Plastikverschmutzung der Meere wächst in Asien schneller als in Nordamerika, betrifft jedoch die gesamte Welt. Die

zunehmende Produktion und Nutzung von Plastik könnte die Größe der Müllwirbel weiter vergrößern. Dieser Trend verdeutlicht die Dringlichkeit, Maßnahmen zur Reduktion von Plastikmüll in den Ozeanen zu ergreifen (Leal Filho et al., 2021; Hohn et al., 2020).

3 Ursachen für die Plastikverschmutzung der Meere

Die Plastikverschmutzung der Meere stellt ein globales Problem dar, das ungleichmäßig über die Ozeane verteilt ist und nahezu alle Meeresregionen betrifft. Geografische Bedingungen und Meeresströmungen fördern die Ansammlung von Plastikmüll, insbesondere in den großen Ozeanwirbeln, auch als „Müllflecken“ bekannt. Dort sammeln sich große Mengen schwimmenden Plastiks durch Strömungen und Windmuster (Tekman et al., 2022). Die Ursachen der Plastikverschmutzung variieren je nach Region. Im Mittelmeer stammt der größte Teil des Mülls aus dem Tourismus entlang der Küsten, während in der Nordsee 40 % des Plastiks durch die maritime Industrie, Schifffahrt und Fischerei verursacht werden. An der Ostsee hingegen ist der Müll ebenfalls auf den Tourismus an den Stränden zurückzuführen. Der überwiegende Teil des Plastikmülls in den Ozeanen hat seinen Ursprung an Land. Ein wesentliches Problem ist das Fehlen ausreichender oder sicherer Entsorgungsmöglichkeiten in vielen Ländern. In Regionen mit mangelndem Abfallmanagement greifen die Menschen oft auf illegale Müllablagerungen, das Verbrennen von Abfällen oder die Entsorgung von Müll direkt in die Natur zurück. Dadurch gelangt Plastikmüll, auch aus abgelegenen Gebieten, über Flüsse in die Meere. Besonders große Flüsse wie der Yangtze, der Indus und der Nil tragen wesentlich dazu bei, dass mehr als 90 % des weltweiten Plastikmülls über Flüsse in die Ozeane transportiert wird (GEOMAR, 2024; HBS & BUND, 2019; Tekman et al., 2022). Auch Mikroplastik aus Kosmetikprodukten und synthetischer Kleidung wird in den meisten Kläranlagen nicht vollständig herausgefiltert, was zu einer fortschreitenden Kontamination von Gewässern führt. Darüber hinaus trägt die Zunahme extremer Wetterereignisse wie Wirbelstürme, Sturmfluten und Tsunamis dazu bei, dass Müll und Trümmer in die Meere gelangen. Weitere Faktoren, die das Problem verschärfen, sind verlorene Ladungen und Schiffsausrüstungen sowie absichtlich auf See entsorgte Fischernetze und Angelleinen. Die illegale Entsorgung von Müll auf See stellt einen erheblichen Beitrag zur globalen Umweltbelastung dar (GEOMAR, 2024). Im Folgenden werden die Ursachen der Plastikverschmutzung in den Meeren analysiert, mit besonderem Schwerpunkt auf der unsachgemäßen Entsorgung von Plastikabfällen, dem Fehlen geeigneter Recyclinganlagen und dem Export von Plastik in andere Länder.

3.1 Die unsachgerechte Entsorgung von Plastikabfällen

Das zentrale Problem der Plastikverschmutzung ist die Anhäufung von Plastikabfällen, die weder effektiv recycelt noch richtig entsorgt werden, da sie im Abfallmanagement keine angemessene Behandlung erhalten. Dies zeigt sich in unzureichender oder fehlender Abfallsammlung, mangelnder ordnungsgemäßer Deponierung sowie

unzureichender stofflicher oder energetischer Verwertung (Unnerstall, 2021; Orth et al., 2022). Der Plastikmüll in den Ozeanen entsteht hauptsächlich durch unsachgemäße Entsorgung in Küstennähe oder durch die Lagerung von Abfällen auf ungeschützten Deponien. Ein Teil des Mülls gelangt durch Wind und Regen direkt oder über Flüsse ins Meer (Unnerstall, 2021). Die falsche Entsorgung von Plastikabfällen stellt die Hauptursache für die Freisetzung von Makroplastik dar. Im Jahr 2019 gelangten allein 22 Millionen Tonnen Plastik in die Umwelt (OECD, 2022a). Das zugrunde liegende Problem ist vor allem die unzureichende Abfallbehandlung, wobei der Grad der Problematik von Land zu Land und Region zu Region unterschiedlich ist. Abhängig vom Entwicklungsstand der Abfallentsorgungssysteme sowie von wirtschaftlichen, politischen oder gesellschaftlichen Strukturen (Unnerstall, 2021; Orth et al., 2022). Auch sozio-kulturelle Faktoren, wie spezifische Verhaltensweisen und Traditionen, spielen eine wesentliche Rolle. Von besonderer Bedeutung sind die fehlenden Anreize für private Haushalte oder gewerbliche Endverbraucher, ein nachhaltiges Verhalten zu entwickeln. In Ländern mit schnell wachsenden Mittelschichten, wie etwa China oder Vietnam, führt der damit einhergehende Anstieg des Konsums von Plastikprodukten und -verpackungen in Verbindung mit einer unzureichenden Abfallinfrastruktur zu erheblichen Problemen (Orth et al., 2022). Zwei Merkmale von Plastik, die zunächst als vorteilhaft betrachtet wurden, erweisen sich dabei als problematisch: Zum einen ist es leicht, wodurch es durch Wind oder Wasser leicht in Flüsse und Ozeane gelangen kann. Zum anderen ist es äußerst widerstandsfähig, was bedeutet, dass es über Jahrzehnte bis Jahrhunderte nur sehr langsam abgebaut wird (Unnerstall, 2021).

In zahlreichen Entwicklungsländern wird weniger als die Hälfte des Abfalls effektiv erfasst und in vielen ländlichen Gebieten gibt es überhaupt keine Abfallentsorgung. Weltweit haben mindestens zwei Milliarden Menschen keinen Zugang zu einer geregelten Müllabholung. Schätzungen zufolge verbleiben jährlich rund 79 Millionen Tonnen Plastikabfälle unkontrolliert, wobei 34 Millionen Tonnen auf illegalen Deponien landen und 26 Millionen Tonnen durch offene Verbrennung entsorgt werden (WWF, 2023). Die offene Verbrennung von Müll, einschließlich Plastikabfällen, setzt große Mengen an Schadstoffen frei, die die Umwelt belasten und die Gesundheit der Menschen gefährden. In einigen Ländern übernehmen vorwiegend Menschen aus den ärmsten Bevölkerungsschichten die Sammlung von Abfällen, wobei sie etwa 20 % bis 30 % des gesamten Mülls einsammeln und diesen als Rohstoff weiterverkaufen. Weltweit sind schätzungsweise rund 15 Millionen Menschen in diesem informellen Sektor tätig. Allerdings ist die Sammlung von Plastikabfällen in vielen Fällen wirtschaftlich nicht rentabel, da etwa 80 % dieser Abfälle von so geringer Qualität sind, dass sie keinen nennenswerten Wert haben. 75 % des

Plastikmülls, der in die Ozeane gelangt, stammt aus Abfällen, die nie eingesammelt wurden. Die verbleibenden 25 % wurden zwar gesammelt, jedoch entweder illegal entsorgt oder unsachgemäß deponiert. Ein erheblicher Teil dieses Mülls wurde in Flussnähe gelagert oder direkt über Flüsse in die Meere abgeleitet (WWF, 2023).

3.2 Ein unzureichender Recyclingkreislauf

Der gegenwärtige Lebenszyklus von Plastik ist hinsichtlich einer Kreislaufwirtschaft noch unvollständig. Weltweit hat sich die jährliche Produktion von Plastik in den letzten zwei Jahrzehnten mehr als verdoppelt, im gleichen Zeitraum ist auch die Menge des Plastikabfalls erheblich gestiegen (OECD, 2022a). Im Jahr 2018 wurden weltweit etwa 250 Millionen Tonnen Plastikabfälle erzeugt, von denen rund 200 Millionen Tonnen nicht in den Recyclingkreislauf integriert wurden. Etwa 75 Millionen Tonnen landeten ungeordnet in der Umwelt, 75 Millionen Tonnen wurden ordnungsgemäß deponiert, und 50 Millionen Tonnen fanden in der energetischen Verwertung Anwendung. Lediglich rund 50 Millionen Tonnen wurden dem Recyclingprozess zugeführt (Orth et al., 2022). Im Jahr 2018 gelangten in der EU etwa 51 Millionen Tonnen Plastik in den Markt, von denen rund 29 Millionen Tonnen als Plastikabfälle erfasst wurden, was einem Anteil von 57 % entspricht. Etwa 22 Millionen Tonnen wurden nicht erfasst und verbleiben – abhängig vom Lebenszyklus der jeweiligen Produkte – im Gebrauch oder gelangen direkt in die Umwelt. Ungefähr 1 Millionen Tonnen Plastikabfälle wurden 2018 in der EU nicht ordnungsgemäß entsorgt. Von den in der EU erfassten 29 Millionen Tonnen Plastikabfällen wurden 42,6 % energetisch verwertet, 32,5 % werkstofflich recycelt und 24,9 % deponiert. Es ist ein deutliches Gefälle in der Abfallbehandlung zu beobachten: In Mittel- und Nordeuropa, wo die Deponierate nahezu bei 0 % liegt, erfolgt eine weitaus höhere Verwertungsquote im Vergleich zu den Regionen im Osten, Süden und Westen der EU, wo noch bis zu 75 % des Plastikabfalls deponiert werden (OECD, 2022a; Orth et al., 2022).

Die EU-Länder sowie China, Indien, Japan und Korea weisen überdurchschnittlich hohe Recyclingraten auf. In Europa, Japan und Korea sind umfangreiche Systeme zur getrennten Sammlung und erweiterte Herstellerverantwortung entscheidend für das Recycling. In anderen Regionen der Welt spielt die informelle Wirtschaft eine wichtige Rolle, da das Recycling durch den Wert bestimmter Plastikarten gefördert wird. Regionale Wirtschaftsfaktoren beeinflussen sowohl die Menge der zum Recycling gesammelten Plastikabfälle als auch die Prozessverluste beim Recycling. Weltweit gehen fast 40 % der gesammelten Plastikabfälle, also rund 22 Millionen Tonnen, während des Recyclings verloren und enden in der Verbrennung, auf Deponien oder werden falsch verwaltet. Besonders in Ländern mit staatlich finanzierten, kostenlosen Abfallsystemen werden oft

große Mengen an nicht verwertbaren Plastikabfällen und Nicht-Plastikabfällen gesammelt, die dann als Verluste gezählt werden. In informellen Abfallsystemen sammeln Müllsammelner hingegen gezielt wertvolle Plastikabfälle, um Verluste zu minimieren und den maximalen Preis zu erzielen. Dadurch gibt es erhebliche regionale Unterschiede beim Recycling in Bezug auf Menge und angewandte Praktiken (OECD, 2022a). Wie Abbildung 2 verdeutlicht, wurde 2019 weltweit nahezu die Hälfte des Plastikmülls auf Deponien entsorgt. Lediglich 15 % der Abfälle wurde zum Recycling gesammelt, während der verbleibende Teil unsachgemäß entsorgt oder verbrannt wurde. Die Anzahl des Plastikmülls, der für das Recycling gesammelt wurde, unterscheidet sich zwischen Ländern, die der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung angehören (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) und Nicht-OECD Ländern kaum. In OECD-Ländern wurde jedoch über drei Viertel des Plastiks deponiert oder verbrannt. Die Unsachgemäße Entsorgung des Abfalls war mit 6 % sehr gering. Im Gegensatz dazu war die unsachgemäße Entsorgung in Nicht OECD-Ländern, wie Afrika, Asien und Lateinamerika dreimal so hoch (OECD, 2022a).

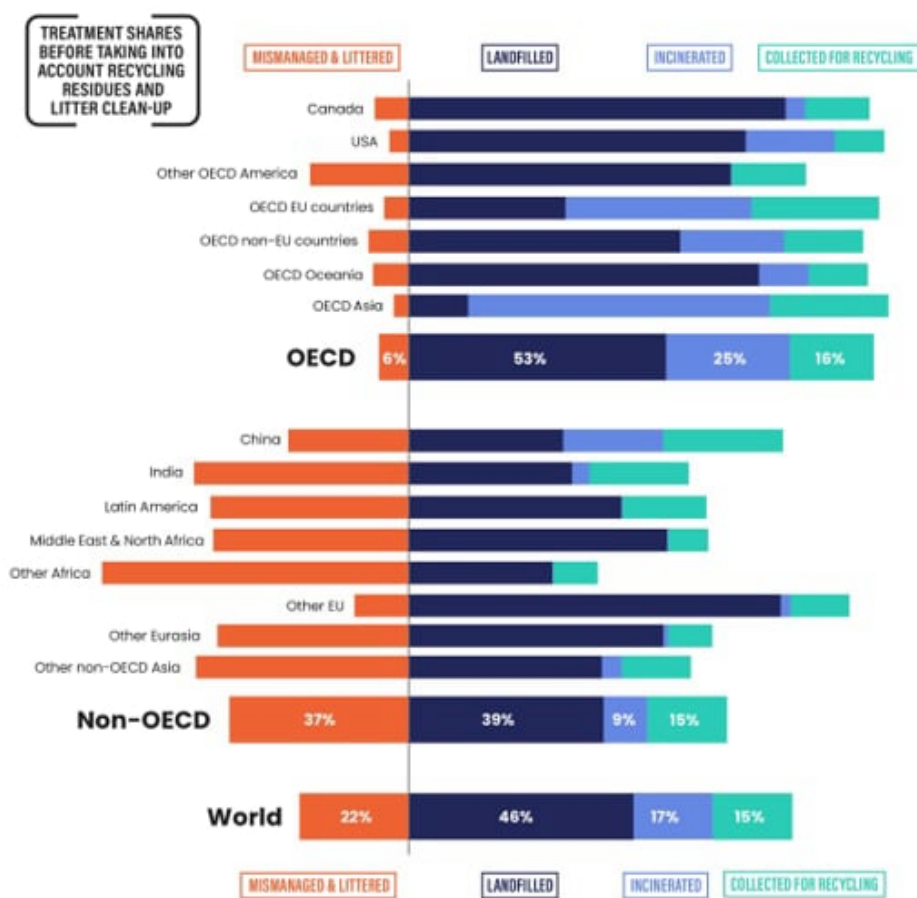


Abbildung 2: Anteil des behandelten Plastiks nach Abfallwirtschaftskategorie vor Recyclingverlusten, in OECD-Ländern, Nicht-OECD-Ländern und weltweit im Jahr 2019 (Quelle: OECD, 2022a)

Fast die Hälfte der weltweit erzeugten Plastikabfälle stammt aus den OECD-Ländern. Die Menge an Plastikabfällen pro Person variiert dabei erheblich, von 221 kg jährlich in den Vereinigten Staaten über 114 kg in den europäischen OECD-Staaten bis hin zu 69 kg in Japan und Korea. Die Unterschiede in den Abfallbewirtschaftungskapazitäten hängen oft von Vorschriften, geografischen und demografischen Faktoren sowie anderen Variablen ab. In einkommensschwachen Ländern kann das Wirtschaftswachstum die Verbesserung der Sammel- und Entsorgungskapazitäten überholen, was zu einer Zunahme von unsachgemäß bewirtschafteten Abfällen führt. Gleichzeitig ermöglichen in diesen Ländern niedrige Arbeitskosten eine kostengünstige Sammlung und Sortierung von Wertstoffen durch Handarbeit. Die Herausforderungen der Abfallbewirtschaftung variieren daher je nach Entwicklungsstand der Länder (OECD, 2022a).

In vielen Ländern des globalen Südens ist das Bevölkerungswachstum eng mit einem überproportionalen Anstieg der Abfallmengen verknüpft. In Ländern mit niedrigem Einkommen ist der Plastikverbrauch zwar geringer, was auch zu weniger Emissionen führt, jedoch bleibt die Abfallentsorgung häufig unzureichend. Der Großteil der Plastikemissionen stammt jedoch aus Ländern mit mittlerem Einkommen, in denen der Plastikverbrauch steigt, jedoch geeignete Abfallmanagementsysteme fehlen, was die Bewältigung der steigenden Abfallmengen erschwert. Es wird prognostiziert, dass bis zum Jahr 2050 jährlich 3,88 Millionen Tonnen Abfall produziert werden. Hierbei stehen das Bevölkerungswachstum und die wirtschaftliche Entwicklung in direktem Zusammenhang. Dabei fällt auf, dass hochentwickelte Länder, die nur 16 % der Weltbevölkerung ausmachen, mehr als ein Drittel des globalen Abfalls erzeugen. Gleichzeitig erreichen diese Länder eine Recyclingrate von 30 %, während im globalen Süden nur etwa 4 % des Abfalls einer Wiederverwertung zugeführt werden (Hauff, 2024).

3.3 Handel mit Plastikmüll

Der Handel mit Plastikmüll wird im globalen Abfallmanagement immer bedeutender, stellt jedoch zugleich ein wachsendes Problem dar. Viele Länder recyceln einen erheblichen Teil ihres Plastikmülls nicht selbst, sondern exportieren ihn in Drittländer. Dieser Handel umfasst den Export von Plastikabfällen aus Industrieländern vorwiegend in Entwicklungsländer und den damit verbundenen Recyclingprozess. Viele Industrieländer, darunter die USA, Deutschland und Japan, exportieren große Mengen an Plastikmüll, um die Kapazitäten ihrer eigenen Recyclinganlagen zu entlasten und die Abfallbewirtschaftung zu optimieren. Abbildung 3 veranschaulicht, dass Japan im Jahr 2018 926.000 Tonnen Plastik exportierte, gefolgt von den USA mit mehr als 811.000 Tonnen. Deutschland exportierte rund 701.000 Tonnen weltweit.

Die größten Plastikmüll-Exporthändler

Länder mit den höchsten Plastikmüll-Exporten weltweit 2018 (in Tonnen)

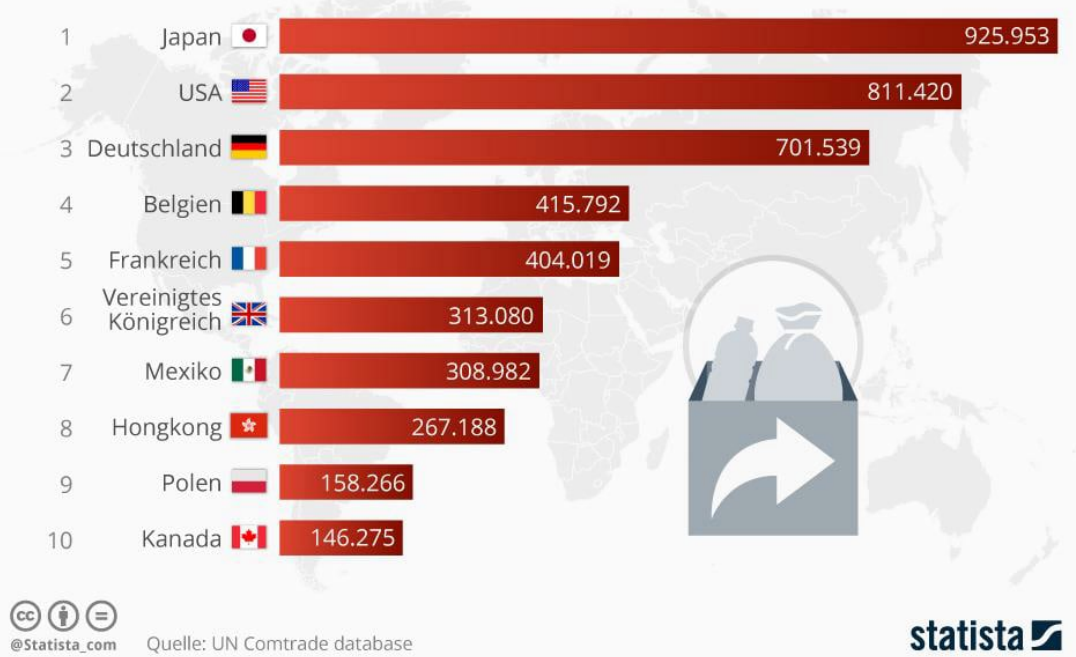


Abbildung 3: Die zehn Länder mit den höchsten Plastikmüll-Exporten weltweit im Jahr 2018 (Quelle: Nier, H., 2019)

Beim Export wird nicht zwischen recycelbarem und nicht recycelbarem Plastik unterschieden, was dazu führt, dass in Empfängerländern oft Abfälle ankommen, die vor Ort nicht verarbeitet werden können. Es wird zunehmend kritisiert, dass exportierte Plastikabfälle in den Zielländern häufig unsachgemäß entsorgt werden, was zu erheblichen ökologischen und sozialen Schäden führt. (Hauff, 2024; WWF, 2023).

Deutschland belegt den ersten Platz unter den größten Plastikproduzenten und -verarbeitern in Europa. Europa ist der zweitgrößte Plastikproduzent weltweit hinter China. Zudem recycelt Deutschland einen erheblichen Teil seines Plastikmülls nicht selbst, sondern exportiert ihn in Drittländer, hauptsächlich nach Asien. Dort wird der Müll oft verbrannt oder, wenn er nicht auf Deponien landet, im Meer entsorgt. Bis Januar 2018 stellte China das primäre Ziel für den Export von Plastikabfällen dar, wobei insbesondere die G7-Staaten ihre Abfallmengen dorthin verlagerten. Seit 1988 wurde rund die Hälfte des weltweit produzierten Plastikmülls nach China exportiert (HBS & BUND, 2019; WWF 2023). Nicht recycelbare Plastikabfälle wurden in China häufig in Müllverbrennungsanlagen, auf Mülldeponien oder auf wilden Deponien entsorgt, was zu erheblichen ökologischen und sozialen Schäden führte. Diese Problematik führte dazu, dass China seine Importbestimmungen für Abfallmaterialien stark verschärfte. In der Folge kam es zu einer

deutlichen Verschiebung der Plastikmüllströme in andere Länder. Die Exportländer begannen, einen zunehmenden Teil ihrer Plastikabfälle nach Südostasien zu verschiffen, insbesondere nach Thailand, Vietnam, Malaysia und Indonesien. Im ersten Quartal des Jahres 2018 stiegen die Importe nach Thailand im Vergleich zum gleichen Zeitraum im Jahr 2017 um nahezu das 70-fache, während die Importe nach Malaysia sich um das Sechsfache erhöhten. Gleichzeitig verzeichnete China einen Rückgang der Importe um 90 % (HBS & BUND, 2019; WWF, 2023). Die enorme Menge an Müllimporten führte zu einem Anstieg illegaler Recyclingaktivitäten in den Importländern. Im Mai 2018 musste ein großes vietnamesisches Schiffterminal die Annahme von Abfall stoppen, nachdem sich über 8.000 Container mit Plastik- und Papiermüll angesammelt hatten. In Malaysia wurden 40 illegale Recyclingfabriken entdeckt, die giftige Abwässer in Gewässer einleiteten und die Luft mit Schadstoffen belasteten. Auch in Thailand wurden bei einer Razzia 58 Tonnen illegaler Plastikmüll beschlagnahmt. Aufgrund der erheblichen Umwelt- und Gesundheitsrisiken schränkten viele Einfuhrländer ihre Importe ein oder verboten diese ganz. So kündigte Thailand im Juni 2018 ein Importverbot für Plastikmüll an, während Vietnam den Import von Juni bis Oktober desselben Jahres pausierte. Malaysia führte ein neues Genehmigungsverfahren ein und Indonesien reduzierte die Einfuhr von nicht recycelbaren Abfällen. Viele Exportländer reagieren auf die verschärften Importbestimmungen, indem sie recycelbare Abfälle zunehmend auf Mülldeponien entsorgen oder in Verbrennungsanlagen verarbeiten. In Großbritannien und Nordirland sowie in den USA werden große Mengen ursprünglich für das Recycling vorgesehenes Plastik verbrannt. Auch in Australien wird die Förderung von Müll-zu-Energie-Anlagen vorangetrieben, obwohl diese hohe Treibhausgasemissionen verursachen. Die Müllverbrennung setzt schädliche Substanzen wie Kohlenmonoxid, Stickoxide und Dioxine frei, die mit ernsthaften Gesundheitsproblemen wie Krebs und Atemwegserkrankungen in Verbindung stehen. Zudem kontaminiert die entstehende Asche Böden und Gewässer. Angesichts des steigenden Plastikmülls stellt die Verbrennung in nahegelegenen Anlagen eine erhebliche Gefahr für die umliegenden Gemeinden dar (HBS & BUND, 2019).

In den letzten sechs Jahren ist das globale Exportvolumen von Plastikabfällen jedoch um fast 49 % gesunken, von 12,4 Millionen Tonnen im Jahr 2017 auf 6,3 Millionen Tonnen im Jahr 2022. Der Rückgang war zwischen 2021 und 2022 mit 4,9 % stärker als im Vorjahr (1,9 %). Immer mehr Handel findet innerhalb der OECD-Staaten statt, vor allem in Europa und Nordamerika. Der Handel innerhalb dieser Regionen übersteigt mittlerweile die Exporte in andere Teile der Welt (Park et al., 2024).

Der Handelsüberschuss der OECD-Staaten, also die Differenz zwischen Exporten und Importen, ging zurück. Weniger Plastikabfälle wurden in Nicht-OECD-Staaten exportiert, doch einige südostasiatische Länder, wie Malaysia, bleiben weiterhin wichtige Zielmärkte. Innerhalb der OECD-Staaten stieg der Handel mit hochwertigeren und besser recycelbaren Plastikabfällen. Ein Teil dieser Abfälle wurde zu „Processed Engineered Fuel“ (PEF) oder „Refuse-Derived Fuels“ (RDF) verarbeitet und als Brennstoff exportiert. Der Markt für den Handel mit Plastikabfällen bleibt dynamisch, wobei sich neue Exportziele abzeichnen, die einer genaueren Analyse und kontinuierlichen Beobachtung bedürfen, um die Auswirkungen auf die globalen Abfallströme und das Abfallmanagement besser zu verstehen (Park et al., 2024).

4 Auswirkungen von Plastikabfällen in Meeren

Plastikabfälle in marinen Ökosystemen stellen ein ernsthaftes Umweltproblem dar, das die Gesundheit der Ozeane und ihrer biologischen Gemeinschaften gefährdet. Jährlich gelangen Millionen Tonnen Plastikmüll in die Gewässer, wo sie sich in Mikroplastikpartikel zersetzen, die erhebliche negative Auswirkungen auf die marine Fauna haben. Marine Organismen, wie Fische und Vögel, verwechseln Plastik mit Nahrung, was zu physischen Verletzungen, gesundheitlichen Beeinträchtigungen und häufig zum Tod führt. Zudem können schädliche Chemikalien, die an den Plastikpartikeln haften, in die Nahrungskette gelangen und letztlich auch den Menschen erreichen. Prognosen deuten darauf hin, dass bis 2040 jährlich zwischen 23 und 37 Millionen Tonnen Plastik in die Ozeane gelangen könnten. Auch terrestrische Lebensräume sind von der Plastikverschmutzung betroffen, was zu einem Verlust der Biodiversität führen kann. Die Auswirkungen der Plastikverschmutzung sind nicht nur ökologischer Natur, sondern haben auch weitreichende gesellschaftliche und ökonomische Konsequenzen (Veith et al., 2024; Tekman et al., 2022; Hohn et al., 2020). Ein umfassendes Verständnis der ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen von Plastikverschmutzung im Meer ist entscheidend, um einen globalen Wandel in der Herstellung, Nutzung und Wiederverwendung von Plastikmaterialien zu fördern und negative Effekte auf Verhalten, Gesetzgebung sowie Industrie und Handel zu minimieren (Beaumont et al., 2019).

4.1 Ökologische Folgen von Plastik im Meer

Ökosystemprozesse, die als „Ökosystemfunktionen“ bezeichnet werden, umfassen die kollektiven Lebensaktivitäten aller Organismen innerhalb eines Ökosystems. Dazu gehören grundlegende Prozesse wie Ernährung, Ausscheidung und Vermehrung, die für das Überleben und die Stabilität des Ökosystems erforderlich sind. Diese natürlichen Vorgänge haben direkte Auswirkungen auf die Umwelt. Die resultierenden Leistungen, die das Ökosystem für die menschliche Gesellschaft erbringt, werden als „Ökosystemleistungen“ bezeichnet. Diese sind für die Menschen häufig von großer Bedeutung und in vielen Fällen unverzichtbar (Tekman et al., 2022). Komplexe Ökosysteme sind in der Lage, schädliche Ereignisse wie Umweltverschmutzungen zu bewältigen und sich im Laufe der Zeit anzupassen. Wenn jedoch die Belastung zu intensiv, zu häufig oder zu schnell erfolgt, kann das System entweder vollständig zerstört werden oder in einen vereinfachten Zustand übergehen. In diesem neuen Zustand verringern sich die Artenvielfalt, die Produktivität und die Stabilität des Systems. Dies führt zu einem Rückgang der Ökosystemdienstleistungen, was wiederum zu geringeren wirtschaftlichen Gewinnen

und reduziertem gesellschaftlichem Nutzen führt (Sharma et al., 2023; Tekman et al., 2022).

Durch die Plastikverschmutzung der Meere sind besonders Ökosysteme wie Korallenriffe und Mangrovenwälder gefährdet. Korallenriffe erfüllen zahlreiche wichtige Ökosystemfunktionen. Sie tragen zur Wasserreinigung, Kohlenstoffbindung und Klimawandelminderung bei und bieten durch ihre Struktur Küstenschutz vor Wellen, Stürmen, Überschwemmungen und Erosion. Daneben fördern Korallenriffe die biologische Vielfalt und tragen zur Komplexität des gesamten Ökosystems bei. Außerdem können sie für die Herstellung von Medikamenten, zum Beispiel für Herz-Kreislauf-Erkrankungen, genutzt werden. Makroplastikabfälle können sich in der Struktur von Korallenriffen verfangen und große Teile von Korallenkolonien ersticken. Ein Drittel der untersuchten Korallenriffe im asiatisch-pazifischen Raum ist bereits mit Makroplastik verschmutzt, wobei die Zahl bis 2025 voraussichtlich auf 40 % ansteigt. Korallen, die in Plastik verfangen sind, haben ein deutlich höheres Risiko zu erkranken. Dies wird durch Gewebeabrieb, Verletzungen und das Transportieren von Krankheitserregern durch das Plastik begünstigt. Zusätzlich kann Sauerstoffmangel das Krankheitsrisiko erhöhen und das Immunsystem der Korallen beeinträchtigen. Geisternetze aus der Schifffahrt, können über Jahrzehnte in den Riffen verbleiben und diese beschädigen oder zerstören. Darüber hinaus akkumuliert Mikroplastik in den Korallenpolypen, was negative Effekte auf die Korallen selbst sowie auf ihre symbiotischen Algen hat und die strukturelle Zusammensetzung der Riffgemeinschaft verändert (Harris et al., 2021; Tekman et al., 2022).

Mangrovenwälder bestehen aus salztoleranten Bäumen und Sträuchern, die in Brack- oder Salzwasser wachsen und die Gezeitenzone der tropischen und subtropischen Küsten bewohnen. Weltweit gibt es etwa 2.000 Mangrovenwälder, die eine Fläche von rund 138.000 km² in 118 Ländern auf allen Kontinenten außer der Antarktis bedecken. Zu den Ökosystemleistungen der Mangroven zählen der Küstenschutz (z.B. vor Sturmfluten und Tsunamis), die Produktion von Nahrungsmitteln und Holz, Kohlenstoffspeicherung, Wasserreinigung und Freizeitmöglichkeiten. Flüsse spielen eine entscheidende Rolle beim Transport von Plastikmüll vom Land ins Meer, weshalb die Ökosysteme in Flussmündungen besonders stark von Plastikverschmutzung betroffen sind. Da sich 54 % der Mangrovenlebensräume in einem Umkreis von 20 km um Flussmündungen befinden, sind sie besonders anfällig für Plastikabfälle. Mangroven gelten als Fallen für Plastikmüll, da ihre komplexen oberirdischen Wurzelsysteme in der Lage sind, Müll aus Flüssen zu fangen und zu halten (Harris et al., 2021; Tekman et al., 2022).

Bei der Zersetzung von Plastik wird organisches Material freigesetzt, was die biogeochemischen Prozesse in den Meeren beeinflusst. In der Studie von Romera-Castillo et al. (2023) konnte in Laborversuchen belegt werden, dass die Zersetzung von Plastik den pH-Wert des Meerwassers senken kann. Insbesondere wenn das Plastik aufgrund unsachgemäßer Entsorgung bereits gealtert ist. In Küstengebieten, in denen sich große Mengen an Plastikmüll ansammeln, kann dies zu einem Rückgang des pH-Werts des Meerwassers um bis zu 0,5 Einheiten führen (Veith et al., 2024). Eine Veränderung des pH-Werts kann die Überlebensfähigkeit von Meerestieren beeinträchtigen, da deren Wachstum, Stoffwechsel und Fortpflanzung negativ beeinflusst werden (Veith et al., 2024). Die dauerhafte Anwesenheit von Plastik im Meer führt zur Freisetzung schädlicher Treibhausgase und beeinträchtigt die Fähigkeit der Ozeane, als natürliche Kohlenstoffsенke zu fungieren (Veith et al., 2024). Das Plastik an der Meeresoberfläche gibt fortlaufend giftige Gase wie Methan ab, während sich das Plastik weiter zu Mikroplastik zersetzt (Sharma et al. 2023). Darüber hinaus entsteht auf der hydrophoben Oberfläche von Plastik ein Biofilm, der die Viskosität und Auftriebseigenschaften von Mikroplastikpartikeln verändert. Dies führt dazu, dass Mikroplastikpartikel auf den Meeresboden sinken. Das Absinken stört die Verteilung von organischem Kohlenstoff und hat negative Auswirkungen auf den Kohlenstoffhaushalt der Ozeane (Veith et al., 2024). Des Weiteren tragen die Plastikverschmutzung der Meere und der Klimawandel zur globalen Erwärmung und zum Anstieg der Meerestemperaturen bei, was erhebliche Auswirkungen auf Korallenriffe hat. Dies führt zu Korallenbleiche und einem massiven Sterben von Korallenarten, was wiederum das Aussterben bestimmter Arten zur Folge hat (Harris et al., 2021; Tekman et al., 2022).

Die Tiere in den Ozeanen sind unmittelbar den zahlreichen Gefahren ausgesetzt, die durch Plastikmüll entstehen. Sie können sich in Plastik verfangen oder es mit Nahrung verwechseln. Besonders gefährlich sind Verpackungsmaterialien sowie ring- oder schnurartige Müllteile für marine Lebewesen. Weltweit sind mindestens 2.249 verschiedene marine Arten von Müll betroffen. Viele dieser Arten sind aufgrund der Verschmutzung auf der Roten Liste der bedrohten Arten verzeichnet. Bei 54 der 120 marinen Säugetierarten, die auf der Roten Liste der Weltnaturschutzunion (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, IUCN) aufgeführt sind, wurde nachgewiesen, dass sie Meeresmüll aufnehmen oder sich darin verfangen. Bei einer Untersuchung der Basstölpelkolonie auf Helgoland wurde festgestellt, dass 97 % der Nester mit Plastik belastet sind, insbesondere mit Überresten von Fischernetzen, Leinen und Schnüren, aber auch mit Verpackungsmaterialien. Auch wurde nachgewiesen, dass sich durch den Plastikmüll Habitate und Lebensgemeinschaften verändern, da viele Arten auf

dem im Wasser treibenden Plastik mit den Meeresströmungen umherreisen (HBS & BUND, 2019). Kleine Plastikteile wurden im Magen-Darm-Trakt von mehr als 2.200 verschiedenen marinen Arten, von Zooplankton bis hin zu Spitzenprädatoren, wie Haien, nachgewiesen. Die Auswirkungen der Plastikverschmutzung betreffen nicht nur Individuen, sondern haben auch weitreichende Folgen auf Populationen und Gemeinschaften. Zusätzlich setzt Mikroplastik schädliche Chemikalien wie Phthalate, polybromierte Diphenylether (PBDEs) und Bisphenol A frei, wodurch die negativen Auswirkungen auf die Umwelt weiter verstärkt werden (Hohn et al., 2020). In einer Studie wurde festgestellt, dass die Aufnahme von Mikroplastikpartikeln im Größenbereich von 2 µm bis 0,1 µm bei Miesmuscheln zu abnormen Entwicklungen und Fehlbildungen führte, wobei das Wachstum der Muscheln unbeeinträchtigt blieb (Rist et al., 2019). In einer weiteren Untersuchung an Krebstieren zeigte sich, dass Plastikpartikel im Nanometerbereich schädlicher für die Tiere waren als solche im Mikrometerbereich. Es wird angenommen, dass Nanopartikel mit höherer Wahrscheinlichkeit in den Verdauungstrakt der Tiere gelangen und dort verbleiben, was zu einem gesteigerten Sättigungsgefühl führt. Dies resultiert in einer verringerten Nahrungsaufnahme, wodurch die Tiere nicht ausreichend mit den notwendigen Nährstoffen versorgt werden (Jiang et al., 2020).

4.2 Gesellschaftliche Folgen von Plastik im Meer

Bedrohungen von Ökosystemdienstleistungen wirken sich nicht nur auf die Umwelt aus, sondern können auch das menschliche Wohlbefinden beeinträchtigen, indem sie Ernährungssicherheit, Lebensgrundlagen, Einkommensquellen und die öffentliche Gesundheit gefährden. Küstengemeinden sind von diesen Auswirkungen besonders betroffen, da sie in hohem Maße auf die Funktionen und Ressourcen der angrenzenden Ökosysteme angewiesen sind (Beaumont et al., 2019).

In der Studie von Beaumont et al. (2019) wurden Auswirkungen auf drei zentrale Ökosystemleistungen identifiziert, die gefährdete Werte aufweisen und sowohl direkte als auch indirekte Folgen für das menschliche Wohlergehen nach sich ziehen. Meeresfrüchte stellen weltweit eine der wichtigsten Quellen für tierisches Eiweiß dar und machen über 20 % der Nahrungsaufnahme von etwa 1,4 Milliarden Menschen aus. Plastikverschmutzung im Meer beeinträchtigt sowohl die Effizienz als auch die Produktivität der Fischerei und Aquakultur, indem sie physische Schäden verursacht und die Fischbestände gefährdet. Eine Vielzahl von Meerestieren, einschließlich für die Nahrungsversorgung relevante Arten wie Muscheln und Fische, nehmen Plastik auf, entweder direkt aus der Umwelt oder indirekt über kontaminierte Beutetiere. Plastik enthält häufig schädliche Zusatzstoffe und bietet einen Nährboden für mikrobielle Krankheitserreger. Die

Verunreinigung der Nahrungskette mit Plastik und den damit verbundenen Schadstoffen setzt Fisch- und Muschelbestände sowie ihre Beutetiere einem Risiko für tödliche und subletale Schäden aus, was zu einer Verringerung des reproduktiven Erfolgs und des Wachstums führen kann. Die Produktivität, Lebensfähigkeit, Rentabilität und Sicherheit der Fischerei- und Aquakulturindustrie werden erheblich durch die Auswirkungen der Meeresplastikverschmutzung beeinträchtigt, insbesondere in Wechselwirkung mit weiteren Faktoren wie dem Klimawandel und der Überfischung. Die starke Abhängigkeit vieler Bevölkerungsgruppen von Meeresfrüchten als Nahrungsquelle erhöht die Verwundbarkeit eines großen Teils der Weltbevölkerung gegenüber Veränderungen in der Verfügbarkeit, Qualität und Sicherheit dieser Lebensmittelressourcen. Darüber hinaus sind marine Arten wie Seevögel, Schildkröten, Wale und Delfine kulturell und emotional bedeutend für den Menschen. Diese Tiere sind durch das Verfangen in und das Verschlucken von Plastik bedroht. Medienberichte verdeutlichen die Auswirkungen auf diese Arten und zeigen, dass ihr Verlust nicht nur ökologische, sondern auch negative psychische Auswirkungen auf das menschliche Wohlbefinden hat. Die öffentliche Aufmerksamkeit auf die Plastikverschmutzung weist darauf hin, dass Umweltveränderungen komplexe Auswirkungen auf das menschliche Wohlbefinden haben können. Meeresplastik hat ebenfalls direkte Auswirkungen auf die Freizeitgestaltung. Die Analyse der Ökosystemdienstleistungen ergab, dass Plastikverschmutzung einen negativen Einfluss auf die Erholungsnutzung von Küstengebieten hat. Erholungssuchende sind häufig mit Plastikmüll konfrontiert, was dazu führt, dass solche Gebiete gemieden werden, insbesondere wenn die Erwartung besteht, auf Abfall zu stoßen. Dies hat weitreichende wirtschaftliche Folgen, die von Reinigungskosten bis hin zu Einnahmeverlusten im Tourismussektor reichen (Beaumont et al., 2019). An Küsten und Stränden weltweit kommt es zur Ansammlung erheblicher Mengen an Plastikmüll, was sowohl die Attraktivität für Touristinnen und Touristen beeinträchtigt als auch das Ansehen von Urlaubszielen wie den karibischen Inseln und Bali negativ beeinflusst (HBS & BUND, 2019).

Die Präsenz von Abfällen in Küstengebieten hat auch direkte Auswirkungen auf die körperliche und psychische Gesundheit von Besuchenden und Arbeitenden. Risiken wie Schnittverletzungen durch scharfe Objekte, die Gefahr des Verfangens in Netzen und der Kontakt mit unhygienischen Materialien sind häufig. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass der Aufenthalt an verschmutzten Küsten die Stimmung und das psychische Wohlbefinden negativ beeinflusst. Das Meiden solcher Gebiete kann jedoch ebenfalls gesundheitliche Folgen haben und die Möglichkeit einschränken, von den typischen Küstenvorteilen wie körperlicher Aktivität, sozialen Interaktionen und der Förderung der physischen und mentalen Gesundheit zu profitieren (Beaumont et al., 2019).

Mikroplastikpartikel gelangen über den Nahrungskreislauf in die menschliche Ernährung, da Meereslebewesen Plastik konsumieren. Fische, Schalentiere und andere Meeresbewohner, die Plastikpartikel aufnehmen, können diese an den Menschen weitergeben, wenn sie verzehrt werden. Es gibt noch wenig Wissen über die langfristigen gesundheitlichen Auswirkungen der Aufnahme von Mikroplastik, aber mögliche Risiken umfassen hormonelle Störungen, Entzündungen und andere gesundheitliche Probleme. Eine durchgeführte Studie von Leslie et al. (2022) hat belegt, dass Mikroplastikpartikel im menschlichen Blut nachweisbar sind. Die Forscher entdeckten, dass in einer signifikanten Anzahl von Blutproben Plastikpartikel vorhanden waren, was auf eine mögliche Exposition des menschlichen Körpers gegenüber diesen Stoffen hinweist. Diese Ergebnisse verdeutlichen die dringende Notwendigkeit, weitere Untersuchungen durchzuführen, um die gesundheitlichen Auswirkungen dieser Partikel zu verstehen und die Quellen der Kontamination zu identifizieren (Leslie et al., 2022).

4.3 Ökonomische Folgen von Plastik im Meer

Die Plastikverschmutzung mariner Ökosysteme hat erhebliche wirtschaftliche Folgen. Touristisch erschlossene Regionen verlieren an Attraktivität, was zu einem Rückgang der Besucherzahlen führt. Zudem wird die Fischerei beeinträchtigt, da Plastikmüll regelmäßig aus den Netzen entfernt werden muss, was den Ertrag und die Effizienz der Fischereibetriebe verringert. Auch die Schifffahrt ist betroffen, insbesondere wenn sich Taue in Schiffsschrauben verfangen oder Ansaugereinrichtungen durch Plastikabfälle blockiert werden. Des Weiteren erfordert die Säuberung von Stränden und Küstenstreifen beträchtliche finanzielle Ressourcen und stellt eine zusätzliche Belastung für die betroffenen Regionen dar (WWF, 2023).

Die gesamtgesellschaftlichen Kosten der Plastikverschmutzung resultieren vor allem aus den Schäden an Ökosystemen. Hinzu kommen die durch den Klimawandel verursachten Kosten sowie die Ausgaben für die Beseitigung des Plastikmülls. Ein weiteres Problem stellt die lange Abbauphase von Plastik dar, die Hunderte von Jahren umfassen kann. Dadurch kumulieren sich die schädlichen Auswirkungen im Laufe der Zeit. Dies führt zu beträchtlichen ökonomischen Belastungen. Allein die Kosten, die durch die Reduzierung von Ökosystemleistungen infolge von Plastikmüll entstehen, wie beispielsweise geringere Erträge aus der Fischerei, werden für den Zeitraum von 2021 bis 2040 auf 2,56 Billionen USD geschätzt (UNEP, 2023; UNEP, 2024). Laut Berichten der Umweltversammlung (United Nations Environment Assembly, UNEA) und des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) belastet Plastik die Weltwirtschaft jährlich mit rund 19 Milliarden USD und stellt eine

ernsthafte Bedrohung für die ökologische Nachhaltigkeit dar. Insgesamt wurden etwa 8,3 Milliarden Tonnen Plastikmüll produziert, von denen 4,9 Milliarden Tonnen auf Deponien landen, was zu jährlichen Verlusten von über 13 Milliarden USD führt. Die Meeresverschmutzung durch Plastik stellt im Vergleich zur Plastikverschmutzung an Land das größte Problem dar. Schätzungen zufolge verursacht Plastik im Meer erhebliche wirtschaftliche Verluste, mit einem Naturkapitalverlust von 3.300 bis 33.000 USD pro Tonne Plastikmüll jährlich. Diese Zahlen beziehen sich nur auf die Auswirkungen auf das marine Naturkapital, sodass die gesamten wirtschaftlichen Kosten wahrscheinlich noch höher sind. Laut dem UNEP könnte sich die Plastikverschmutzung bis 2040 verdreifachen (UNEP, 2023; UNEP 2024; Xia et al., 2023).

Die Auswirkungen von Plastik im Meer auf Ökosystemleistungen können als erste Grundlage zur Bewertung der wirtschaftlichen Kosten in Bezug auf das Naturkapital der Meere dienen. Obwohl es noch nicht möglich ist, den genauen Rückgang der jährlichen Ökosystemleistungen aufgrund von Plastikverschmutzung zu quantifizieren, deuten die vorhandenen Belege auf erhebliche negative Auswirkungen auf nahezu alle Ökosystemleistungen auf globaler Ebene hin. Es wird angenommen, dass die marinen Ökosystemleistungen aufgrund des Meeresplastiks im Jahr 2011 um 1 % bis 5 % gesenkt wurden. Im Jahr 2011 wurden die jährlichen Ökosystemleistungen der Meere für die Gesellschaft auf rund 49,7 Billionen Dollar geschätzt. Diese Schätzung beruht auf der Annahme einer maximal nachhaltigen Nutzung natürlicher Systeme, die funktionierende Ökosysteme mit minimaler menschlicher Störung widerspiegeln. Zwar ist die Genauigkeit dieser Zahl begrenzt, jedoch wird sie als ausreichend für eine globale Analyse erachtet. Eine Schätzung des Wertverlusts durch Plastikverschmutzung im Meer stellt daher eine erste Annäherung an die wirtschaftlichen Kosten dar. Der Rückgang der Ökosystemleistungen der Meere um 1% bis 5 % führt zu einem jährlichen Verlust von 500 bis 2.500 Milliarden USD. Bei einem geschätzten Plastikbestand im Jahr 2011 von 75 bis 150 Millionen Tonnen würde dies bedeuten, dass jede Tonne Plastik im Meer jährliche Kosten zwischen 3.300 und 33.000 USD durch den Verlust an marinem Naturkapital verursacht. Die angenommenen wirtschaftlichen Kosten beziehen sich ausschließlich auf den Einfluss von Meeresplastik auf das Naturkapital der Meere und stellen eine „Untergrenze“ der gesamten wirtschaftlichen Kosten dar. Sie veranschaulichen jedoch die potenzielle Größenordnung der Auswirkungen. Die dargestellten wirtschaftlichen Kosten pro Tonne Plastik sind Durchschnittswerte, die in der Realität je nach Emissionsort, Ansammlung, Plastikart und Menge sowie bestehender Umweltbelastung variieren können. Jede Tonne Meeresplastik verursacht daher wahrscheinlich höhere oder niedrigere Kosten als der Durchschnitt, da Plastikteile nicht gleichmäßig verteilt sind. Die räumliche Heterogenität der

Plastikemissionen, ihrer Anhäufung und der ökologischen Schäden muss bei der Bestimmung der Kosten pro Tonne berücksichtigt werden (Beaumont et al., 2019).

Da der Abbau des Plastiks im Meer Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauert, ist zu erwarten, dass die negativen ökologischen, sozialen und ökonomischen Auswirkungen der Plastikverschmutzung künftig zunehmen werden (Beaumont et al., 2019).

5 Maßnahmen zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung der Meere

Angesichts der globalen Dimension der Plastikverschmutzung der Meere sind zahlreiche Maßnahmen und Initiativen auf internationaler, nationaler und lokaler Ebene entstanden, um die Ursachen zu bekämpfen und die Folgen zu mildern. Die Maßnahmen reichen von internationalen Vereinbarungen zur Reduktion von Plastikabfällen, zu Verbesserung des Abfallmanagements bis hin zu Einführung von Recyclingprogrammen (Bergmann et al., 2023; Veith et al., 2024). Nachfolgende werden verschiedene Maßnahmen zur Reduktion der Meeresplastikverschmutzung vorgestellt.

5.1 Politische Lösungsansätze

5.1.1 Globales UN-Abkommen gegen Plastikmüll

Die Plastikverschmutzung breitet sich weltweit aus, von den höchsten Bergen bis zu den tiefsten Ozeanen. Die Plastikproduktion wird sich bis 2060 verdreifachen, was zu einer Zunahme der Verschmutzung führt. Plastik und andere chemische Schadstoffe überschreiten bereits gefährliche Grenzwerte und gefährden wichtige Erdsysteme, die das Klima und die Biodiversität beeinträchtigen. Dies hat negative Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen, Tieren, Ökosystemen und biogeochemischen Kreisläufen. Die UN-Umweltversammlung hat eine Resolution „End Plastic Pollution“ verabschiedet, die die Entwicklung eines globalen Plastikvertrags bis 2024 vorsieht (Bergmann et al., 2023). Die Verhandlungen über ein UN-Abkommen gegen Plastikmüll wurden im März 2022 in Nairobi bei der UNEA eingeleitet. Die Versammlung verabschiedete eine Resolution für ein rechtsverbindliches Abkommen. Das globale UN-Abkommen gegen Plastikmüll soll dazu beitragen, die Meere zu säubern und die Umweltbelastung durch Plastik zu reduzieren. Es umfasst den gesamten Lebenszyklus von Plastikprodukten, einschließlich der Herstellung, des Designs, der Vermeidung und Wiederverwendung sowie der Abfallbehandlung. Auch Mikroplastik und die damit verbundenen Umweltprobleme werden berücksichtigt. Zudem soll das Abkommen weltweit den Aufbau einer nicht-toxischen Kreislaufwirtschaft für Plastik fördern. Seitdem hat ein zwischenstaatliches Verhandlungskomitee bereits vier Sitzungen abgehalten. Die fünfte Verhandlungsrunde fand vom 25.11.-01.12.2024 in Busan, Südkorea statt, wo sich Delegierte aller 193 UN-Mitgliedstaaten sowie Vertreter aus Wissenschaft, Zivilgesellschaft und Wirtschaft trafen. Jedoch wurde die fünfte Tagung des Internationalen Verhandlungskomitees vertagt, anstatt abgeschlossen. In Busan wurde ein verbessertes Vorschlagspapier des Vorsitzenden angenommen, das eine bessere Verhandlungsgrundlage bietet. Ziel ist es, das Abkommen bei einer zweiten Versammlung zu beschließen, wobei Zeitpunkt und Ort später

festgelegt werden (BMUV, 2024a; UNEP 2024). In Busan zeigte sich, dass die Einigung über Maßnahmen zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung eine komplexe Aufgabe ist, da Plastik vielfältige Anwendungen hat und die Interessen der Staaten stark variieren. Besonders Ölproduzenten, Plastikproduzenten und Länder mit unzureichendem Abfallmanagement haben unterschiedliche Perspektiven. Daher wird im Abkommen die Möglichkeit von Mehrheitsentscheidungen angestrebt, falls kein Konsens erreicht wird. Trotz Widerstand einiger ölproduzierender Staaten unterstützten mehr als 85 Länder in Busan eine gemeinsame Erklärung zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung. Das Abkommen soll den gesamten Lebensweg von Plastik berücksichtigen, die Produktion von Primärplastik auf ein nachhaltiges Niveau senken und schädliche Chemikalien in Plastikprodukten regulieren, um Gesundheit und Umwelt zu schützen. Zudem sollen leicht ersetzbare oder umweltschädliche Produkte, insbesondere Einwegplastik, eingeschränkt werden. Eine ausreichende Finanzierung wird ebenfalls angestrebt (BMUV, 2024a; BMUV, 2024b; UNEP 2024). Die Resolution trägt auch dazu bei, die Vereinbarung der 26. UN-Klimakonferenz (Conference of the Parties, COP26) zur Reduzierung von Plastikmüll bis 2060 zu erreichen, indem sie die Beseitigung von Plastikabfällen vorantreibt (Xia et al., 2023).

5.1.2 Maßnahmen der EU

Im Jahr 2021 produzierte jede Person in der EU im Durchschnitt 36,1 kg an Plastikabfällen. Zwischen 2010 und 2021 stieg die Menge der Plastikabfälle pro Einwohner um rund 29 %, was einem Anstieg von 8,1 kg pro Person entspricht. Insgesamt betrug das Aufkommen an Plastikabfällen in der EU im Jahr 2021 16,13 Millionen Tonnen, von denen etwa 6,56 Millionen Tonnen recycelt wurden (EP, 2018a; EP, 2018b). Das EU-Parlament hat neue Regeln für nachhaltigere Verpackungen und weniger Verpackungsmüll verabschiedet. Ziel ist es, die wachsende Abfallmenge zu reduzieren, die Vorschriften im Binnenmarkt zu vereinheitlichen und die Kreislaufwirtschaft zu fördern. Die vorläufige Einigung mit dem Rat umfasst Zielvorgaben zur Reduzierung von Verpackungen: 5 % bis 2030, 10 % bis 2035 und 15 % bis 2040. Zudem wird die Verpflichtung eingeführt, den Verpackungsmüll aus Plastik zu verringern. Um unnötige Verpackungen zu vermeiden, darf der Leerraumanteil bei Umverpackungen, Transportverpackungen und Verpackungen für den elektronischen Handel künftig maximal 50 % betragen. Hersteller und Importeure sind zudem verpflichtet, leichtere Verpackungen mit geringerem Volumen zu entwickeln. Ab dem 1. Januar 2030 werden bestimmte Einwegverpackungen aus Plastik verboten, darunter Verpackungen für frisches Obst und Gemüse, Lebensmittel und Getränke in Cafés und Restaurants, Einzelportionen (z.B. Gewürze), kleine

Einwegplastikverpackungen für Toilettenartikel in Hotels sowie leichte Plastiktragetaschen. Zudem wird es im Hinblick auf den Gesundheitsschutz verboten, bestimmte sogenannte "Ewigkeitschemikalien" (Per- und Polyfluoralkylsubstanzen, PFAS) in Verpackungen zu verwenden, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen und festgelegte Grenzwerte überschreiten (EP, 2018a; EP, 2018c).

Für Verpackungen alkoholischer und nichtalkoholischer Getränke (mit Ausnahme von Milch, Wein, aromatisiertem Wein, Spirituosen o. Ä.), Transport- und Verkaufsverpackungen sowie Umverpackungen gelten bis 2030 spezielle Wiederverwendungsziele. Unter bestimmten Bedingungen können Mitgliedstaaten eine fünfjährige Ausnahme von diesen Anforderungen gewähren. Endvertreiber von Getränken und Speisen zum Mitnehmen müssen den Verbrauchern ermöglichen, eigene Behälter zu verwenden und anstreben, bis zum Jahr 2030 10 % ihrer Produkte in wiederverwendbaren Verpackungen anzubieten (EP, 2018c). Die neuen Vorschriften legen strenge Anforderungen an die Recyclingfähigkeit von Verpackungen fest, mit Ausnahme von Verpackungen aus Leichtholz, Kork, Textilien, Gummi, Keramik, Porzellan und Wachs. Zudem werden Mindestziele für den Rezyklatanteil in Plastikverpackungen und das Recycling von Verpackungsabfällen nach Gewichtsprozent festgelegt. Bis 2029 müssen 90 % aller Einweggetränkebehälter aus Plastik und Metall (mit bis zu drei Litern Inhalt) getrennt gesammelt werden, entweder durch Pfandsysteme oder andere geeignete Verfahren. Diese Regelungen ergänzen frühere Maßnahmen, wie das Verbot von Einwegplastik im Jahr 2019 (EP, 2018c).

5.1.3 Lösungsansätze aus Deutschland

Das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) engagiert sich für die Schaffung eines wirksamen Abkommens zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung. Es unterstützt sowohl den G7-Aktionsplan als auch die G20-Initiativen zur Reduzierung der Meeresvermüllung. Zusätzlich fördert das BMZ als einer der größten Geber über den Weltbank-Fonds „ProBlue“ den Übergang zu einer nachhaltigen Meereswirtschaft, wobei der Schwerpunkt auf der Vermeidung von Meeresmüll und der integrierten Meeresraumplanung liegt. Um die Meeresverschmutzung zu verhindern, setzt das BMZ auf den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft an Land. Dabei verfolgt es den Ansatz „von der Quelle bis zur Mündung“ (Source-to-Sea), der alle relevanten Akteure grenzübergreifend in die Entwicklung nachhaltiger Lösungen einbezieht. Mit seinem 10-Punkte-Aktionsplan „Meeresschutz und nachhaltige Fischerei“ fördert das BMZ die Bekämpfung der Ursachen der Meeresverschmutzung, indem es die umweltpolitische Zusammenarbeit mit Partnerländern verstärkt und gemeinsam integrierte Konzepte für Abfall- und Kreislaufwirtschaft entwickelt. Das BMZ fördert den Wissensaustausch

zwischen Entwicklungs- und Schwellenländern sowie Partnerschaften mit der Privatwirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft, unter anderem durch die PREVENT Waste Alliance (BMZ, 2023).

Die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) unterstützt im Auftrag des BMZ die Umsetzung verschiedener Projekte, die sich auf die Verringerung von Meeresmüll durch die Förderung einer Kreislaufwirtschaft sowie auf die Verbesserung des Abfallmanagements zur Vermeidung von Plastikabfällen in den Meeren konzentrieren (GIZ, 2021; GIZ, 2023). In Indien wurden beispielweise in ausgewählten Städten verbesserte Verfahren, einschließlich digitaler Werkzeuge, implementiert, um die Einleitung von Plastik in die Meeresumwelt zu verhindern. Die geplanten Maßnahmen umfassen die Abfalltrennung an der Quelle sowie den Einsatz moderner Technologien und Infrastruktur für das Recycling. Diese Strategie beinhaltet klare Leitlinien, technische Spezifikationen und standardisierte Verfahren, die die Entwicklung und Implementierung effizienter Recyclingtechnologien fördern sollen. Zudem wird eine digitale Plattform für Sekundärrohstoffe geschaffen, um den Zugang zu recyceltem Material zu erleichtern und den Austausch zu optimieren, was den gesamten Recyclingprozess verbessert. Ein zentraler Aspekt dieser Initiative ist die Sensibilisierung der Bevölkerung. Auf nationaler, bundesstaatlicher und städtischer Ebene werden Konzepte zur Verhaltensänderung entwickelt, um das Bewusstsein für Recycling und Ressourcenschonung zu stärken. Durch gezielte Aufklärungsmaßnahmen wird ein besseres Verständnis für die Notwendigkeit einer nachhaltigen Abfallwirtschaft gefördert. Ein weiterer Fokus liegt auf der Durchführung von Demonstrationsprojekten in drei Pilotstädten, in denen Materialrückgewinnungsanlagen getestet und weiterentwickelt werden. Diese Projekte dienen als praxisorientierte Lösungsansätze zur Optimierung der Recyclingprozesse. Zusätzlich wird eine enge Zusammenarbeit mit großen Recyclingunternehmen und Herstellern angestrebt, um die Rückgewinnung von Ressourcen zu maximieren und Plastikmüll effizient in hochwertige Rezyklate umzuwandeln, wodurch der Materialkreislauf nachhaltig geschlossen wird. Diese Projekte tragen positiv zur Erreichung von SDG 11 und 14 der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung bei (GIZ, 2023).

Das Projekt „Rethinking Plastics“, welches in Ost- und Südostasien durchgeführt wurde bietet Beratung und Unterstützung für die Partner in den Bereichen Kreislaufwirtschaft und Reduzierung von Meeresmüll. Es umfasst Maßnahmen in den folgenden Bereichen: Verbesserung des Plastikabfallmanagements gemäß der Abfallhierarchie, etwa durch erweiterte Produzentenverantwortung (Extended Producer Responsibility, EPR) sowie Rückgabe- und Pfandsysteme für Verpackungen und Plastikprodukte. Die Förderung

eines nachhaltigen Konsums und einer nachhaltigen Produktion von Plastik, zum Beispiel durch optimiertes Design für Wiederverwendung und Recycling sowie den Einsatz alternativer Materialien. Und die Reduktion von Plastikmüll im Meer, durch eine verbesserte Müllentsorgung für Schiffe in Häfen und „Fishing for Litter“-Programme, bei denen Fischer den Müll aus ihren Netzen an Land bringen (GIZ, 2021).

5.2 Förderung von Recycling und Kreislaufwirtschaft

5.2.1 Recycling von Meeresplastik

Die Entsorgungsoptionen für gesammeltes Meeresplastik sind begrenzt, da Plastik im Ozean oft abgebaut, mit Biofilm bedeckt und mit gefährlichen Chemikalien belastet ist, was das Recycling erschwert. Eine der größten Herausforderungen besteht darin, dass ein erheblicher Teil des Plastikgemischs zu komplex ist, um mit herkömmlichen Methoden wie dem mechanischen Recycling effektiv und wirtschaftlich verarbeitet zu werden (Dos Passos et al., 2024; Bødtker et al., 2024). Die meisten gängigen Sammelsysteme führen zu einer Vermischung unterschiedlicher Plastikarten, Biomasse und anorganischer Stoffe, was die technische Durchführbarkeit der Herstellung hochwertiger Produkte durch herkömmliche Recyclingverfahren, wie das mechanische Recycling, erheblich beeinträchtigt. Zur Lösung dieses Problems müssen alternative Ansätze verfolgt werden, wobei das chemische Recycling besonders hervorzuheben ist. Thermochemische Technologien wie Pyrolyse, Vergasung und hydrothermale Verflüssigung bieten die Möglichkeit, Mischplastik in wertvolle Produkte wie Brennstoffe oder Chemikalien umzuwandeln. Allerdings weist jedes dieser Verfahren spezifische Vor- und Nachteile auf (Dos Passos et al., 2024). Laut der Abfallhierarchie sollte Plastik, das von der Meeresoberfläche entfernt wird, bevorzugt mechanisch recycelt werden. Dennoch wird ein beträchtlicher Teil aufgrund seiner geringeren Qualität im Vergleich zu neuem Plastik als Abfall eingestuft. In diesem Zusammenhang stellt die hydrothermale Verflüssigung (HTL) von Meeresplastikabfällen eine vielversprechende chemische Recyclingtechnologie dar. Sie ermöglicht die Herstellung eines synthetischen Rohöls, dessen Eigenschaften dem von konventionellem Erdöl ähneln. Die Studie von Dos Passos et al. (2024) belegt, dass verschiedene Reaktionsparameter wie Temperatur, Druck, Reaktionszeit und der Trockensubstanzgehalt des Ausgangsmaterials signifikante Auswirkungen auf den Ertrag und die Qualität des erzeugten Öls haben. Insgesamt wird gezeigt, dass HTL eine technisch realisierbare Methode zur Umwandlung von Meeresplastik in kohlenstoffreiche synthetische Rohöle darstellt. Die Ergebnisse dieser Studie sind von wesentlicher Bedeutung für die Skalierung des Verfahrens sowie für die Bestätigung der Zuverlässigkeit dieses Ansatzes (Dos Passos et al., 2024; Laredo et al., 2023).

Neben dem Recycling gibt es weitere potenzielle Lösungen. Verbrennung und Deponierung von Meeresplastik sind häufig die kostengünstigeren Optionen (Hohn et al., 2020). Die Umwandlung von Plastikabfällen in Energie erscheint zunächst als Lösung, da viele Plastikarten eine höhere Verbrennungstemperatur erreichen als Holz oder Kohle. Der Wirkungsgrad der Plastikverbrennung zur Stromerzeugung ist jedoch mit nur 25 % deutlich niedriger als der von modernen, gasbefeuerten Kraftwerken, der bei rund 55 % liegt. Darüber hinaus führt die Verbrennung von Plastik, ähnlich wie bei Erdgas, zur Freisetzung von CO₂ und weiteren schädlichen Chemikalien, darunter Salzsäure, Schwefeldioxid, Dioxine, Furane, Schwermetalle und Feinstaubpartikel. Diese Emissionen tragen erheblich zur Luftverschmutzung bei und verstärken den globalen Anstieg des atmosphärischen CO₂. Es ist ein globales, rechtsverbindliches Instrument erforderlich, das einen präventiven Ansatz verfolgt, der die möglichen negativen Auswirkungen der Plastikbeseitigung mit den potenziellen Vorteilen abwägt und Strategien zur Vermeidung oder Minderung von Risiken entwickelt. Solche Analysen müssen zudem die Treibhausgasemissionen aus den Aktivitäten zur Plastikentsorgung und -sanierung einbeziehen. (Bødtker et al., 2024; Hohn et al., 2020).

5.2.2 Kreislaufwirtschaft als Schlüssel zur Reduzierung von Plastikmüll

Die Kreislaufführung von Plastik ist inzwischen ein zentrales Thema. Dabei verlagert sich der Fokus zunehmend von der Abfallverwertung hin zur Nutzung von Plastik als wertvolle Ressource im Rahmen der Kreislaufwirtschaft, mit dem langfristigen Ziel, die daraus entstehenden CO₂-Emissionen zu verringern und zu vermeiden. Dabei sind die zentralen Herausforderungen, vor denen die Plastikindustrie steht, die Reduktion der Abfallmengen, die Reduktion der CO₂-Emissionen sowie die Sicherung des Ressourcenbedarfs (Orth et al., 2022). Die Plastikindustrie ist überwiegend in linearen Wertschöpfungsketten organisiert, bei denen Ressourcen entnommen, verarbeitet und nach der Nutzung als Abfall entsorgt werden, ohne dass Materialien wiederverwendet oder in den Produktionsprozess zurückgeführt werden. Dieses Modell trägt zur fortlaufenden Belastung von Ressourcen und der Umwelt bei (Orth et al., 2022; Büttner et al., 2024).

Die Kreislaufwirtschaft (engl. Circular Economy) ist dagegen ein Wirtschaftsmodell, bei dem Produkte so gestaltet werden, dass der Materialverbrauch minimiert oder vermieden wird. Produkte sollen möglichst lange genutzt, repariert oder aufgewertet werden und am Ende ihrer Lebensdauer recycelt oder wiederverwendet werden. Rohstoffe und Werkstoffe aus der Nutzung werden wieder zu wertvollen Ressourcen für neue, abfallarme und schadstofffreie Produktionsprozesse. Ziel ist es, das Wirtschaftswachstum von der Entnahme von Primärrohstoffen zu entkoppeln und Ressourcen in geschlossenen

Kreisläufen zu nutzen, um den langfristigen ökologischen und gesellschaftlichen Nutzen zu sichern. Obwohl die Kreislaufwirtschaft in den 17 Nachhaltigkeitszielen nicht ausdrücklich erwähnt wird, leistet sie als Handlungskonzept einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung vieler dieser Ziele und spielt eine zentrale Rolle bei ihrer Verwirklichung, insbesondere in Bezug auf Ziel 12 (Nachhaltiger Konsum und Produktion) und Ziel 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz). Strategien der Kreislaufwirtschaft, die darauf abzielen, den Materialeinsatz zu verringern oder die Recyclingraten zu erhöhen, tragen entscheidend zur Reduktion von Treibhausgasemissionen bei (Büttner et al., 2024). Aus der Perspektive der EU wird die Kreislaufwirtschaft als ein wesentliches Instrument zur Erreichung dieser Ziele betrachtet. Bereits zwei Monate nach der Veröffentlichung der Agenda 2030 legte die EU-Kommission einen Aktionsplan zur Kreislaufwirtschaft vor, der insbesondere Ziel 12 zur Förderung nachhaltiger Konsum- und Produktionsmuster fokussiert. Auch in weiteren Verordnungen und Richtlinien zur Kreislaufwirtschaft wird regelmäßig der Bezug zu den Zielen nachhaltiger Entwicklung hergestellt (Büttner et al., 2024). Die Kreislaufwirtschaft bietet bei der Reduzierung von Plastikmüll im Meer eine vielversprechende Lösung, indem sie den linearen Produktions- und Konsumzyklus durch nachhaltige Modelle ersetzt und somit einen wesentlichen Beitrag zum Umweltschutz leistet (Orth et al., 2022; Büttner et al., 2024).

5.3 Wirtschaftliche Perspektiven und Maßnahmen zur Bekämpfung von Plastikmüll im Meer

Viele Anwendungen und Innovationen sind ohne Plastik nicht mehr realisierbar. Gleichzeitig muss sich der Umgang mit Plastik elementar verändern, um den Plastikabfall in die Umwelt zu reduzieren sowie CO₂-Emissionen zu senken. Diese Herausforderungen erfordern von der Plastikindustrie nicht nur eine Reihe technischer Innovationen, sondern auch einen grundlegenden Paradigmenwechsel, bei dem der Wert von Plastikabfällen als bedeutende Rohstoffquelle anerkannt und entsprechend berücksichtigt wird (Orth et al., 2022).

5.3.1 Ein Blick auf die Rolle der Plastikindustrie

Plastics Europe ist der Wirtschaftsverband der europäischen Plastikhersteller mit Hauptsitz in Brüssel und vertritt die politischen Interessen der Plastikindustrie auf europäischer Ebene. Zudem agiert der Verband als Partnerorganisation des Verbands der Europäischen Chemischen Industrie (European Chemical Industry Council, CEFIC). Der Interessensverband setzt sich gegen Plastikmüll ein und betont die Bedeutung der Kreislaufwirtschaft als Schlüssel für nachhaltige Lösungen in der Plastikindustrie. Die Branche

setzt sich sowohl auf europäischer als auch auf internationaler Ebene für Multi-Stakeholder-Initiativen zu diesem Thema ein. Unabhängig von der Herkunft wird Plastikmüll in der Umwelt als unakzeptabel angesehen, und die Plastikindustrie strebt an, das Problem an der Quelle zu bekämpfen (Plastics Europe, 2024a).

Plastics Europe unterstützt das globale Plastikabkommen der UN zur Reduktion der Plastikverschmutzung und plädiert für eine Kreislaufwirtschaft, in der Plastikprodukte effizient gesammelt, wiederverwendet und recycelt werden. In einem Positionspapier thematisiert Plastics Europe die Notwendigkeit, Maßnahmen zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung zu ergreifen und die Plastikindustrie in eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu integrieren. Die Maßnahmen zielen auf eine nachhaltige Produktion, Nutzung und Entsorgung von Plastik ab. Dazu gehören die Förderung einer sicheren Verwendung chemischer Bestandteile und Zusatzstoffe im Rahmen der globalen Chemikalienregulierung, die Minimierung von Pelletverlusten und der Freisetzung von Mikroplastik sowie verpflichtende Datenerhebung und Berichterstattung. Zudem wird eine finanzielle Verantwortung gefordert und die Einführung von Normen sowie Transparenzvorschriften für biologisch abbaubare und kompostierbare Plastikstoffe angestrebt (Plastics Europe, 2024a).

Eine bedeutende Initiative der Plastikverbände auf internationaler Ebene ist die „Operation Clean Sweep (OCS)“, die auch Plastics Europe unterzeichnet hat. Diese hat sich zum Ziel gesetzt, durch normative Maßnahmen, wie ordnungsgemäße Lagerung, den Eintrag von Plastikpellets in die Umwelt entlang der gesamten Lieferkette – von der Plastikproduktion über die Logistik bis hin zur Verarbeitung – zu verhindern (Orth et al., 2022). Das Programm wird von Plastikproduzenten, -verarbeitern, -händlern sowie Logistik- und Recyclingunternehmen aktiv unterstützt, da es einen umfassenden, kooperativen Ansatz erfordert. Viele große multinationale Plastikhersteller in Europa haben das OCS-Versprechen unterzeichnet oder ähnliche Programme umgesetzt. In Europa engagieren sich bereits 14 Verbände gegen Pelletverluste (Plastics Europe, 2024b).

Ein erforderliches Engagement der Plastikindustrie zur grundlegenden Veränderung, insbesondere in den Schwerpunktländern des Marine Littering (unkontrollierte Freisetzung von Abfällen in die Meeresumwelt) wurde 2019 mit der Gründung der „Alliance to End Plastic Waste“ (AEPW) initiiert. Diese Initiative umfasst mehr als 80 Mitglieder aus der gesamten Plastik-Wertschöpfungskette, darunter global tätige Unternehmen aus den Bereichen Chemie, Plastik und Entsorgungsindustrie. Die AEPW hat sich verpflichtet, bis 2025 insgesamt 1,5 Milliarden USD in konkrete lokale und regionale Projekte zu investieren. Diese Projekte konzentrieren sich unter anderem auf Umwelterziehung und

die Einbeziehung der Bevölkerung, wozu beispielsweise auch Reinigungsaktionen an Stränden sowie Recyclingprojekte gehören (Orth et al., 2022). Kritiker werfen der AEPW vor, ihre Schwerpunkte zu sehr auf technische Lösungen wie Recycling zu legen, anstatt sich mit den grundlegenden Ursachen der Plastikverschmutzung auseinanderzusetzen. Hierzu zählen insbesondere die hohe Produktion von Einwegplastik sowie unzureichende Entsorgungssysteme in vielen Ländern. Einige betrachten die Allianz daher als eine Möglichkeit für Unternehmen, sich als umweltbewusst zu präsentieren, ohne signifikante Änderungen in ihrer Produktion und ihrem Geschäftsmodell vorzunehmen (Goebel, J., Wermter, B., 2023).

Die Plastikindustrie kann durch Maßnahmen wie die Verringerung der Plastikproduktion, Förderung von Recyclingtechnologien, Steigerung des Anteils wiederverwendbarer Produkte und Verpackungen, Integration einer Kreislaufwirtschaft sowie Beteiligung an Aufräum- und Präventionsinitiativen, einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung von Plastikabfällen und der damit verbundenen Verschmutzung der Meere leisten. Diese Maßnahmen müssen jedoch konsequent eingehalten und umgesetzt werden. (Orth et al., 2022).

5.3.2 Plastikgutschriften: Ein Ansatz zur Reduktion von Plastikmüll im Meer

Weltweit wächst das Abfallaufkommen, vor allem bei Plastik- und Verpackungsabfällen. Das Entsorgen und Recycling dieser Abfälle ist teuer, und für viele Kommunen sind die Kosten höher als die Einnahmen aus dem Verkauf von Recyclingmaterial (GIZ, 2022). Neben den Gebühren für Siedlungsabfälle wird die erweiterte Herstellerverantwortung (Extended Producer Responsibility, EPR) allgemein als ein wichtiger Ansatz zur Schaffung nachhaltiger organisatorischer und finanzieller Strukturen in der Abfallwirtschaft anerkannt. Es handelt sich um einen umweltorientierten Ansatz, der auf dem Verursacherprinzip basiert, nach dem die Verantwortung des Herstellers für ein Produkt über dessen Nutzung hinausgeht. EPR wird am häufigsten für Verpackungsmaterial angewendet, zunehmend jedoch auch für andere Produkte wie Elektroschrott oder Batterien. EPR ist jedoch ein komplexer Mechanismus, dessen Einführung Jahre, wenn nicht Jahrzehnte dauern kann. Als schnellere Lösung für die unterfinanzierten Abfallwirtschaftssysteme in vielen Teilen der Welt entstehen Plastikgutschriften als neuer Ansatz (GIZ, 2022).

Plastikgutschriften stellen übertragbare Einheiten dar, die eine festgelegte Menge an Plastikabfällen repräsentieren, die aus der Umwelt gesammelt und anschließend entweder recycelt oder sicher entsorgt wurden. Diese Gutschriften können mit Kohlenstoffgutschriften verglichen werden, die als handelbare Zertifikate oder Genehmigungen gelten, und es einem Land oder einer Organisation ermöglichen, eine bestimmte Menge an CO₂

oder anderen Treibhausgasen zu emittieren. Letztere stammen aus dem Bereich der Klimaschutzmaßnahmen. Plastikgutschriften können von Unternehmen und privaten Verbrauchern gekauft werden, um ihren Plastikfußabdruck auszugleichen. Obwohl sie keine ausreichenden kontinuierlichen Mittel generieren, stellen sie ein effizientes Instrument zur Finanzierung der Sammlung und Behandlung von Plastikabfällen in Gebieten ohne ausreichende Abfallinfrastruktur dar und könnten sozioökonomische Vorteile bieten, indem sie die Einkommensmöglichkeiten von Abfallarbeitern verbessern (GIZ, 2022; Moon et al., 2024). Plastikgutschriften können eine vorübergehende Alternative darstellen, sind jedoch ein neuer Finanzierungsansatz ohne einheitliche Definition oder standardisierte Verfahren, was eine umfassende Bewertung erschwert. Dennoch können sie in Ländern, in denen EPR-Systeme für Verpackungen noch nicht etabliert sind, eine sinnvolle Lösung bieten. Sie zeigen, dass Hersteller bereit sind, Verantwortung zu übernehmen und Projekte zu finanzieren, solange keine anderen Finanzierungsmechanismen existieren (GIZ, 2022; Moon et al., 2024).

5.3.3 Reduzierung des Plastikverbrauchs

Die effektivste und kostengünstigste Methode zur Vermeidung von Plastikverschmutzung besteht darin, unsichere, nicht nachhaltige und unverzichtbare Plastikchemikalien, Polymere und Produkte aus der Wirtschaft zu verdrängen. Stattdessen sollte der Fokus auf der Entwicklung sicherer, nachhaltiger und notwendiger Materialien, Produkte und Systeme liegen, die ihren Wert langfristig behalten. Ein zentrales Ziel sollte die Reduzierung der Menge und Art der weltweit produzierten Plastikprodukte sein, während das verbleibende Plastik vereinfacht, entgiftet und reguliert wird. Dieser Ansatz sollte auf den Prinzipien der Prävention, Vorsorge und des Verursacherprinzips basieren, um eine nachhaltige Lösung für die Plastikwirtschaft zu erreichen (Bergmann et al., 2023).

5.4 Die Rolle der Bevölkerung bei der Umsetzung von Maßnahmen

Die Einbeziehung der Bevölkerung ist von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Umsetzung von Maßnahmen gegen Plastikabfälle, da nur durch aktives Engagement und Bewusstseinsbildung ein nachhaltiger Wandel im Verhalten und in den praktischen Handlungen erreicht werden kann. In Ländern mit niedrigem Bruttoinlandsprodukt wird die Sammlung und Sortierung von Plastikabfällen größtenteils von Müllsammlern übernommen, deren Zahl weltweit mindestens 20 Millionen beträgt. Diese Tätigkeiten bieten in einkommensschwachen Gemeinschaften, kleinen Inselstaaten und informellen Siedlungen wichtige Arbeitsmöglichkeiten. Es ist jedoch wichtig, diese Müllsammler in die Planung und Umsetzung von Abfallbeseitigungsmaßnahmen einzubeziehen (Bødtker et al., 2024). Um die Gesundheits- und Sicherheitsstandards zu gewährleisten, sind

Vorschriften erforderlich, die eine angemessene persönliche Schutzausrüstung und Schulungen für Müllsammler sicherstellen. Die Auswahl der Standorte für die Abfallbeseitigung sollte nach Dringlichkeit erfolgen, wobei Ressourcen gerecht verteilt werden müssen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Plastikverschmutzung eine grenzüberschreitende Herausforderung darstellt und besonders benachteiligte Gemeinschaften überproportional betrifft. Maßnahmen zur Beseitigung von Plastik müssen vollständig transparent sein, einschließlich der Offenlegung von Produktdaten, Rückverfolgbarkeit und Finanzflüssen. Systeme wie die erweiterte Herstellerverantwortung sollten die vollen Kosten der Plastikproduktion internalisieren, wobei auf Greenwashing oder Kompensationsspraktiken verzichtet werden muss (Bødtker et al., 2024).

Auch Unternehmen können umweltbewusste Verbraucher ansprechen, indem sie nachhaltige Produkte aus alternativen Materialien zu Plastik anbieten. NGOs und andere Akteure spielen eine wichtige Rolle bei der Bewusstseinsbildung und Innovationsförderung im Bereich der Plastikmüllbewältigung. Die Sensibilisierung der Öffentlichkeit, etwa durch Aufklärung in Schulen und Medien, ist ein zentraler Schritt, um das Bewusstsein für die Umweltauswirkungen von Plastik zu schärfen. Besonders Touristen in Küstengebieten sowie auch Fischer müssen für das Thema sensibilisiert werden (Hohn et al., 2020; Xia et al., 2023). Es existieren verschiedene Initiativen, die sich der Aufgabe widmen, Plastik aus der Umwelt zu entfernen. Diese Projekte werden häufig unter dem Begriff „Clean-Up“ zusammengefasst, was im Englischen „Reinigung“ oder „Aufräumen“ bedeutet. Die Clean-Up-Initiativen sind ebenso vielfältig wie die Orte, an denen Plastikmüll in der Umwelt vorkommt, wobei die Beseitigung von Plastik aus den Ozeanen und von Stränden entlang der Küsten besonders im Mittelpunkt steht (Hengstmann & Tamminga, 2022).

6 Fallbeispiel: The Ocean Cleanup

Es gibt viele Initiativen zur Reinigung der Weltmeere, die durch zunehmende mediale Aufmerksamkeit mehr Unterstützung erhalten. Trotz unterschiedlicher Ansätze verfolgen diese Projekte alle das Ziel, die großen Mengen an Abfall in den Ozeanen zu beseitigen. Angesichts der wachsenden Abfallmengen und der Nachfrage nach nachhaltigeren Produktionsmethoden werden in naher Zukunft vermutlich weitere Initiativen zur Entfernung und zum Recycling von Plastikabfällen entstehen. Eine der bekanntesten Initiativen ist „The Ocean Cleanup“, gegründet 2013 von Boyan Slat. Die gemeinnützige Organisation nutzt innovative Technologien, um die Meeresumwelt zu reinigen und die marine Biodiversität zu schützen. Ihr Konzept basiert auf der Nutzung von Ozeanströmungen, um mit schwimmenden Greifarmen Plastikpartikel aus dem Wasser zu filtern. Slat sammelte über Crowdfunding innerhalb von 100 Tagen mehr als zwei Millionen USD zur Gründung des Projekts, dessen Vision es ist, bis 2040 90 % des Plastiks aus den Ozeanen zu erfassen und nachhaltig in neue Produkte umzuwandeln (TOC, 2024a; INT, 2020; Hohn et al., 2020). In den folgenden Kapiteln wird das Design des Projekts näher erläutert, gefolgt von einer Betrachtung zukünftiger Maßnahmen zur Weiterentwicklung. Zudem erfolgt eine kritische Bewertung des Cleanup-Projektes und zeigt mögliche Herausforderungen auf.

6.1 Design des Projektes

Zur Entfernung von Plastikmüll aus den Ozeanen wird das System 03, ein von The Ocean Cleanup entwickeltes Reinigungssystem, eingesetzt. Es besteht aus einer etwa 2,2 km langen schwimmenden Barriere, die zwischen zwei langsam fahrenden Schiffen, gespannt wird. An dieser Barriere befindet sich ein Sieb, das etwa vier Meter unter der Wasseroberfläche positioniert ist, wo sich der Großteil des schwimmenden Plastiks konzentriert. Die Schiffe bewegen sich mit geringer Geschwindigkeit und navigieren mithilfe von Überwachungsdaten und KI-Modellen zu den Regionen mit der höchsten Konzentration an Plastikabfällen. Während der Fahrt sammelt das System Plastikmüll ein, der durch Flügel in eine Rückhaltezone, einen großen Sack, geleitet wird. Wenn diese Rückhaltezone vollständig gefüllt ist, wird sie an eines der Schiffe herangezogen, um das Plastik zu entleeren, zu sortieren und zu verpacken. Anschließend wird die Rückhaltezone wieder ins Wasser abgelassen, und der Prozess wiederholt sich (TOC, 2023).

System 03 ist die dritte Generation der Reinigungstechnologie von The Ocean Cleanup und wurde im August 2023 im Großen Pazifischen Müllstrudel (Great Pacific Garbage Patch, GPGP) eingesetzt. Es folgt auf die erfolgreichen Tests von System 01 und dem

Einsatz von System 02, das zwischen 2021 und 2023 mehr als 250.000 kg Plastik aus dem GPGP entfernen konnte. System 03 ist ein großes Reinigungssystem mit einer maximalen Flügellänge von etwa 2,2 km (über 7.000 Fuß).



Abbildung 4: Größe von System 03 (außen) im Vergleich zu System 02 (innen) (Quelle: TOC, 2023)

Dadurch ist es nahezu dreimal so groß wie System 02, wie in Abbildung 4 veranschaulicht wird. Unter optimalen Bedingungen kann es alle fünf Sekunden eine Fläche von der Größe eines Fußballfeldes reinigen. Die Größe von System 03 ist entscheidend, da sie die Reinigung des Ozeans kostengünstiger und effizienter gestaltet. Durch die größere Dimension im Vergleich zu früheren Systemen und die zahlreichen Nachrüstungen können größere Meeresgebiete in kürzerer Zeit und mit weniger Ressourcen bearbeitet werden. Dies trägt dazu bei, die Kosten pro kg entferntem Plastik zu senken und den Nutzen für die Meeresumwelt zu maximieren. Während System 02 die Machbarkeit der Reinigung des GPGP demonstriert hat, soll System 03 nachweisen, dass dies auch wirtschaftlich tragfähig ist. Die Vergrößerung des Systems stellt einen wesentlichen Schritt zur Erreichung dieses Ziels dar. System 03 ist das Ergebnis jahrelanger Tests und Experimente. Die Erkenntnisse wurden genutzt, um die Komponenten zu optimieren, wodurch die Reinigung effizienter und wirtschaftlicher gestaltet wird (TOC, 2023; TOC, 2024a).

Ein zentrales Merkmal von System 03 ist die Einführung des Marine Animal Safety Hatch (MASH), einer Sicherheitsklappe für Meerestiere, die in der Rückhaltezone installiert ist und durch Unterwasserkameras überwacht wird. Bei der Sichtung von Tieren wird das MASH aktiviert, um den Zugang zur Rückhaltezone zu blockieren und gleichzeitig eine Ausstiegsluke zu öffnen, durch die die Tiere sicher entkommen können. Dies ermöglicht

eine effiziente Plastikaufnahme, ohne dass Tiere in der Rückhaltezone gefangen bleiben und ohne Verlust von Plastik. Abbildung 5 veranschaulicht die Positionierung der Sicherheitsklappe (C) sowie der Ausstiegsluken (B). Der Zugang zu Luft für luftatmende Tiere wird durch Konstruktionsmerkmale sichergestellt, die die Rückhaltezone an bestimmten Stellen über die Wasseroberfläche anheben (D). Die Besatzung hat jederzeit die Möglichkeit, einen Notauslöser zu aktivieren, um ein in der Rückhaltezone verfangenes Tier zu befreien. Zwar führt dies zum Verlust des gesammelten Plastiks, jedoch ist diese Maßnahme jederzeit anwendbar (E).

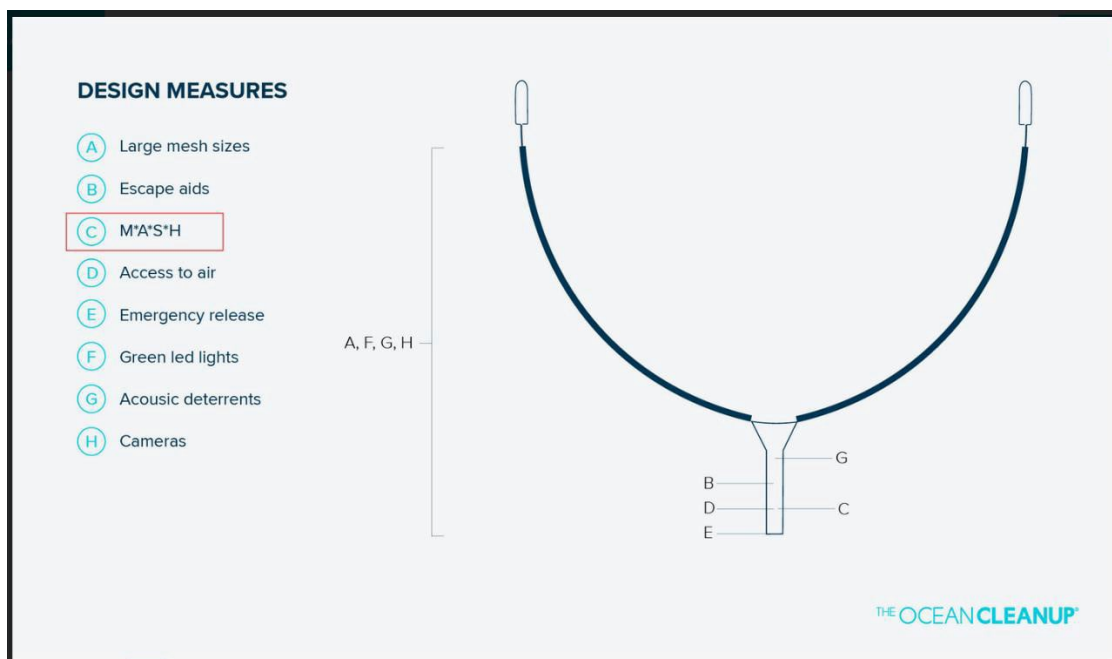


Abbildung 5: Überblick über die Maßnahmen zum Schutz der Meerestiere in System 03 (Quelle: TOC, 2024a)

Zusätzlich wird die Umweltleistung durch die Integration eines neuen Kamera-Skiffs und der Erweiterung von vier auf zehn Kameras weiter verbessert. Weitere Tests und laufende Forschungsarbeiten zu den Lebensgemeinschaften im GPGP sollen sicherstellen, dass die Maßnahmen die Umwelt und die Tiere nicht negativ beeinflussen. Das Ziel ist es, die Ausweitung der Aktivitäten im GPGP mit minimalen Auswirkungen auf die Meeresumwelt durchzuführen (TOC, 2024a).

Nach der Entfernung des Plastiks aus dem Meer strebt The Ocean Cleanup an, dessen Wiedereintritt in die Meeresumwelt zu verhindern, indem es in nachhaltige, neue Produkte recycelt wird. Damit soll ein geschlossener Kreislauf zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung geschaffen werden. Um zu zeigen, wie Müll in wertvolle Produkte umgewandelt werden kann, wurde der erste Meereseffang genutzt, um die Ocean Cleanup Sonnenbrille zu entwickeln. Diese Brillen bestehen aus Plastik, das 2019 mit System 01

direkt aus dem GPGP gewonnen wurde. Innerhalb von 18 Monaten waren die Brillen ausverkauft und trugen zur Finanzierung der Säuberung eines Ozeanbereichs bei, der mehr als 500.000 Fußballfeldern entspricht. Ein weiteres Beispiel ist die Kooperation mit dem Autohersteller Kia, bei der Plastik aus dem GPGP in deren neue Elektrofahrzeuge integriert wird. Die erste Charge dieses Plastiks wurde Kia bei der Rückkehr von System 02 in den Hafen übergeben. Ziel ist es weitere Partner zu gewinnen, die recyceltes Plastik in ihren Produkten einsetzen und somit zur dauerhaften Entfernung des Plastiks aus den Ozeanen beitragen (TOC, 2024a; TOC, 2024b). Viele Produkte, die als „aus Ozean-Plastik hergestellt“ gelten, bieten oft keine klare Rückverfolgbarkeit oder Nachweise über den tatsächlichen Anteil an Meeresplastik. Deshalb wurde durch die DNV (internationale Klassifikationsgemeinschaft) ein Standard entwickelt, der die Herkunft des Plastiks aus dem Großen Pazifischen Müllteppich nachweist. Dieser neue Standard, basierend auf etablierten Lieferkettenmodellen, wurde erstmals für die Ocean Cleanup Sonnenbrille angewendet und wird auch für zukünftige Produkte genutzt. Unternehmen können so die Herkunft des verwendeten Plastiks aus den Weltmeeren transparent belegen (TOC, 2024b).

6.2 Ausblick auf zukünftige Maßnahmen

Um das globale Problem der Plastikverschmutzung der Meere zu bekämpfen, verfolgt The Ocean Cleanup eine doppelte Strategie. Zum einen soll Plastikmüll in Flüssen weltweit abgefangen werden, um dessen Eintrag in die Ozeane zu verhindern. Zum anderen wird weiterhin versucht, mit Reinigungssystemen die größten Plastikansammlungen in den Meeren zu beseitigen. Der Schwerpunkt liegt auf der Bekämpfung des größten Müllansammlungsgebiets, dem GPGP. Gleichzeitig werden Ansätze geprüft, wie auch andere Müllansammlungen in den Ozeanen mit geeigneten Systemen adressiert werden können. Das System 03 wird weiterhin getestet und optimiert, um zukünftige Entwicklungen zu unterstützen (TOC 2024a; TOC 2024c).

Die vollständige Reinigung des Gebiets des GPGP erfordert eine Flotte von Systemen in der Größenordnung von System 03. Das System 03 dient dabei als Grundlage für den Ausbau einer Flotte. Das Sieb wurde angepasst, um auch tiefer unter der Wasseroberfläche schwimmendes Plastik aufzufangen, und die Barrieren wurden verbessert, um Überflutungen zu minimieren. Zudem werden Modellierungs- und Forschungsfähigkeiten weiterentwickelt, um gezielt Bereiche mit hoher Plastikdichte anzusteuern und die Effizienz zu steigern. Die Erkenntnisse aus System 02 werden genutzt, um die Wetterbedingungen im Nordpazifik besser zu berücksichtigen und eine effiziente Planung für den Winter zu ermöglichen, wenn die Aktivitäten vorübergehend pausiert werden. Das Ziel

besteht darin, den Reinigungseffekt über längere Zeiträume aufrechtzuerhalten, indem das System wiederverwendet wird und eine fortlaufende Sammlung des Plastiks gewährleistet ist (TOC 2023; TOC, 2024a).

Der „Interceptor“ ist eine von The Ocean Cleanup entwickelte Technologie, die darauf abzielt, Plastikmüll in Flüssen zu sammeln und somit dessen Transport in die Ozeane zu verhindern. Flüsse sind entscheidende Transportwege für Plastikabfälle und tragen somit maßgeblich zur Verschmutzung der Meere bei. Die Technologie des Interceptors wurde speziell für den Einsatz in Flüssen konzipiert, um Plastikmüll effizient zu sammeln, während der Flussbetrieb selbst nicht beeinträchtigt wird. Der Interceptor wird an strategischen Punkten installiert, an denen hohe Konzentrationen von Plastikabfällen auftreten. Das System basiert auf einem passiven, schwimmenden Förderband, das von einem elektrisch betriebenen Mechanismus angetrieben wird, um den Plastikmüll aus dem Fluss zu befördern. Der gesammelte Abfall wird dann an Land transportiert, wo er für das Recycling oder die ordnungsgemäße Entsorgung vorbereitet wird. Seit seiner Einführung hat der Interceptor bereits einen großen Beitrag zur Reduzierung der Plastikbelastung in Flüssen geleistet und dabei Hunderttausende kg Plastik entfernt. Langfristig wird angestrebt, diese Technologie an den weltweit am stärksten betroffenen Flüssen einzusetzen, um die Verschmutzung der Ozeane zu verringern und die Menge an Meeresmüll nachhaltig zu reduzieren (TOC, 2024c).

6.3 Bewertung des Projektes

Das Projekt „The Ocean Cleanup“ wird aufgrund verschiedener Bedenken von vielen Forschenden kritisch betrachtet. Ein zentraler Kritikpunkt an der eingesetzten Technologie betrifft ihre Effektivität bei der langfristigen Beseitigung von Plastikmüll. Kritiker bemängeln, dass die Systeme zwar große Müllansammlungen adressieren, jedoch Schwierigkeiten haben, kleinere Plastikpartikel oder solche in tieferen Gewässern zu erfassen. Die schwimmenden Plastikabfälle, die das Reinigungssystem potenziell sammeln könnte, stellen nur einen kleinen Teil des gesamten Plastikmülls im Ozean dar. In Ökosystemen wie der nordpazifischen Konvergenzzone ist Plastik weit über das offene Meer und große Gebiete verteilt. Eine großflächige Sammlung durch eine Flotte erfordert einen erheblichen Aufwand und verursacht dabei erhebliche CO₂-Emissionen, da für das Schleppen eines Reinigungsgerätes jeweils zwei große Schiffe benötigt werden (Bergmann et al., 2023; Hohn et al., 2020).

Das von The Ocean Cleanup genutzte Reinigungssystem führt laut Bergmann et al. (2023) auch zu einem erheblichen Beifang und erhöht die Sterblichkeit von an der Oberfläche lebenden Organismen, da sich sowohl Plastik als auch die lebenden Organismen

in denselben Gebieten der nordpazifischen Konvergenzzone ansammeln. Diese Oberflächen-Gemeinschaften spielen eine entscheidende Rolle für das Funktionieren der nährstofflimitierten Ökosysteme der Hochsee (Bergmann et al., 2023). Die verwendeten Barrieren und Siebe könnten unbeabsichtigt Tiere und Pflanzen beeinträchtigen, während derzeit nahezu vollständig Umweltverträglichkeitsprüfungen für diese Technologie fehlen. Ein weiterer Kritikpunkt am Projekt betrifft die Kosten und die Frage nach der langfristigen Nachhaltigkeit als Lösung für die globale Plastikverschmutzung. Experten argumentieren, dass eine effektivere Strategie in der Bekämpfung der Ursachen von Plastikmüll, wie der Reduktion von Produktion und Konsum von Einwegplastik, liegen könnte. Zudem wird die Umsetzung des Projekts als herausfordernd angesehen, da die Technologie erhebliche logistische Hürden bei Durchführung und Wartung mit sich bringt. Ein weiteres Problem ist die hohe Kosten-Nutzen-Bilanz, deren ökologischer Nutzen bisher nicht eindeutig belegt ist (Bergmann et al., 2023; Hohn et al., 2020).

Das Ocean Cleanup-Projekt hat bedeutend zur Sensibilisierung für die Plastikverschmutzung der Meere beigetragen. Allerdings könnte die Art und Weise, wie solche Initiativen als Lösungen präsentiert werden, in der Öffentlichkeit den Eindruck erwecken, dass das Problem bereits gelöst ist und kein weiteres kollektives Handeln erforderlich ist. Selbst wenn das Ocean Cleanup-Projekt in der Lage wäre, eine signifikante Menge Plastik aus dem Ozean zu entfernen, blieben zahlreiche Herausforderungen weiterhin bestehen (Hohn et al., 2020; Hengstmann & Tamminga, 2022).

Trotz dieser Bedenken wird das Projekt für seine Innovationskraft und seinen direkten Ansatz zur Bekämpfung der Meeresverschmutzung anerkannt. Es bleibt jedoch abzuwarten, inwieweit die angewandte Technologie in der Praxis den gewünschten Erfolg erzielen kann, insbesondere hinsichtlich der Auswirkungen und Effektivität seiner Maßnahmen zur Reinigung der Meere (Hengstmann & Tamminga, 2022).

7 Fazit und weiterer Forschungsbedarf

Die Plastikverschmutzung der Meere stellt eine der größten umweltpolitischen Herausforderungen der Gegenwart dar, mit weitreichenden Auswirkungen auf Ökosysteme, Tiere und letztlich auch den Menschen. Um diese Problematik nachhaltig zu lösen, ist ein multifaktorieller Ansatz erforderlich (Bergmann et al., 2023; Tekman et al., 2022).

Die zentrale Herausforderung im Umgang mit Plastik liegt im Aufbau eines effizienten Abfallmanagementsystems, insbesondere in Entwicklungsländern. Moderne Abfallbehandlungssysteme und -technologien sind noch nicht überall zugänglich, was dazu führt, dass erhebliche Mengen Plastikmüll unbehandelt in die Umwelt und somit auch in die Meere gelangen. Entscheidend ist es sowohl in Industrieländern als auch in Entwicklungsländern funktionierende Abfallmanagementstrukturen zu etablieren und die Recyclingquoten zu erhöhen (Bødtker et al., 2024; Unnerstall, 2021). Neben dem Aufbau effektiver Abfallmanagementsysteme ist es ebenfalls notwendig, Maßnahmen zur Reduktion von Plastikabfällen zu ergreifen. Dies umfasst sowohl die Verbesserung der Produktions- und Konsumgewohnheiten als auch den Einsatz effizienter Recyclingtechnologien. Darüber hinaus sollte die Lebensdauer von Plastikprodukten verlängert und ihre Zusammensetzung optimiert werden. Es gilt, gezielte Maßnahmen umzusetzen, die die Freisetzung von Plastik in die Umwelt über den gesamten Lebenszyklus hinweg verhindern (Bødtker et al., 2024).

Die Modellrechnungen im „Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060“ der OECD (2022b) zeigen, dass sich bei der aktuellen Politik der Plastikverbrauch bis 2060 aufgrund von Wirtschaftswachstum und steigender Bevölkerung nahezu verdreifachen wird. Wobei der größte Anstieg in Schwellenländern erwartet wird. Gleichzeitig werden sich auch die Plastikabfälle fast verdreifachen, wobei ein Großteil deponiert und nur ein kleiner Teil recycelt wird. Der Anteil von recyceltem Plastik wird trotz wachsender Recyclingraten nur 12 % des Gesamtverbrauchs ausmachen. Die Menge an Plastik, die in die Umwelt gelangt, könnte sich verdoppeln, und die Belastung der Gewässer mit Plastik wird sich mehr als verdreifachen. Zudem wird ein Anstieg der Umweltauswirkungen durch die Plastikproduktion erwartet, wobei die Treibhausgasemissionen mehr als doppelt so hoch ausfallen könnten. Weitere Auswirkungen wie Ozonbildung und Versauerung werden ebenfalls deutlich zunehmen (OECD, 2022b).

Politische Lösungsansätze wie das globale UN-Plastikabkommen spielen eine entscheidende Rolle im Kampf gegen die weltweite Plastikverschmutzung und bieten eine

Grundlage für internationale Zusammenarbeit. Dennoch erweist sich ihre Umsetzung als äußerst schwierig, da sie zahlreiche Herausforderungen mit sich bringt, wie die unterschiedlichen Interessen der beteiligten Staaten, die Notwendigkeit verbindlicher Verpflichtungen und die logistischen Hürden bei der Kontrolle und Durchsetzung der vereinbarten Maßnahmen. Die Maßnahmen können langfristig nur dann erfolgreich sein, wenn sie von verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen unterstützt werden. Hierzu zählen Expertinnen und Experten aus der Forschung, Verantwortliche aus Politik und Wirtschaft sowie Akteure der Zivilgesellschaft und die breite Bevölkerung. Ein rechtsverbindliches Instrument zur Bekämpfung der Plastikverschmutzung sollte Sicherheits-, Nachhaltigkeits- und Transparenzkriterien festlegen, die von einem unabhängigen Expertengremium entwickelt werden. Diese Kriterien würden die effektive Umsetzung des Abkommens unterstützen, einschließlich weltweiter Standards, Methoden, sozialer und ökologischer Ausgangspunkte sowie Überwachung, Berichterstattung und Einhaltung (Bergmann et al., 2023; Hohn et al., 2020). Die in Kapitel fünf vorgestellten Plastikgutschriften stellen innovative Finanzierungs- und Kontrollmaßnahmen dar, berücksichtigen jedoch nicht die komplexen Unterschiede und Auswirkungen der verschiedenen Plastikarten. Ihre Verknüpfung mit politischen Maßnahmen könnte Regelungslücken schaffen und wirksamere Ansätze zur Reduzierung von Plastik verzögern. Daher stellen Plastikgutschriften keinen innovativen Ansatz zur Reduzierung der Verschmutzung dar, sondern könnten die fragmentierte Plastik Governance verstärken und unbeabsichtigte negative Auswirkungen begünstigen (GIZ, 2022; Moon et al, 2024).

Im Hinblick auf die globalen Wertschöpfungsketten und den Handel mit Plastik könnte die Angleichung von Designkonzepten und die Regulierung von Chemikalien einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit von Plastik leisten. Ein internationales Konzept für die Abfallbewirtschaftung sollte darauf abzielen, alle verfügbaren Finanzierungsquellen, einschließlich der Entwicklungshilfe, zu nutzen, um Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen bei der Deckung der geschätzten jährlichen Kosten für die Verbesserung der Abfallbewirtschaftungsinfrastruktur zu helfen (OECD, 2022a; OECD, 2022b). Die zunehmenden Abfallmengen stellen eine der größten Herausforderungen für die Umsetzung der Agenda 2030 dar, da sie alle drei Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung betreffen. Eine effektive Kreislaufwirtschaft ist dabei von entscheidender Bedeutung, um sowohl den Klimaschutz voranzutreiben als auch die nachhaltige Nutzung globaler Ressourcen zu gewährleisten. Besonders in Entwicklungsländern bietet die Etablierung einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft das Potenzial, die Lebensqualität und Gesundheit der Bevölkerung deutlich zu verbessern. Im Hinblick auf die nachhaltigen Entwicklungsziele stellt die Bewältigung der Plastikabfälle eine komplexe

und vielschichtige Herausforderung dar. Diese erfordert eine integrierte und koordinierte Herangehensweise, um die angestrebten Ziele der nachhaltigen Entwicklung zu erreichen und gleichzeitig die negativen Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft zu minimieren (Hauff, 2024; Veith et al., 2024).

Für die EU sollte es ein kurzfristiges Ziel sein, das illegale Deponieren von Plastikabfällen vollständig zu verhindern und Deponien ausschließlich für die Entsorgung unvermeidbarer Abfälle zu nutzen. In weniger industrialisierten Regionen sollte das Ziel im kurz- bis mittelfristigen Zeitraum darin bestehen, Plastikabfälle zunächst zu erfassen und die unsachgemäße Entsorgung sowie illegales Deponieren zu verringern und zu verhindern. Langfristig müssen auch dort Abfallwirtschaftssysteme aufgebaut werden, die eine angemessene Entsorgung aller Siedlungsabfälle ermöglichen, sodass auch Plastikabfälle einer Verwertung zugeführt werden können und nicht in die Meere gelangen (Orth et al., 2022). Die langfristigen negativen Auswirkungen von Plastik in der Umwelt können nur dann wirksam verringert werden, wenn die Einträge von Plastik reduziert und die Quellen der Verschmutzung gestoppt werden. Dennoch lässt sich das Problem des bereits in den Ozeanen befindlichen Plastiks oder des Plastiks, das an Strände gespült wird, nicht allein durch die Vermeidung zukünftiger Einträge lösen. Selbst wenn Plastik erfolgreich aus dem Meer gesammelt wird, bleibt die Frage, was mit dem gesammelten Abfall geschieht. Derzeit landen die meisten weggeworfenen Plastikabfälle auf Mülldeponien, wo sie Hunderte von Jahren benötigen, um sich zu zersetzen, dabei jedoch schädliche Giftstoffe in Boden und Grundwasser abgeben (Bergmann et al., 2023; Hengstmann & Tamminga, 2022).

Trotz zahlreicher Initiativen zur Reinigung der Meere besteht weiterhin ein erheblicher Forschungsbedarf, um wirksame Methoden zur gezielten Entfernung von Plastikabfällen aus den Ozeanen zu entwickeln. Insbesondere im Bereich der sogenannten Plastic Removal Technologies (PRTs) existieren technologische, ökologische und ökonomische Herausforderungen, die es zu überwinden gilt. Diese Technologien haben das Potenzial, eine entscheidende Rolle im Einsatz gegen die Plastikverschmutzung der Meere zu spielen, erfordern jedoch eine weiterführende und vertiefte wissenschaftliche Auseinandersetzung sowie Innovationen, um ihre Wirksamkeit und Effizienz nachhaltig zu steigern. Die potenzielle Wirksamkeit von PRTs bleibt angesichts des schnell wachsenden Ausmaßes und der Komplexität des globalen Plastikproblems weit hinter den erforderlichen Maßnahmen zurück. Die Küstenlinien erstrecken sich weltweit über Hunderttausende von km, der Ozean umfasst ein Volumen von 1,37 Milliarden km³ und bedeckt eine Fläche von 361 Millionen km², während Flüsse eine Fläche von 773.000 km² einnehmen.

Diese Zahlen verdeutlichen die enorme Dimension der Herausforderung. Eine Meta-Analyse von Bergmann et al. (2023) zeigte, dass bislang keine der PRT-Technologien hinsichtlich ihrer Effizienz bei der Entfernung von Plastik bewertet wurde. Die Entfernung von Plastik löst das Problem nicht, sondern verlagert es lediglich an einen anderen Ort. Das gesammelte Plastik lässt sich nur selten wiederverwenden oder recyceln. Zur Herstellung von Plastik kommen mindestens 13.000 Chemikalien zum Einsatz, von denen ein Viertel als gefährlich eingestuft wird. Darüber hinaus absorbiert Plastik persistente organische Schadstoffe aus dem Wasser und unterliegt der Verwitterung, was ihre Zusammensetzung verändert und ihre Eignung als Ausgangsmaterial für Abfallmanagementtechnologien und schadstofffreie Produkte einschränkt. Auch wenn Plastik vor der Fragmentierung aus dem Wasser entfernt werden kann, führen die meisten Behandlungsanlagen zu negativen Auswirkungen wie Treibhausgasemissionen, Luft-, Boden- und Wasserverschmutzung, Landverbrauch und der Ansammlung von Gefahren in den aufnehmenden Gebieten. Eine unabhängige Bewertung der Auswirkungen ist notwendig, um die Behauptung zu bestätigen, dass PRTs eine sichere, nachhaltige und bedeutende Lösung für die Plastikkrise darstellt (Bergmann et al., 2023; Hohn et al., 2020). Auch können PRTs von Plastikherstellern als Instrument genutzt werden, um weiteres Produktionswachstum mit externalisierten Kosten zu legitimieren und dabei Greenwashing zu betreiben, indem sie sich als umweltfreundlicher darstellen, als sie tatsächlich sind. Aufgrund ihrer hohen Medienpräsenz besteht das Risiko, dass Hersteller PRTs finanzieren, um ihre Produktion unter dem Deckmantel der erweiterten Herstellerverantwortung oder Plastik-Kreditprogrammen fortzusetzen. Dadurch würde die Verantwortung für die externen Kosten der Plastikproduktion von den Herstellern auf die Gesellschaft verlagert (Bergmann et al., 2023).

Reinigungsprojekte wie „The Ocean Cleanup“ haben dazu beigetragen, das Bewusstsein für die Plastikverschmutzung der Meere zu erhöhen. Jedoch könnte die Art und Weise, wie solche Initiativen als Lösungen präsentiert werden, in der Öffentlichkeit den Eindruck erwecken, dass das Problem bereits gelöst ist und keine zusätzlichen kollektiven Maßnahmen mehr erforderlich sind (Hohn et al., 2020). Angesichts der dreifachen Krise (Klimawandel, Verlust der biologischen Vielfalt und Umweltverschmutzung) sollten PRTs nicht als sichere und nachhaltige Lösung für die globale Plastikkrise betrachtet werden, ohne eine unabhängige wissenschaftliche Bewertung. Diese Bewertung muss auf strengen, weltweit standardisierten Kriterien basieren, die Klimakosten, menschliche Gesundheit, Rechte, Gleichberechtigung, Gerechtigkeit, chemische Emissionen, Sterblichkeit von Organismen und den Verlust der Biodiversität umfassen. Die

Umweltkosten der Plastikverschmutzung sollten dabei transparent gegen die Kosten der PRT-Maßnahmen abgewogen werden (Bergmann et al., 2023).

Eine signifikante Reduktion des Plastikmüll im Meer kann nur durch die Sammlung an Flüssen sowie durch eine Kombination von Flussbarrieren und Reinigungsgeräten erreicht werden. Flüsse tragen wesentlich zur Verschmutzung der Meere bei, da sie als Transportwege für Plastikabfälle dienen. Langfristig führt die Produktion und Verbrennung von Plastik zu erheblichen Auswirkungen auf den globalen Kohlenstoffhaushalt. Eine nachhaltige Lösung zur Beseitigung von Plastikmüll in den Ozeanen erfordert eine Reduktion der Plastikemissionen in Verbindung mit einer verstärkten Sammlung des Abfalls und erweiterter Herstellerverantwortung. Hierbei sollte die Plastikproduktion, als eine der Hauptursachen der Verschmutzung, schrittweise verringert werden. Zusätzlich ist eine nachhaltige Bewirtschaftung bestehender Abfälle von entscheidender Bedeutung, wobei der Fokus auf der effektiven Verwaltung von Abfallmengen auf Deponien und inoffiziellen Müllkippen liegen sollte, um künftige Umweltbelastungen zu verhindern. (Bergmann et al., 2023; Hohn et al., 2020).

Ein großer Teil des Meeresplastik lagert sich auf dem Tiefseeboden ab, der aufgrund seiner schwer zugänglichen Lage eine Herausforderung für die Sammlung darstellt. Jüngste EU-Projekte konzentrieren sich daher auf die Entwicklung von autonomen Fahrzeugen, Robotersystemen und künstlicher Intelligenz, um Plastik vom Meeresboden zu entfernen (Bergmann et al., 2023).

Die Fokussierung auf PRT-Innovationen lenkt Ressourcen von wirksamen Präventionsmaßnahmen ab, trägt nicht zur Reduzierung der weltweiten Plastikproduktion bei und könnte Verbrauchern ein falsches Gefühl der Sicherheit geben. Ansätze, wie die Sammlung von Plastik, sind kostengünstiger für die Gesellschaft und würden insbesondere für Staaten mit niedrigem Bruttoinlandsprodukt entscheidende, wirksame Lösungen bieten (Bergmann et al., 2023). Initiativen wie "Fishing for Litter", bei denen Fischer Plastikmüll während ihrer Fischereitätigkeiten sammeln und ihn anschließend in speziellen Hafenauffanganlagen entsorgen, stellen eine kostengünstige Möglichkeit dar, die Verschmutzung zu reduzieren. Diese Initiativen fördern zudem Verhaltensänderungen bei den Teilnehmenden und könnten potenziell zu einer grundlegenden Veränderung in einem Sektor führen, der eine der Hauptquellen für Plastikmüll im Meer darstellt (Fishing for Litter, 2024).

Trotz zahlreicher Studien zum Plastikeintrag in Ökosysteme besteht weiterhin Forschungsbedarf, insbesondere in Bezug auf die langfristigen Auswirkungen auf die Biodiversität, die Ökosystemfunktionen und die Wechselwirkungen zwischen

verschiedenen Umweltfaktoren. Nur etwa 5 % der Studien, die sich mit den Auswirkungen von Plastikabfällen befassen, übertragen ihre Ergebnisse auf das gesamte Ökosystem. Viele dieser Untersuchungen stützen sich auf Laborversuche oder analysieren lediglich die Auswirkungen auf ausgewählte Arten. Die wenigen Studien zu natürlichen Ökosystemen beschränken sich häufig auf kleine Teilbereiche, wodurch die ökologischen Auswirkungen oft nur indirekt über die Effekte auf einzelne Komponenten des Ökosystems erschlossen werden (Tekman et al., 2022). Auch bei der Quantifizierung der Verteilung von Plastikmüll und dem Verständnis der Zersetzungsprozesse, die durch Umweltfaktoren wie Temperatur, Salinität und UV-Strahlung beeinflusst werden, besteht weiterhin ein Bedarf an Forschung (Tekman et al., 2022). Die genaue Exposition des Menschen gegenüber Mikroplastik ist noch unklar, da verlässliche Daten zur Konzentration von Mikroplastik in Luft, Wasser und Lebensmitteln fehlen und die Angaben stark schwanken. Auch das Wissen über die Aufnahme und Ausscheidung von Mikroplastik im menschlichen Körper ist bisher begrenzt. Trotz zahlreicher wissenschaftlicher Studien zu den Themen Exposition, Resorption und Verbleib von Mikroplastik im Organismus bleiben viele Fragen offen. Eine zentrale Erkenntnis ist jedoch, dass Mikroplastik inzwischen in nahezu allen menschlichen Organen und Geweben nachweisbar ist (Hengstmann & Tamminga, 2022; UBA, 2024; Unnerstall, 2021).

Ein weiterer Ansatz zur Reduzierung der Mikroplastikverschmutzung könnte der biologische Abbau durch Bakterien sein, die Mikroplastik als Kohlenstoff- und Energiequelle nutzen. Bakterien wie *Staphylococcus* und *Pseudomonas* sind in der Lage, Polyethylen effizient abzubauen. Dennoch ist die Forschung zu den Wechselwirkungen von Mikroplastik mit anderen Schadstoffen sowie dessen Auswirkungen auf Tiere, Umwelt und menschliche Gesundheit noch unzureichend. Weitere Studien sind notwendig, um die ökologischen und toxischen Effekte zu verstehen (Xia et al., 2023).

Die Optimierung des Lebenszyklus von Mikroplastik in Plastikprodukten kann durch die Implementierung eines integrierten Abfallmanagementsystems sowie die Durchführung umfassender Lebenszyklusbewertungen erreicht werden. Darüber hinaus wird empfohlen, Lebenszyklusanalysen sowohl in den Produktions- als auch in den Entsorgungsprozessen von Mikroplastik zu integrieren. Ein weiterer Ansatz zur Reduktion der Umweltauswirkungen von Mikroplastik ist der vermehrte Einsatz biologisch abbaubarer Plastikprodukte, um die langfristige Belastung durch Plastikabfälle zu verringern (Xia et al., 2023). Bio-Plastik stellt eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichem Plastik dar, da es die Vorteile von Plastik bewahren, gleichzeitig jedoch den Verbrauch von Erdöl verringern und eine schnellere Abbaubarkeit ermöglichen soll. Es lässt sich in drei

Haupttypen unterteilen: bio-basiertes Plastik (aus nachwachsenden Rohstoffen wie Mais), biologisch abbaubares Plastik (das sich unter bestimmten Bedingungen zersetzt) und eine Kombination aus beiden Eigenschaften. Trotz seines Potenzials macht Bio-Plastik jedoch weniger als 1 % der weltweiten Plastikproduktion aus. Bio-Plastik wird oft als umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichem Plastik betrachtet, ist jedoch nicht ohne Problematik. Die für seine Herstellung benötigten Pflanzen können Nahrungsmittelkulturen verdrängen und so zusätzliche Umweltprobleme verursachen. Zudem ist Bio-Plastik in der Umwelt nicht immer vollständig abbaubar, auch wenn es aus nachwachsenden Rohstoffen besteht. Unter natürlichen Bedingungen zersetzt sich bioabbaubares Plastik oft nur sehr langsam oder gar nicht. In der Regel sind spezielle Bedingungen wie hohe Temperaturen über längere Zeiträume erforderlich, damit es vollständig abgebaut wird – Bedingungen, die in der Natur selten anzutreffen sind. Aus diesem Grund sollten als biologisch abbaubar gekennzeichnete Verpackungen nicht einfach im Bio-Müll oder auf dem Kompost entsorgt werden, da sie dort nur unvollständig abgebaut werden und Plastikreste in der Umwelt hinterlassen können. Insgesamt trägt Bio-Plastik bisher nicht zur Lösung der Plastikproblematik bei. Wie bei herkömmlichem Plastik sollten auch Bio-Plastik-Produkte möglichst wiederverwendet und recycelt werden (Hengstmann & Tamminga, 2022).

Es ist derzeit schwer abzuschätzen, ob die bestehenden Maßnahmen ausreichen werden, um die Plastikbelastung der Meere signifikant zu verringern. Gleichzeitig ist es notwendig, Lösungen für die Beseitigung des bereits in den Ozeanen befindlichen Plastiks zu entwickeln. Nur ein ganzheitlicher und koordinierter Ansatz kann erfolgreich dazu beitragen, die Meere von Plastikmüll zu befreien und gleichzeitig einen umweltfreundlichen Umgang mit Plastikabfällen zu fördern. In den kommenden Jahrzehnten sollte der Fokus daher auf der Optimierung der Abfallbewirtschaftung sowie der effektiven Rückgewinnung von Plastik aus den Meeren, insbesondere aus Küstengebieten, liegen. Insbesondere in Ländern, die Plastikmüll importieren, sollte der Fokus verstärkt auf die Vermeidung der unkontrollierten Deponierung von Plastikabfällen gerichtet werden. Die Forschung zur Plastikverschmutzung in marinen Ökosystemen stellt ein interdisziplinäres Feld dar, das eine enge Zusammenarbeit zwischen verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen, politischen Akteuren und der Industrie erfordert, um langfristige, nachhaltige Lösungen zu entwickeln (Hauff, 2024; Unnerstall, 2021; Tekman et al., 2022).

Literaturverzeichnis

Beaumont, N. J., Aanesen, M., Austen, M. C., Börger, T., Clark, J. R., Cole, M., Hooper, T., Lindeque, P. K., Pascoe, C., Wyles, K. J. (2019): Global ecological, social and economic impacts of marine plastic. *Marine pollution bulletin*, Ausgabe 142. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.022>

Bergmann, M., Arp, H. P. H., Carney Almroth, B., Cowger, W., Eriksen, M., Dey, T., Gündoğdu, S., Helm, R. R., Krieger, A., Syberg, K., Tekman, M. B., Thompson, R. C., Villarubia-Gómez, P., Warriier, A. K., & Farrelly, T. (2023): Moving from symptom management to upstream plastics prevention: The fallacy of plastic cleanup technology. *One Earth*. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.10.022>

Bødtker, G., O' Hare, P., Farrelly, T., Bergmann, M. (2024): Removal of existing and legacy plastic pollution. Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung. Abgerufen am 02.12.2024 <https://epic.awi.de/id/eprint/59533/>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2024a): Globales UN-Abkommen gegen Plastikmüll. Abgerufen am 10.12.2024 https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Europa___International/plastikmuell_un-abkommen_bf.pdf

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2024b): Informationspapier zum Globalen Plastikabkommen. Abgerufen am 24.11.2024 <https://www.bmuv.de/download/informationspapier-zum-globalen-plastikabkommen>

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) (2023): Abfall- und Kreislaufwirtschaft Meeresmüll – ein globales Problem. Abgerufen am 23.11.2024. <https://www.bmz.de/de/themen/kreislaufwirtschaft/meeresmuell-18464>

Büttner, S., Handmann, U., Irrek, W. (2024): Transformation zur Circular Economy. Kleine und mittlere Unternehmen im Wandel begleiten. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-43338-3>

Dos Passos, J S., Lorentz, C., Laurenti, D., Royer, S-J., Chontzoglou, I., Biller, P. (2024): Hydrothermal liquefaction of plastic marine debris from the North Pacific Garbage Patch. Resources, Conservation and Recycling, Ausgabe 209. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107822>

Europäisches Parlament (EP) (2018a): Plastik im Meer: Fakten, Auswirkungen und neue EU-Regelungen. Abgerufen am 22.09.2024 <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20181005STO15110/plastik-im-meer-fakten-auswirkungen-und-neue-eu-regelungen>

Europäisches Parlament (EP) (2018b): Plastikmüll und Recycling in der EU: Zahlen und Fakten. Abgerufen am 22.09.2024 <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20181212STO21610/plastikmull-und-recycling-in-der-eu-zahlen-und-fakten>

Europäisches Parlament (EP) (2018c): Die Maßnahmen der EU für weniger Kunststoffmüll in Europa. Abgerufen am 23.09.2024 <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20180830STO11347/die-massnahmen-der-eu-fur-weniger-kunststoffmull-in-europa>

Fishing for Litter (2024): Learn more. Abgerufen am 24.12.2024 <https://fishingforlitter.org/learn-more/>

Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT) (2020): Trend -NEWS. Ocean Clean-Up. Abgerufen am 10.08.2024 <https://www.int.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/corporate-technology-foresight/trend-news/ocean-clean-up.html>

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (2024): Plastikmüll im Meer: Fragen und Antworten. Abgerufen am 17.08.2024 <https://www.geomar.de/entdecken/plastikmuell-im-meer>

GIZ GmbH (2021): Rethinking Plastics: Meeresmüll durch Kreislaufwirtschaft verringern. Abgerufen am 29.11.2024 <https://www.giz.de/de/weltweit/94003.html>

GIZ GmbH (2022): Position paper of the sectoral department Plastic Credits. Abgerufen am 23.10.2024 <https://www.giz.de/expertise/downloads/giz2022-en-position-paper-plastic-credits.pdf>

GIZ GmbH (2023): Zur Vermeidung von Meeresmüll das Abfallmanagement verbessern. Abgerufen am 02.12.2024 <https://www.giz.de/de/weltweit/127452.html>

Goebel, J., Wermter, B. (2023): Die Plastiksucht. Die fragwürdigen Erfolge der Plastik-Allianz. Wirtschafts Woche. Abgerufen am 20.12.2024 <https://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/die-plastiksucht-die-fragwuerdigen-erfolge-der-plastik-allianz/29168050.html>

Harris, P. T., Westerveld, L., Nyberg, B., Maes, T., Macmillan-Lawler, M., Appelquist, L. R. (2021): Exposure of coastal environments to river-sourced plastic pollution. *Science of The Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145222>

Hauff, M. v. (2022): Nachhaltigkeit in der Entwicklungszusammenarbeit. Studienbrief Nr. 0110 des Fernstudiengangs „Nachhaltige Entwicklungszusammenarbeit“ der TU Kaiserslautern.

Hauff, M. v. (2024): Grundwissen Circular Economy. Vom internationalen Nachhaltigkeitskonzept zur politischen Umsetzung. 2. Auflage. UVK Verlag.

Heinrich-Böll-Stiftung (HBS), Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) (2019): Plastikatlas - Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff. 6. Auflage, 2021. Abgerufen am 15.08.2024 <https://www.boell.de/sites/default/files/2021-09/Plastikatlas%202019%206.Auflage%20web.pdf>

Hengstmann, E., Tamminga, M. (2022): Was ist Plastik? In: Plastik in der Umwelt. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65864-2_1

Holzbaur, U. (2020): Nachhaltige Entwicklung. Der Weg in eine lebenswerte Zukunft. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-29991-0>

Hohn, S., Acevedo-Trejos, E., Abrams, J. F., de Moura, J. F., Spranz, R., Merico, A. (2020): The long-term legacy of plastic mass production. *Science of The Total Environment*, Ausgabe 746. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141115>

Jiang, B., Kauffman, A. E., Li, L., McFee, W., Cai, B., Weinstein, J., Lead, J. R., Chatterjee, S., Scott, G. I., Xiao, S. (2020): Health impacts of environmental contamination of micro- and nanoplastics: a review. *Environmental Health and Prevent Medicine*. <https://doi.org/10.1186/s12199-020-00870-9>

Laredo, G. C., Reza, J., Meneses Ruiz, E. (2023): Hydrothermal liquefaction processes for plastics recycling: A review. *Cleaner Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2023.100094>

Leal Filho, W.; Hunt, J.; Kovaleva, M. (2021): Garbage Patches and Their Environmental Implications in a Plastisphere. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse9111289>

Lebreton, L. (2022): The status and fate of oceanic garbage patches. *Nature Reviews Earth & Environment*. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00363-z>

Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., Lamoree, M. H. (2022): Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>

Moon, S., Tangri, N., Bonisoli Alquati, A., Ralston, R., Bergmann, M., Syberg, K., Olsen, T., Wang, M., Castillo, A. C., Colombini, G., Alegado, J. E. B. (2024): Unpacking plastic credits: Challenges to effective and just global plastics governance. *One Earth*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4984333

Nier, H. (2019): Die größten Plastikmüll-Exporteure der Welt. Statista. Statista GmbH. Abgerufen am 24.12.2024. <https://de.statista.com/infografik/18340/die-groessten-plastikmuell-exporteure-der-welt/>

OECD (2022a): *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>

OECD (2022b): *Global Plastics Outlook. Policy Scenarios to 2060*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>

Orth, P., Bruder, J., Rink., M. (2022): *Kunststoffe im Kreislauf. Vom Recycling zur Rohstoffwende*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37814-1>

Park, B. C., Brown, A., Laubinger, F., Börkey, P. (2024): *OECD Environment Working Papers No. 233. Monitoring trade in plastic waste and scrap*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/013bcfdd-en>

Plastics Europe (2024a): The Plastics Transition. Abgerufen am 10.11.2024 The Plastics Transition • Plastics Europe

Plastics Europe (2024b): Plastikmüll in den Meeren. Abgerufen am 10.11.2024 Plastikmüll in den Meeren

Rist, S., Baun, A., Almeda, R., & Hartmann, N. B. (2019): Ingestion and effects of micro- and nanoplastics in blue mussel (*Mytilus edulis*) larvae: Marine Pollution Bulletin. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.069>

Romera-Castillo, C., Lucas, A., Mallenco-Fornies, R., Brionez-Rizo, M., Calvo, E., Pelejero, C. (2023): Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment, Ausgabe 854. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

Sharma, S., Sharma, V., Chatterjee, S. (2023): Contribution of plastic and microplastic to global climate change and their conjoining impacts on the environment - A review. The Science of the total environment, Ausgabe 875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162627>

The Ocean Cleanup (TOC) (2023): System 03: A Beginner's Guide. Abgerufen am 07.10.2024 <https://theoceancleanup.com/updates/system-03-a-beginners-guide/>

The Ocean Cleanup (TOC) (2024a): Oceans - How it Works. Cleaning up the garbage patches. Abgerufen am 05.10.2024 <https://theoceancleanup.com/oceans/>

The Ocean Cleanup (TOC) (2024b): What will we do with the trash? Waste Management and Recycling. Abgerufen am 05.10.2024 <https://theoceancleanup.com/waste-management-and-recycling/>

The Ocean Cleanup (TOC) (2024c): Halting plastic before it reaches the ocean. Tackling trash in rivers. Abgerufen am 06.10.2024 <https://theoceancleanup.com/rivers/>

Tekman, M. B., Walther, B. A., Peter, C., Gutow, L.; Bergmann, M. (2022): Impacts of plastic pollution in the oceans on marine species, biodiversity and ecosystems, 1–221, WWF Germany, Berlin. Doi: 10.5281/zenodo.5898684

Umweltbundesamt (UBA) (2024): Mikroplastik. Abgerufen am 25.12.2024 <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/mikroplastik#fragen-und-antworten-zu-mikroplastik>

United Nations Environment Programme (UNEP) (2023): Turning off the Tap: How the world can end plastic pollution and create a circular economy. Abgerufen am 28.10.2024 <https://www.unep.org/resources/turning-off-tap-end-plastic-pollution-create-circular-economy>

United Nations Environment Programme (UNEP) (2024): Intergovernmental Negotiating Committee on Plastic Pollution. Abgerufen am 26.11.2024 <https://www.unep.org/inc-plastic-pollution>

Unnerstall, T. (2021): Faktencheck Nachhaltigkeit. Ökologische Krisen und Ressourcenverbrauch unter der Lupe. 1. Auflage. Springer Berlin Heidelberg.

Veith, T., Obersteiner, G., Hrad, M., Allesch, A. (2024): Kunststoffabfälle im Kontext der SDGs. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s00506-024-01036-5>

Vereinte Nationen (UN) (2024): Ziele für nachhaltige Entwicklung. Abgerufen am 02.09.2024 <https://unric.org/de/17ziele/>

WWF Deutschland (2023): Faktenblatt. Plastikmüll in den Weltmeeren. Abgerufen am 15.09.2024 <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Plastik/WWF-Faktenblatt-Plastikmuell.pdf>

Xia, C., Cai, L., Lam, S. S., & Sonne, C. (2023): Microplastics pollution: Economic loss and actions needed. Eco-Environment & Health. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2023.04.001>

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Freiburg, 27.12.2024

Julia Steinhart

Ort, Datum

Unterschrift