

**Universität des 3. Lebensalters
an der Goethe-Universität Frankfurt am Main**

Strukturierter Studiengang „Mensch und Natur“

Abschlussarbeit

**Thema: Plastikmüll und Mikroplastik
- Ballast für die Meere**

Vorgelegt von:

Walter Wiesmann

Studiennummer: 20190299

Datum: 08.Juli 2022

Betreuer: Dr. rer. nat. Manfred Schroeder

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Vorwort</i>	6
2	<i>Einführung</i>	7
3	<i>Kunststoffe und Kunststofftechnik</i>	11
3.1	Begriffe und Einteilungen in der Kunststofftechnik	12
3.2	Herkunft, Herstellung und Verwendung von Kunststoff	13
3.3	Der Weg des Plastiks in die Meere	15
3.4	Makroplastikmüll und seine Auswirkungen	16
4	<i>Mikroplastik im Meer</i>	17
4.1	Primäres und Sekundäres Mikroplastik	17
4.2	Einflüsse auf die Nahrungskette	18
5	<i>Plastikinseln in den Weltmeeren</i>	19
5.1	Das System der Meeresströmungen	22
5.2	Die Bewegung von Luft- und Wassermassen	23
5.3	Müllwirbel im Meer	23
5.4	Das Bilden von Plastikinseln durch Müllanhäufung	26
6	<i>Die Plastikflut in den Weltmeeren und ihre Folgen</i>	27
6.1	Anlandungen an Küstenregionen	29
6.2	Versauerung der Ozeane	30
6.3	Auswirkungen auf das Klima	34
6.4	Einflüsse auf die Nahrungskette	36
7	<i>Methoden zur Vermeidung von Plastikmüll</i>	37
7.1	Wohin mit dem Plastikmüll?	39
7.2	Aufklärung als Handlungsziel	41
7.3	Das Prinzip der Kreislaufwirtschaft	42
7.4	Verpackungen aus Ersatzstoffen	46
7.5	Recycling von Plastikmüll	48
8	<i>Zusammenfassung</i>	51
9	<i>Literaturverzeichnis</i>	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sozio-ökonomische Kenngrößen	8
Abbildung 2: Polypropylen	11
Abbildung 3: Der Weg vom Erdöl zum Kunststoff	13
Abbildung 4: Ranking der Ozeanverschmutzer mit Plastikmüll	15
Abbildung 5: Mikroplastik-Kreislauf	18
Abbildung 6: Oberflächenströmungen mit Müllregionen	20
Abbildung 7: Meeresströmungen	22
Abbildung 8: Globale Windsysteme	23
Abbildung 9: Plastikmüll-Konzentration in den subtropischen Wirbeln	24
Abbildung 10: Zersetzungszeiten von Müll im Meer	30
Abbildung 11: Biologische Kohlenstoffpumpe	35
Abbildung 12: Aufnahme von Mikroplastik	36
Abbildung 13: Zielländer Deutscher Müllexporte	40
Abbildung 14: PET-Recycling	45
Abbildung 15: Cradle-to-Cradle Kreisläufe	46
Abbildung 16: Werkstoffliche Verwertung	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kunststoffe im Meeremüll	14
Tabelle 2: Plastikverschmutzung in den Weltmeeren	25
Tabelle 3: Daten der Plastikwirbel	25
Tabelle 4: Plastikmüll-Exporteure	28
Tabelle 5: Exportländer von Plastikmüll nach Malaysia	28
Tabelle 6: Produktionsraten der Plastikarten	32
Tabelle 7: Heizwerte verschiedener Kunststoffe und Kohle	50

Schaubilder, Diagramme

Übersicht 1: Vermüllung der Ozeane durch Plastik	16
Übersicht 2: Substanzen auf der pH-Wert-Skala	30
Übersicht 3: Recycling-Quoten Europa und USA	38
Übersicht 4: Kurzfassung der Leitsätze zur Kreislaufwirtschaft	45

Verwendete Abkürzungen

A	Fläche	NA	Nordatlantik
a	Jahr	NABU	Naturschutzbund Deutschland e.V.
ARA	Abwasser-Reinigungs-Anlage	NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
BIP	Brutto-Inlands-Produkt	NP	Nordpazifik
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland – BUND e.V.	OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
C2C	Cradle to Cradle	PCB	Polychlorierte Biphenyle
CH₄	Methan	PE	Polyethylen
C₂H₄	Ethylen	PET	Polyethylenterephthalat
CO₂	Kohlendioxid	pmol	Pikomol = $1 \cdot 10^{-12}$ mol
d	Day	PP	Polypropylen
EU	Europäische Union	ppm	Parts per million
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff	PS	Polystyrol
G	Gewicht	PUR	Polyurethan
g	Gramm	PVC	Polyvinylchlorid
g/km²	Gramm pro Quadratkilometer	SA	Südatlantik
GMIT	Galway-Mayo Institute of Technology	SDG	Sustainable Development Goals
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change	SP	Südpazifik
IO	Indischer Ozean	t	Tonne
HDPE	High-Density Polyethylene	THG	Treibhausgas
IR	Infrarot	U3L	Universität des 3. Lebensalter
kg	Kilogramm	UBA	Umwelt-Bundesamt
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz	UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig

km²	Quadratkilometer	UN	United Nations
KRWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz	UNEA	United Nations Environment Assembly
LDPE	Low-Density Polyethylene	UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
MED	Mediterranean Sea	UNEP	United Nations Environment Programme
Mio.	Millionen	UNO	United Nations Organization
MJ	Mega-Joule	UV	Ultraviolett
mm	Millimeter	VR	Volksrepublik
Mrd.	Milliarden	WS	Wintersemester
Mt	Megatonne = $1 \cdot 10^6$ Tonnen	WWF	World Wildlife Fund
Mta	Megatonne im Jahr		

1 Vorwort

Zum Zustand des blauen Planeten Erde ist schon viel geschrieben worden. In dieser Arbeit soll speziell auf den Aspekt des Vermüllens der Meere durch Plastik und Mikroplastik und die hieraus entstehenden Folgen eingegangen werden. Das Vermüllen der Meere zeigt, wie eine moderne Industriegesellschaft, bedingt durch ihr Wirtschafts-Umwelt-Verhältnis, verschwenderisch mit den verfügbaren Ressourcen der Erde umgeht.

Zudem kann das gewählte Thema beispielhaft zeigen, wie der Zustand der Umwelt und eben ihre Veränderung auf das menschliche Leben zurückwirken. Im Allgemeinen lassen sich zwei Wirkstränge der Wechselbeziehung zwischen Natur und Mensch unterscheiden. Der eine Wirkstrang ist der vom Menschen gemachte Eingriff in die Natur, der andere ist die durch den menschlichen Eingriff bewirkte Auswirkung auf die natürlichen Kreisläufe, wie sie durch die Naturgesetze bestimmt sind. Festzuhalten ist, dass der Mensch nicht nur Täter (Zerstörer), sondern auch Opfer seiner Handlungen wird.

Um den künftigen Lebensraum des Menschen qualitativ lebenswert zu erhalten, sind Konzepte zu entwickeln, die einen anderen Umgang mit der Natur als den heutigen anstreben. Es sollte der Gemeinschaft in der modernen Welt gelingen, dass sich der Mensch als ein Teil der Natur versteht und seine Umwelt hegt und pflegt und nicht ausbeutet und zerstört.

Meinen großen Dank möchte ich an Dr. rer. nat. Manfred Schroeder aussprechen, der mich mit seinen Anregungen und Korrekturen durch diese Arbeit geführt hat.

2 Einführung

Die heutige Konsumgesellschaft ist auf ein stetiges Wachstum ausgerichtet. Wie ein Mantra wird ständig wiederholt: Immer höher, weiter, größer und besser soll es werden. „*Die große Verheißung unbegrenzten Fortschritts - die Aussicht auf Unterwerfung der Natur und auf materiellen Überfluss, auf das größtmögliche Glück der größtmöglichen Zahl und auf uneingeschränkte persönliche Freiheit - das war es, was die Hoffnung und die Zuversicht von Generationen seit Beginn des Industriezeitalters aufrechterhielt. Zwar hatte die menschliche Zivilisation mit der aktiven Beherrschung der Natur durch den Menschen begonnen, aber dieser Herrschaft waren bis zum Beginn des Industriezeitalters Grenzen gesetzt.*“¹ Dies schrieb Erich Fromm in seinem Werk *Haben oder Sein*. Diese Grenzen wurden während des Industriezeitalters durch Forschung und Entwicklung in kürzester Zeit in den modernen Gesellschaftsformen überwunden, mit Folgen für unsere Umwelt.

Die in den Industriegesellschaften vorherrschende Denkweise vom optimierten ökonomischen Handeln, verbunden mit dem technologischen Wandel, resultiert unter anderem aus der Naturvergessenheit des Menschen. Er, der Mensch, vergisst dabei, dass er selbst Teil der Natur ist. Der Mensch selbst wird in eine vorhandene Natur hineingeboren und findet eine Umgebung vor, die für ihn die Grundlagen seiner Existenz vorhält. Der Planet Erde bietet ihm Wärme, Wasser, Land und Nahrung sowie Luft zum Atmen, ohne die er nicht leben könnte.

In Zeiten des 21. Jahrhunderts sollte der Mensch sich im Klaren darüber sein, dass er sich nicht über die Natur erheben kann, weil er selbst eben auch ein Teil der Natur ist. Mit dem über die letzten Jahrzehnte entwickelten Lebensstil, der sich vorwiegend bei den in westlich geprägten Industrienationen lebenden Menschen etabliert hat, ist ein sorgsamer Umgang mit der Natur verdrängt worden.

Die Menschen, die in Gesellschaftsformen leben, in denen das Wirtschaftssystem mehr oder weniger von den freien Kräften des Marktes bestimmt wird, profitieren in einem gewaltigen Ausmaß von den Rohstoffen, über die der Planet Erde verfügt. Die Förderung dieser Rohstoffe wird durch stetig verbesserte Techniken begünstigt. In diesen Gesellschaften ist das Maß aller Dinge ein Wachsen des BIP (Brutto-Inlands-Produkt). Dieses soll den Grad des Wohlstandes einer Volkswirtschaft ausdrücken. Das heißt: Mehr Wohlstand durch mehr Wachstum. Das stete weltweite Wachstum in den Bereichen Bevölkerung und Wirtschaft, Land-Management, Städte und Verbrauch sowie Infrastruktur, ist ab dem Jahr 1950 in der exponentiellen Zunahme sozial-ökonomischer Kenngrößen erkennbar. Die entsprechenden Trendkurven der sozio-ökonomischen Cluster sind im *WWF Living Planet Report 2018*² dargestellt (siehe Abb. 1, S. 8). Dieser Report

¹ Erich Fromm(1976), S. 7

² Günter Mitlacher / Thomas Köberich (2018)

weist darauf hin, dass der Mensch aktiv und mit hoher Beschleunigung Einfluss auf unseren Planeten ausübt.

Der Mensch gestaltet seine Lebenswelt in der Vorstellung, dass das Wachstum keine Grenzen kenne. Dieses Denken hat negative Veränderungen für die Natur, die Artenvielfalt und die Funktionsweise der Ökosysteme zur Folge. Mojib Latif; Meteorologe und Klimaforscher vom GEOMAR-Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel, kommt zu dem Schluss: „Die Menschen werden die Natur so lange weiter überfordern, bis die Schäden einfach nicht mehr zu leugnen sind und natürliche Ursachen ausgeschlossen werden können.“³

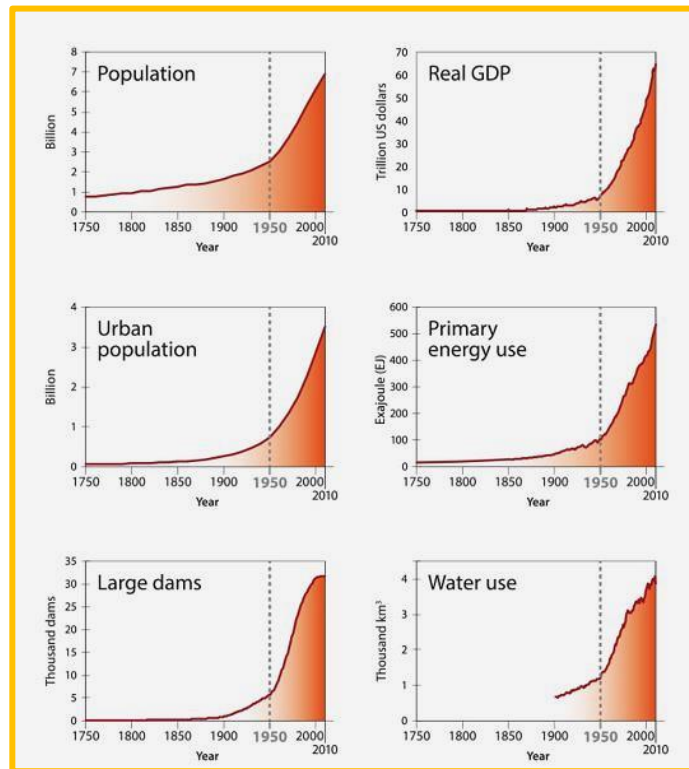


Abbildung 1: Sozio-ökonomische Kenngrößen

Quelle: Stockholm Resilience Center / Research; Steffen et al. 2015

Um den künftigen Lebensraum des Menschen qualitativ lebenswert zu erhalten, ist m.E. ein anderer Umgang mit der Natur als der heutige anzustreben. Es sollte den Gemeinschaften in der modernen Welt gelingen, dass sich der Mensch als ein Teil der Natur versteht und seine Umwelt hegt und pflegt und nicht ausbeutet und zerstört.

Zurzeit kommt der Planet Erde durch das Eingreifen des Menschen in eine Grenzsituation, welche dazu führt, dass die Lebensbedingungen, insbesondere für Mensch und Tier, bedrohlich werden können. Besonders der Klimawandel und die Verschmutzung von Wasser und der Luft sind als Beispiel anzuführen. Auch der Abbau der Rohstoffe mit seinen Kollateralschäden und einem immensen Energiebedarf trägt seinen Teil dazu bei.

Es ist notwendig, Ansätze zu beschreiben, die ein schonendes Miteinander von Mensch und Natur in Zukunft ermöglichen. Diese Aufgabe ist nicht leicht und erfordert Beharrlichkeit im Handeln und einen anderen Umgang mit unserer Natur.

Das Element Wasser ist für den Menschen eine unverzichtbare Grundlage seines Daseins.

³ Mojib Latif(2014), S. 79

Der größte Lebensraum der Erde sind die Ozeane. Ihr Anteil an der Erdoberfläche beträgt circa 70 Prozent. Erwähnenswert ist, dass der Meeresboden als Rohstoffquelle von seltenen Erden und Metallen in Zukunft von großem Interesse sein könnte. Die Meere erfüllen die Voraussetzung für eine reichhaltige biologische Vielfalt. Die Meere bieten den Lebewesen Sauerstoff, mineralische, fossile Rohstoffe sowie Nahrung.

Ein anderer Aspekt ist: *„Zunehmend liefert das Meer auch Öl und Gas, und die zunehmende Knappheit hat uns dazu getrieben, uns immer weiter von der Küste zu wagen“*⁴ hinaus auf die offene See mit den OFF-SHORE-Plattformen zur Förderung der fossilen Energieträger. Öl und Gas sind Basisstoffe für die Herstellung von Kunststoffen. Zudem werden die Ozeane für die Transportwege durch die Schifffahrt genutzt. Nicht zu vernachlässigen ist der Freizeit- und Erholungsraum, welche die Ozeane mit ihren Küstenregionen bieten. Zu nennen sind der Kreuzfahrttourismus und die Freizeitaktivitäten von Menschen auf und unter dem Wasser, was unter anderem weitreichende Folgen hat hinsichtlich der Belastungen mit Schadstoffen für die Ozeane.

Neben dem maritimen Massentourismus wirken sich die Einträge von Schadstoffen, z. B. das Verklappen von Dünnsäure auf offener See, die Überfischung der Meere, die Versauerung des Meerwassers durch die Aufnahme von Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre und der Eintrag von Müll in die Gewässer, vorwiegend von Plastik, negativ auf die Ökosysteme der Meere aus.

Diese Arbeit soll am Beispiel Plastikmüll dazu anregen, dass der Mensch achtsamer und bewusster in seinem Handeln gegenüber seiner Umwelt wird.

Der Begriff Plastik wird umgangssprachlich als Sammelbegriff für die verschiedenen Kunststoffprodukte verwandt. Im **Kapitel 3** wird auf den Unterschied der Begriffe Kunststoff und Plastik kurz eingegangen. Die gemeinsame Substanz aller synthetischen Kunststoffe ist das Rohbenzin, welches aus dem Erdöl gewonnen wird. Die Herstellung von Kunststoffprodukten erforderte im Jahr 2016 rund 8 % der weltweiten Ölförderung und in der Vorausschau eines zu erwartenden Verbrauchswachstums betrachtet, wird dieser Anteil voraussichtlich bis 2050 auf 20% ansteigen. Dies ist sinngemäß eine der Kernaussagen der Autorin Hannah Gould in ihrem Report vom Davoser World Economic Forum 2016: *„From oil use to ocean pollution: five Facts about the plastics industry“*⁵, der ausführliche Report ist nachzulesen in *„The Guardian.com“*

Die Kunststoffprodukte in ihrer Weiterverarbeitung als Plastikteile begegnen uns in vielfältiger Gestalt und Farbe. Die Einsatzmöglichkeiten der hergestellten Plastikteile scheinen schier unbegrenzt. Gründe für den Erfolg dieser Plastikteile rund um den Globus sind unter anderem die günstigen Herstellungskosten, die Robustheit in der Anwendung, außerdem sind diese Produkte flexibel und

⁴ Callum Roberts(2013), S. 13

⁵ Hannah Gould(2016), S. 1

leicht. Diese Vorzüge haben aber einen hohen Preis in Bezug auf Entsorgung und Nachhaltigkeit, wie wir seit Jahrzehnten wissen. Denn die Plastikteile scheinen nicht so harmlos wie es im Allgemeinen vermutet wird. Die Plastikteile und das Mikroplastik lassen sich im Salzwasser der Meere kaum lösen und verbleiben unter Umständen Jahrzehnte wenn nicht Jahrhundert im Meer mit allen ihren Folgen. Die Schmutzfracht, bestehend aus diesen Plastikstücken, belasten die Ozeane auf Dauer. Im **Kapitel 3** wird auf die chemische Zusammensetzung des sogenannten Plastiks eingegangen. Die Frage ‚**Wie kommt das Plastik in das Meer**‘ und welche Folgen das für die Meeresbewohner und den Menschen hat, wird ebenso in diesem Kapitel erläutert.

Auf der Rückfahrt nach Südkalifornien bei einer Segelregatta von Los Angeles nach Hawaii im Jahre 1997 entdeckte der Skipper und Ozeanograf Charles Moore in einem der entferntesten Gebiete des Ozeans, dem Nordpazifikwirbel, treibenden Müll. Soweit sein Auge reichte, überall trieb das Plastik auf der Meeresoberfläche. Vorwiegend Flaschen und deren Verschlüsse, Verpackungen, kleine Stücke von Kunststoffprodukten konnte man in dem Müll finden, die im Ozean trieben. Diese Müllansammlung im Nordpazifischen Ozean ist bekannt unter dem Namen ‚**Great Pacific Garbage Patch**‘. Dieser Punkt wird in **Kapitel 5** unter dem Stichwort ‚Plastikinseln‘ näher beschrieben. **Kapitel 5** beschreibt die Auswirkungen von Plastikinseln.

Ausgangspunkt für diese Arbeit ‚**Plastikmüll und Mikroplastik –Ballast für die Weltmeere**‘ war ein Aufenthalt auf der Insel Fuerteventura im Jahre 1990. Während unseres Urlaubs sahen wir, meine Lebenspartnerin und ich, bei Strandspaziergängen immer wieder kleine, runde weißliche und schwärzliche Kügelchen von circa 5mm Durchmesser, die sich in kleinen Wasserbunkern, bei Ebbe, angesammelt haben. In diesen Wasserpfützen tummelten sich auch kleine Garnelen und Jungfische. Wir spekulierten, was diese Kügelchen sein könnten. Vielleicht waren es Ölrückstände von Reinigungsarbeiten von Schiffen. Zwei Jahre später waren wir wieder an der gleichen Stelle. Nun aber hatte sich die Situation sichtlich verändert. Die Anzahl der weißlichen und schwärzlichen Kügelchen waren auffallend erhöht und die Bestände der kleinen Garnelen und Jungfische in den Strandpfützen gingen augenscheinlich zurück. Heute wissen wir, dass die kleinen Kügelchen Rückstände aus verschiedenen Kunststoffprodukten waren.

Dieses persönliche Erleben hat dazu beigetragen, auf die Thematik der Verschmutzung der Meere durch Plastikmüll und Mikroplastik und deren Folgen näher einzugehen.

Ferner ist mir daran gelegen, am Beispiel der Meeresverschmutzung durch Plastikteile und Plastikpartikel, dem Mikroplastik, aufzuzeigen, wie komplex die Verzahnung zwischen Natur und sorglosem Handeln der Menschen sich auf unser Dasein auswirkt.

Im **Kapitel 7** sollen methodische Ansätze zur Vermeidung von Plastikmüll vorgestellt werden.

Die Absicht zur Verfassung dieser Arbeit ist, das Bewusstsein für ein Leben mit der Natur zu fördern, um den Konflikt zwischen einem hemmungslosen Wachstum und einem intakten Lebensraum für alle Lebewesen auf dieser Erde zu reduzieren. Der Anfang könnte eine Verringerung unseres Verbrauchs an Plastikartikeln sein. Denn durch Unachtsamkeit und Bequemlichkeit in der Entsorgung, also nach dem Gebrauch der sogenannten Wegwerfartikel aus Plastik, landet eine nicht zu unterschätzende Menge der global produzierten Plastikartikel irgendwann in den Ozeanen.

Angesichts der Tatsache, dass sich viele ökologische Probleme der alltäglichen Wahrnehmung entziehen und die Komplexität der beteiligten Prozesse sehr hoch ist, kommt der Beschreibung dieser Prozesse eine besondere Bedeutung zu.

Zusammenfassend geht die Arbeit auf folgende Aspekte ein: Kunststoffe und Kunststofftechnik, die Herkunft und Herstellung von Kunststoffen und deren Verwendung, sowie die Frage: Was ist Plastik? Dem folgt ein kurzer Blick auf das System der Meeresströmungen sowie Bewegungen von Luft- und Wassermassen bis hin zum Bilden von Müllwirbeln im Meer, verbunden mit der Anhäufung von Plastikmüll und welche Folgen der Plastikmüll für das Klima hat. Dies betrifft die Versauerung der Ozeane, Anlandungen an Küsten und Stränden, sowie die Einflüsse auf die Nahrungskette. Am Ende der Arbeit werden Methoden zur Vermeidung des Plastikmülls beschrieben.

3 Kunststoffe und Kunststofftechnik

Im ‚Lexikon Chemie.de‘ ist als Definition von Kunststoff zu lesen: *„Als Kunststoff (ugs. Plastik oder Plaste) bezeichnet man einen Festkörper, dessen Grundbestandteil synthetisch oder halbsynthetisch erzeugte Polymere mit organischen Gruppen sind. Ein Werkstück aus Kunststoff besteht aus Millionen sehr langer, ineinander verschlungener Molekülketten (Polymeren), die aus sich stets wiederholenden Grundeinheiten (Monomeren) zusammengesetzt sind. Beispielsweise besteht der Kunststoff Polypropylen aus sich vielfach wiederholenden Propylen-einheiten (siehe Abb. 2).*

Ein herausragendes Merkmal von Kunststoffen ist, dass sich ihre technischen und chemischen Eigenschaften, wie Formbarkeit, Härte, Elastizität, Bruchfestigkeit, Temperatur-, Wärmeformbeständigkeit sowie die Wahl von Ausgangsmaterial, Herstellungsverfahren und Beimischung von Additiven in weiten Grenzen variieren lassen.

Kunststoffe werden zu Formteilen, Halbzeugen, Fasern oder Folien weiterverarbeitet. Sie dienen als Verpackungsmaterialien, Textilfasern, Wärmeisolierung, Rohre, Bodenbeläge, Bestandteile von

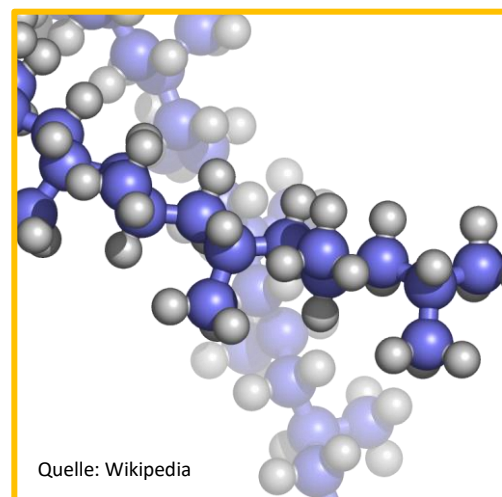


Abbildung 2: Polypropylen

Lacken, Klebstoffen und Kosmetika, in der Elektrotechnik als Material für Isolierungen, Leiterplatten, Gehäuse, im Fahrzeugbau als Material für Reifen, Polsterungen, Armaturenbretter, Benzin-tanks und vieles mehr. ⁶

Die Kunststofftechnik befasst sich mit der Erforschung und Entwicklung von chemischen, biologischen und physikalischen Eigenschaften der Kunststoffe. Sie ist als ein eigenständiger Forschungszweig aus der Verfahrenstechnik hervorgegangen.

Im ‚Chemie-Lexikon‘ von Thomas Seilnacht steht geschrieben: *„Kunststoffe sind Werkstoffe, die künstlich oder durch Abwandlung von Naturprodukten entstehen und aus organischen Makromolekülen aufgebaut sind. Nach dieser Definition gehören auch die Kautschuke und die Textilfaserstoffe zu den Kunststoffen. In einem Makromolekül sind viele kleinere Molekülbausteine, sogenannte Monomere, zu sehr großen Molekülen, den Polymeren verknüpft. Die Kunststoffe machen einen großen Anteil der Polymere aus, jedoch gehören auch zahlreiche natürliche Stoffe zu den Polymeren.“* ⁷ Dies sind Wolle, Leder und Flachs, die u. a. zu Fasern verarbeitet werden, um Kleidung herzustellen. Des Weiteren zählen zu den natürlichen Polymeren Zellulose, Seide, Naturkautschuk und Bitumen.

Der Prozess der Verknüpfung von den Monomeren zu den Makromolekülen (Polymeren) kann auf verschiedenste Art und Weise im Rahmen einer chemischen Reaktion stattfinden. In der Regel sind dies **Polymerisation**, **Polykondensation** und **Polyaddition**. Diese drei chemischen Reaktionen sind Kunststoff-Synthese-Verfahren, die die Basis zur Herstellung von Kunststoffen bilden. Mögen die genannten Verfahren noch so unterschiedlich sein, so haben sie dennoch am Ende die Struktur der Makro- oder Riesenmoleküle gemeinsam. Sie sind makromolekular auf Grund der Tatsache: *„Die Einzigkeit des Kohlenstoffes beruht darauf, dass er wie kein anderes Element in der Lage ist, mit sich selber unter Bildung langkettiger, verzweigter, ringförmiger oder räumlich vernetzter Moleküle zu reagieren. Hinzu kommen die Kombinationen solcher Moleküle und verschiedene Bindungsarten, an denen der Kohlenstoff beteiligt ist.“* ⁸

Als nächstes werden einige der relevanten Begrifflichkeiten in der Kunststofftechnik erläutert.

3.1 Begriffe und Einteilungen in der Kunststofftechnik

In der Wissenschaft wird der Begriff ‚Kunststoff‘ verwendet. Wenn im Folgenden das umgangssprachliche Wort ‚Plastik‘ verwendet wird, ist Kunststoff gemeint. Zu der Abstammung des Wortes ‚Plastik‘ wäre ergänzend zu sagen: Das Wort ‚Plastik‘ aus dem engl.- amerik. entlehnt: **Plastic** steht für weich, knetbar, verformbar. Umgangssprachlich wird Kunststoff mit ‚*Plastik*‘ gleichge-

⁶ Wikipedia Autoren(2022), S. 1

⁷ Thomas Seilnacht(2021), S. 1

⁸ Wilfried Knoch(1994), S. 147–148

setzt: Somit können unter ‚Plastik‘ alle durch unter Druck geformten, gegossenen oder gezogenen Kunststoffprodukte verstanden werden. ‚Plastik‘ ist also durch mechanische oder thermische Verfahren verformter Kunststoff.

Kunststoffteile können in zwei Gruppen aufgelistet werden, die durch den Herstellungsprozess oder durch ein Eigenschaftsmerkmal charakterisiert sind. Demnach ergeben sich folgende Einteilungen.

Einteilung nach mechanisch-thermischem Verhalten

- ❖ Thermoplaste
- ❖ Duroplaste
- ❖ Elastomere

Einteilung nach Herstellungsprozess (Entstehungsreaktion)

- ❖ Polymerisation
- ❖ Polykondensation
- ❖ Polyaddition

Im nächsten Abschnitt soll die Herkunft der Ausgangsstoffe und die Prozesse, die zur Herstellung von Kunststoffprodukten notwendig sind, aufgezeigt werden.

3.2 Herkunft, Herstellung und Verwendung von Kunststoff

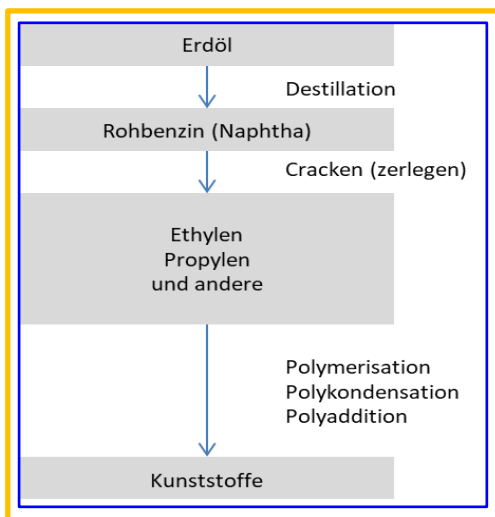


Abbildung 3: Der Weg vom Erdöl zum Kunststoff

Quelle: Zusammenstellung d. Verf.

Wie erläutert bestehen Kunststoffe aus Makromolekülen (Riesenmolekülen), die man durch chemische und thermische Umwandlung aus Naturprodukten oder durch Synthese aus kleineren Molekülen herstellen kann. Die Rohmaterialien für die Herstellung von Kunststoffen sind Naturstoffe wie Zellulose, Kohle und Erdgas. Synthetische Kunststoffe werden aus den Zwischenprodukten hergestellt, die während der Erdölverarbeitung entstehen. Kunststoffe sind durch das Element Kohlenstoff charakterisiert. Weitere Bestandteile zur Herstellung des Kunststoffes können die Elemente Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel, Chlor

sowie Fluor sein.

Im Besonderen ist für die Kunststoffherstellung die Zerlegung des Erdöls durch Destillation in Rohbenzin (Naphtha) von großer Bedeutung. Bei diesem Prozess, der auch als ‚Cracken‘ bezeichnet wird, werden Ethen, Propen, Butan und andere Kohlenwasserstoffverbindungen auseinander

gebrochen und umgebaut. Während diesem Vorgang werden größere Kohlenwasserstoffketten in kleinere umgewandelt.

Der gesamte Verlauf zur Herstellung von Kunststoff ist schematisch in einfacher Form in der Abbildung 3, S.13 dargestellt. Je nach Art der chemischen Entstehungsreaktion werden die Produkte Polymerisat, Polykondensat oder Polyaddukt genannt. Für die weitere Betrachtung sind die Massenkunststoffe (Tab. 1) von Bedeutung.

Die Auflistung zeigt, dass die Eigenschaftsgruppe der Thermoplaste, die durch den Herstellungsprozess der Polymerisation erzeugt werden, den größten Anteil in der Verwendung als Konsumgut

Benennung	Kurzzeichen	Herstellung durch ...	Eigenschaftsgruppe	Verwendung	als Bestandteil des Meeresmülls
Polyethylen	PE	Polymerisation	Thermoplaste	unzerbrechliche Gefäße, Flaschen, Behälter, Eimer, Isoliermaterial, Verpackungsmaterial; Erweichungstemperatur $T_g = 110^\circ\text{C}$	Plastiktüten, Tuben, Abdeckfolien, Kosmetikverpackungen Säcke, Flaschen, Netze
Polypropylen	PP	Polymerisation	Thermoplaste	wie bei Polyethen, nur die Erweichungstemperatur liegt höher $T_g > 110^\circ\text{C}$	Lebensmittelverpackungen, Joghurtbecher, Spielzeug, Packbänder, Säcke, Garne, Verschlussdeckel
Polystyrol	PS	Polymerisation	Thermoplaste	Elektrotechnik, für optische Linsen, Lacke, sonstige Gebrauchsgegenstände, aufgeschäumt als Verpackungsmaterial	Fast-Food-Verpackungen, Einweggeschirr Gemüseschalen, Frischhaltebehälter
Polyvinylchlorid	PVC	Polymerisation	Thermoplaste	Pressartikel, Dichtungen, Kabelisolierungen, Rohre, Schläuche. Mit Weichmacher für Überzüge auf Gewebe	Schlauchboote, Bälle, Schuhsohlen, Silofolien, Blisterverpackungen, Puppen, PVC-beschichtete Arbeitshandschuhe
Polyethylenterephthalat	PET	Polykondensation	Thermoplaste	Herstellung von Plastikflaschen und für relativ feste Kunstfasern (hohe Knitterfestigkeit)	Getränkeflaschen, Folien, Polyesterfasern
Polyurethan	PUR	Polyaddition	Elastomere	Schaumstoff für Polstermöbel, Teppichbeschichtungen, Bauschaum	---

Tabelle 1: Kunststoffe im Meeresmüll; Zusammenstellung d. Verf.

bildet. Es ist nicht verwunderlich, dass diese ‚Plastikprodukte‘ am häufigsten als Bestandteile des ‚Plastikmülls‘ im Meer vorkommen.

Je nach Art der chemischen Entstehungsreaktion werden die Produkte Polymerisat, Polykondensat oder Polyaddukt genannt.

Zu erwähnen ist, dass zur Vermeidung der Einträge von Plastikmüll in die Gewässer, Abwasser-Reinigungsanlagen (ARA) zwar im Stande sind einen Teil des groben Plastikmülls im Abwasser abzuscheiden, aber Mikroplastik kann nur begrenzt oder gar nicht aus dem Abwasser entfernt werden. Was ist Mikroplastik und wie entsteht es? Dies soll im Kapitel 4 erörtert werden.

Zunächst soll der Weg des Plastiks in die Meere und die Folgen des Makromülls gezeigt werden.

3.3 Der Weg des Plastiks in die Meere

Charakteristisch für Kunststoffe ist, dass sie, wenn sie aus Rohbenzin synthetisch hergestellt werden, nicht durch natürliche Vorgänge abgebaut werden können. Deshalb ist dieser Kunststoff ein belastendes Material für die Ozeane und kritisch in der Ansammlung. Besonders unter dem Einfluss des Sonnenlichts (UV-Strahlung) emittiert der Kunststoff u. a. das Treibhausgas Methan (CH₄). Dieser Aspekt wird im Kapitel 6 beleuchtet.

Der Weg des Plastiks in die Weltmeere ist abhängig von den Quellen seiner Entstehung. Falsch entsorgter Haus- und Industriemüll, der in Form von ‚wilden Deponien‘ zu finden ist, kann durch Wind in die Gewässer transportiert und weiter in die Ozeane gelangen. Plastikfolien aus der Landwirtschaft können durch Witterungseinflüsse in kleine Teile zerlegt werden. Die mit Stürmen ebenso in die Gewässer fliegen und somit auch in die Meere münden. Außerdem hinterlassen Menschen im Tourismus und über ihre Freizeitaktivitäten Abfälle durch gedankenlos weggeworfene Plastikprodukte, z.B. an den Stränden, die sich dann als Plastikmüll in den Meeren wiederfinden. Eine weitere Quelle des Plastikmülls sind die Einwegkunststoffprodukte wie Bestecke, Teller und Becher. Unter anderen können diese Arten des Plastikmülls mit dem Begriff Makroplastikmüll⁹ zusammengefasst werden. Makroplastik sind größere Objekte aus Kunststoff.

Nicht nur von der Landseite aus kommt der Plastikmüll in die Meere, er wird auch auf See direkt von den Schiffsbesatzungen in die Ozeane eingeleitet.

Über den weltweiten Eintrag

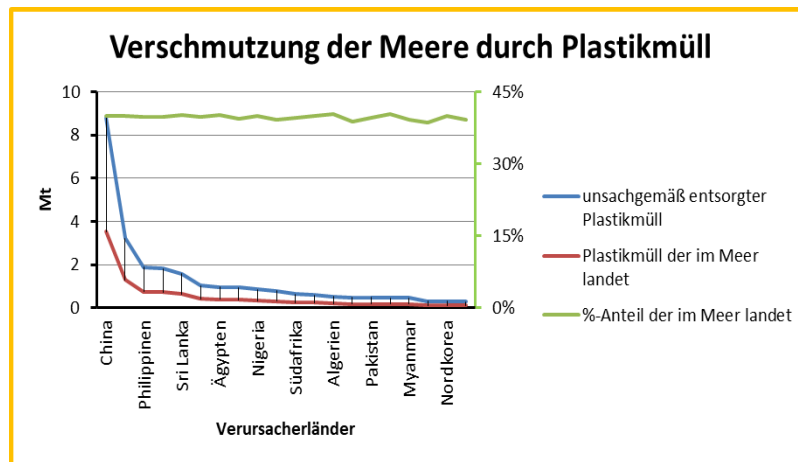
von Plastikmüll in die Ozeane liegen nur grobe Schätzungen vor. Eine Forschergruppe, um Jenna Jambeck von der University of Georgia, hat im Jahre 2015 in der Studie ‚Plastic waste inputs from land into the ocean‘ Daten ausgewertet, die im Jahre 2010 erhoben wurden. Das aus diesen Daten erstellte Ranking (siehe Abb. 4) listet die zwölf Länder auf, welche die Ozeane am meisten verschmutzen. Das Ranking zeigt auch, dass von diesen Ländern wie der VR China ein Großteil des Plastikmülls in die Ozeane wandert, nämlich rund 40% des gesamten Plastikmülls eines Landes (Übs. 1, S.16)⁹. In dieser Studie wurden für die EU keine Daten gelistet. Bezogen auf die Studie ge-



Abbildung 4: Ranking der Ozeanverschmutzer mit Plastikmüll

⁹ Zusammenstellung d. Verf.

langten von 275 Mta¹⁰ Plastikabfällen 4,8 Mta bis 12,7 Mta weltweit landseitig in die Weltmeere. Das sind 1,7% bis 4,6% der Plastikabfälle. In der allgemeinen Literatur hat sich ein Wert von 8 Mta Plastikmüll etabliert, der jährlich in die Meere transportiert wird.



Übersicht 1: Vermüllung der Ozeane durch Plastik

3.4 Makroplastikmüll und seine Auswirkungen

Zu den Folgen des Makroplastikmülls in den Weltmeeren ist in dem Bericht ‚Müllkippe Meer – Wege aus der Plastikflut‘ des NABU zu lesen: „*Giftige Inhaltsstoffe des Plastiks wie Bisphenol A und Weichmacher schädigen das Erbgut sowie den Hormonhaushalt der Meerestiere. Wissenschaftler vermuten, dass sie auch beim Menschen Hormon- und Fortpflanzungsstörungen auslösen.*

Neben den ökologischen Auswirkungen bringt Plastikmüll auch sozioökonomische Probleme mit sich. In die Reinigung von Häfen, Küsten und Stränden fließen Jahr für Jahr viele Millionen Euro. Auch der Schifffahrt, der Fischerei und der Industrie entstehen hohe Kosten durch Schäden an Bootspropellern, Netzen und Filteranlagen.“¹¹

Meeresbewohner verwechseln Plastikteile, die als Plastikmüll in die Meere Aufnahme fanden, mit ihrer eigentlichen, natürlichen Nahrung. Sie verschlucken den Plastikmüll und verhungern mit vollem Magen, weil sie den Kunststoff nicht verdauen können. Meeresschildkröten können nicht zwischen Plastiktüten und Quallen, ihrer eigentlichen Nahrung, unterscheiden. Die Folgen sind fatal und enden meist mit dem Tod. Von gestrandeten Walen fanden Meeresbiologen in den Mageninhalten von Plastiktüten bis hin zu Fischernetzen alles was einer Müllkippe gleicht. Andere Tiere wie Robben, Meeresschildkröten und Seevögel verfangen sich in Plastikkleinen und Seilen und strangulieren sich. Auf der Insel Helgoland fand man Vogelnester, die aus Plastikschnüren gebaut wurden.

¹⁰ Mta = Millionen Tonnen im Jahr

¹¹ Dr. Kim Cornelius Detloff et al.(2016), S. 2

4 Mikroplastik im Meer

Von Mikroplastik spricht man, wenn kleine Kunststoffteilchen einen Durchmesser von kleiner als 5 mm haben. Diese Definition wurde im Jahre 2008 von der U.S. Behörde für Nationale Wetterdienste und Ozeanografie, kurz NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), festgelegt. Diese Definition wird auch vom Umweltbundesamt im Rahmen eines EU-Ecolabels für Wasch- und Reinigungsmittel benutzt.

Der Abbau von Plastikmüll im Meer verläuft über Zerkleinerungs- und Zersetzungsprozesse ab. Diese können sein: Wellenschlag, Versprödung, Wind oder Tierverschleiß, sowie UV-Strahlung durch die Sonne oder Verstoffwechslung der Meeresorganismen. Dabei werden Mikropartikel freigesetzt. Diese sind für das Leben im Meer als auch für die Ökosysteme schädlich.

Das Galway-Mayo Institut of Technology (GMIT) in Irland, legte 2021 die Studie *„Microplastics in the marine Environment“*¹² vor. Sie zeigt unter anderem, dass Mikroplastik im Meer aus zahlreichen Quellen (z.B. Reifenabrieb, Abfallentsorgung, andere Abriebe, Kosmetik) und Wirtschaftsbereichen (z.B. produzierendes Gewerbe, Verkehr, Infrastruktur, privater Konsum) stammt. Allerdings versinken 70% bis 94 % aller Plastikabfälle im Meer und es finden jedoch am Meeresboden Zersetzungsprozesse die extrem langsam ablaufen. Bis der Plastikmüll dort abgebaut wird kann es Jahrhunderte dauern.

4.1 Primäres und Sekundäres Mikroplastik

Im Jahr 2018 hat das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) eine umfassende Studie¹³ zu dem Thema Mikroplastik vorgelegt. In dieser wird unterschieden zwischen primärem Mikroplastik Typ A und Typ B und sekundärem Mikroplastik.

Die Autorin Sybille Müller hat aus dieser Studie das Fazit gezogen: *„Primäres Mikroplastik Typ A wird absichtlich erzeugt und kommt bei der Herstellung diverser Produkte zum Einsatz, besonders für Kosmetikprodukte. Allein in Deutschland werden pro Jahr bundesweit rund 500 Tonnen Mikroplastik in Kosmetika eingesetzt. Weitere 100 Tonnen Mikroplastik landen in Wasch-, Reinigungs- und Strahlmitteln und ganze 100.000 Tonnen in Kunststoffwachsen, die als Trennmittel und zur Oberflächenbeschichtung angewandt werden. Primäres Mikroplastik Typ B entsteht hingegen erst während der Nutzung, so etwa durch Reifenabrieb, beim Waschen (wo synthetische Fasern freigesetzt werden können) oder bei der Verwitterung von Farben. Die Freisetzung kann beabsichtigt sein oder ganz bewusst in Kauf genommen werden. Sekundäres Mikroplastik entsteht aus Makroplastik. Ob an Land, im offenen Meer oder an den Küsten: Gelangen größere Plastikteile in die Umwelt, verwittern und zerfallen sie, wobei nach und nach zahllose winzige Partikel entstehen. Als*

¹² Stothra Bhashyam, S., Nash, R., Deegan, M., Pagter, E., Frias, J. (2021)

¹³ Jürgen Bertling, Ralf Bertling, Leandra Hamann et al.(2018)

*häufigster Entstehungsort von sekundärem Mikroplastik gelten Strände, da dort jede Menge Müll achtlos weggeworfen bzw. angeschwemmt wird. Da der völlige Abbau der Plastikpartikel Hunderte Jahre dauern kann, werden sie als persistent [dauerhaft fortbestehend, Anm. d. Verf.] bezeichnet.*¹⁴

Dieser lange Abbauprozess ist folgenreich für die Meere und deren Lebewesen, besonders bei den kleinen Organismen, dem Plankton. Dem Plankton kommt eine zentrale Rolle in den Nahrungsketten der marinen Ökosysteme zu. Ausführungen hierzu werden im Unterkapitel ‚Einflüsse auf die Nahrungskette‘ gegeben.

4.2 Einflüsse auf die Nahrungskette

Mit der Nahrungsaufnahme der Meeresbewohner werden zwangsläufig die im Meer treibenden Plastikteile und das Mikroplastik mit aufgenommen. In einem Artikel der Deutschen Meeresstiftung ist zu lesen: *„Immer öfter wird Plastik in den Mägen von Schnecken, Walen, Schrimps, Thunfischen und vielen anderen Meeresbewohnern gefunden. Dadurch kommt das Plastik aber nicht gleich in die Nahrungskette der Menschen, da die Fischmägen vor dem Konsum eigentlich immer entfernt werden. Die Frage ist, ob vorher die Giftstoffe des Plastiks in den Körper der Nahrungstiere übergegangen sind (was in Studien bereits nachgewiesen wurde) und ob der menschliche Körper diese Giftstoffe aufnimmt oder wieder ausscheidet. Hier sind noch sehr viele Fragen offen. Aber es bleibt ein vorrangliches Ziel, die Belastung mit*

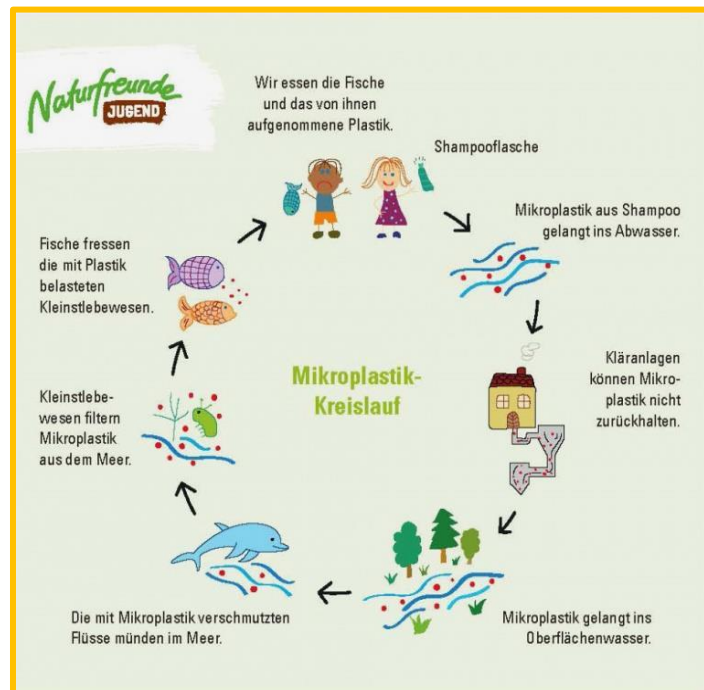


Abbildung 5: Mikroplastik-Kreislauf

*Plastik für Meere und Umwelt zu reduzieren, um hier Gefährdungen für Natur und Mensch nicht ausufern zu lassen.*¹⁵

Die Abbildung 5 illustriert wie der Weg des Mikroplastiks vom Menschen über die Nahrungsaufnahme der im Ozean lebenden Fische wieder zurück zum Menschen gelangt. Das Umweltweltprogramm der Vereinten Nationen UNEP hat sich in einer Studie - ‚Frontiers 2017 - Aufkommende

¹⁴ Sybille Müller(2021), S. 4–5

¹⁵ Kai Pohlmann(2016), S. 2

*Umweltprobleme*¹⁶ - unter anderem mit dem Thema Mikroplastik in der Nahrungskette beschäftigt. Die Autoren der Studie befürchten, dass Mikroplastik am Ende der Nahrungskette in den menschlichen Körper gelangen kann. Und somit könnte das Mikroplastik Auswirkungen auf das Immunsystem, auf die Reproduktionsfähigkeit, die Entwicklung von Embryonen oder auf das Erbgut haben.

5 Plastikinseln in den Weltmeeren

Auf der Meeresoberfläche bilden sich durch die Meeres- und Windströmungen Ansammlungen von Plastikabfallhaufen, die Plastikinseln. *„Plastikinseln. Diesen Begriff haben die meisten schon einmal gehört. Doch geht das Wissen darüber selten über eine vage Vermutung hinaus. Und in der Tat gibt es für ‚Plastikinseln‘ keine genaue Definition. Doch eines steht fest: Es geht keinesfalls um malerische Urlaubsinseln, sondern um Plastik im Meer. Womit wir beim allgegenwärtigen Problem unserer Zeit angelangt wären. Wir produzieren tagtäglich Plastik in rauen Mengen. Kein Wunder, dass ein beachtlicher Teil davon früher oder später seinen Weg ins Meer findet.“*¹⁷

In der Vorlesung ‚**Wege zu einer nachhaltigen Gesellschaft**‘ (Script: NH Kapitel 7, S.9) von Dr. Schroeder im WS20/21 an der U3L wurde aus dem Magazin ‚Recovery-Recycling Technologie Worldwide‘ zitiert:

- ❖ Der allergrößte Teil des Plastikmülls betrifft Einwegprodukte und Verpackungen.
- ❖ Fast 80 % des gesamten Plastikmülls liegt in Deponien oder aber in der Umwelt. Und das bedeutet: auch in den Meeren.
- ❖ Etwa 75 % des gesamten Meeresmülls besteht aus Kunststoffen.
- ❖ 8 – 13 Mio. t p.a. Plastikmüll landen landseitig in den Ozeanen
- ❖ Gut 150 Mio. t Plastikmüll (akkumuliert) befinden sich bereits heute im Meer

Doch was wir im Meer sehen, ist nur die Spitze des Eisbergs, denn mehr als 90 % der Abfälle sinken auf den Meeresboden und bleiben unserem Auge verborgen.

¹⁶ UNEP(2017)

¹⁷ Jorge Alayo(2019), S. 1

Plastikinseln sind künstlich gebildete Strukturen. In wissenschaftlichen Gruppen werden sie auch

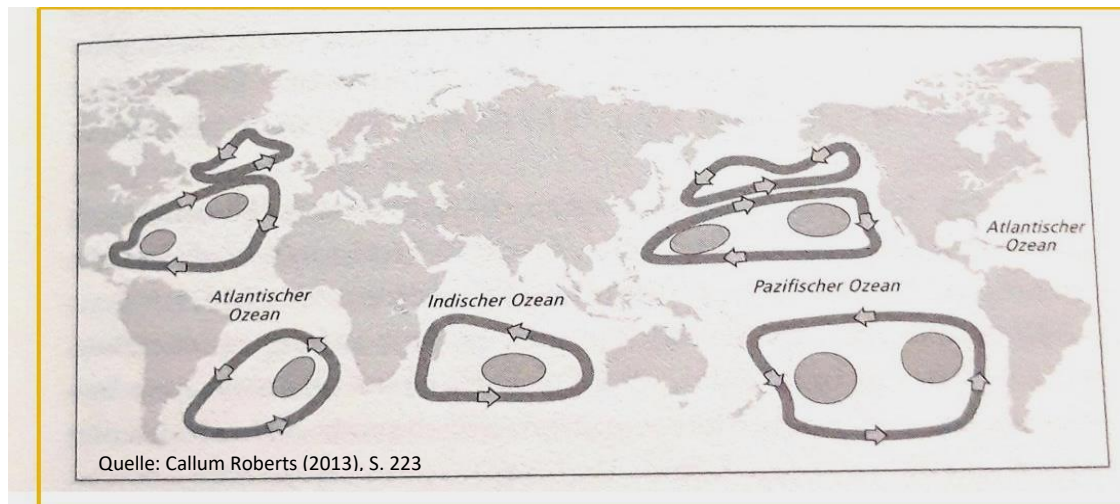


Abbildung 6: Oberflächenströmungen mit Müllregionen

als ‚Plastiksuppen‘ bezeichnet. Mit diesem Begriff werden die Ansammlungen von Plastikmüll in den fünf Hotspots (siehe Abb. 6) der Weltmeere beschrieben. Diese Konzentrationen des Plastikmülls wurden von dem Meeresforscher Curtis Ebbesmeyer aus Seattle in dem Buch **‚Der Mensch und das Meer-Warum der größte Lebensraum der Erde in Gefahr ist‘**¹⁸ beschrieben, das von Callum Roberts herausgegeben wurde. Die Entstehung solcher ‚Plastiksuppen‘ oder auch Plastikbrühen ist unter anderem abhängig von den Luft- und Wassermassen und deren Strömungen. Die Kräfte dieser Strömungen unterliegen Naturgesetzen, die physikalisch und mathematisch bestimmt und beschrieben werden können.

Die abgebildete Karte von Curtis Ebbesmeyer zeigt die großen Wasserwirbel der riesigen kreisförmigen Oberflächenströmungen. Die grauen Formen innerhalb der Wasserwirbel sind die erwähnten Plastiksuppen / Plastikinseln oder allgemein Müllflecken der Ozeane, wo sich die Abfälle konzentrieren.

Zu der Frage, woher der ganze Plastikmüll kommt, der ursächlich ist für die Entstehung von Plastikinseln, lässt sich feststellen, dass diese Ansammlung von Plastikmüll aus zwei Quellen gespeist wird. Die eine Quelle liegt landseitig in den Binnengewässern und die andere ist seeseitig vom Eintrag des Mülls in die Ozeane bestimmt.

Die Ursachen der landseitigen Einträge können die folgenden Verschmutzungen sein:

- ❖ Mangelhaft geführte Mülldeponien
- ❖ Wilde Deponien (unrechtmäßig entsorgter Müll)
- ❖ Naturkatastrophen (Überflutungen, Sturm)

¹⁸ Callum Roberts(2013), S. 288ff

- ❖ Tourismus und Freizeitaktivitäten
- ❖ Wegwerfen von Reststoffen
- ❖ Mikro-Plastik in oder von Produkten

Die Einträge zur Verschmutzung seeseitig können folgende Ursachen haben:

- ❖ Fischerei (Netze, Seile, Behälter; Kisten)
- ❖ Wegwerfen von Abfällen und defekter Ausrüstung
- ❖ Schifffahrt (Verlust von Ausrüstung, Taue, Behälter)
- ❖ Entsorgung von Müll

Die Binnengewässer mit ihren Abflüssen sind die Transportwege für den landseitigen Müll und entlassen diesen schlussendlich in die Meere. Dabei gibt es regionale Unterschiede bezüglich des Eintrags und seiner Zusammensetzung. Die Autoren der Publikation **„River plastic emissions to the world’s oceans“**¹⁹ kommen zu dem Schluss, dass 20 Flüsse verantwortlich seien, die zwei Drittel des Plastikmülls in die Ozeane transportieren. Im Fokus liegen 17 Flüsse in Asien, zwei in Afrika und einer in Südamerika. Die zwei Spitzenpositionen in der Statistik der Plastikverschmutzung belegen die Flüsse Jangtse in China und Ganges in Indien mit Bangladesch.

Des Weiteren tragen auch die Winde und Meeresströme dazu bei, dass sich Plastikinseln bilden. Wir kennen die Passatwinde und z. B. die großen Ströme wie den Humboldtstrom an der Westküste Südamerikas, der auch als Perustrom bezeichnet wird, und den Golfstrom im Atlantik.

Die Systeme der Meeresströmungen und -winde werden nachfolgend erläutert.

¹⁹ Laurent C.M. Lebreton et al.(2016), S. 3

5.2 Die Bewegung von Luft- und Wassermassen

Die Meeresströmungen bewegen riesige Wassermassen durch die Ozeane. Sie sorgen damit für den Austausch von Wärme, Sauerstoff und Nährstoffe auf unserem Planeten. Das warme Wasser vom Äquator fließt zu dem Nord- und Südpol, wo das kalte Wasser in den Polarregionen zum Meeresboden sinkt und dann zum Äquator zurück strömt. An der Wasseroberfläche halten zusätzlich Winde das Meerwasser in Bewegung.

Durch die unterschiedlich starke Erwärmung der Landflächen und der Wassermassen der Ozeane entstehen die Winde. In den subtropischen Zonen erwärmen sich die Landmassen im Frühjahr bis zum Sommer stärker als das Meerwasser. Eine Besonderheit zeigt sich in der tropischen Zone. Diese Zone erstreckt sich vom Äquator bis etwa zum 23. Breitengrad in südlicher und nördlicher Richtung. Hier ist folgendes festzustellen: Über das ganze Jahr hinweg ist der Unterschied zwischen der Land- und Wassererwärmung gleichbleibend. Erst das Spiel der Temperaturunterschiede zwischen Land und Meer lassen durch auf- und absinkende Luftmassen die Winde entstehen. Diese Winde verursachen Strömungen an der Wasseroberfläche, die durch die Erdrotation einen extra ‚Dreh‘ erhalten.

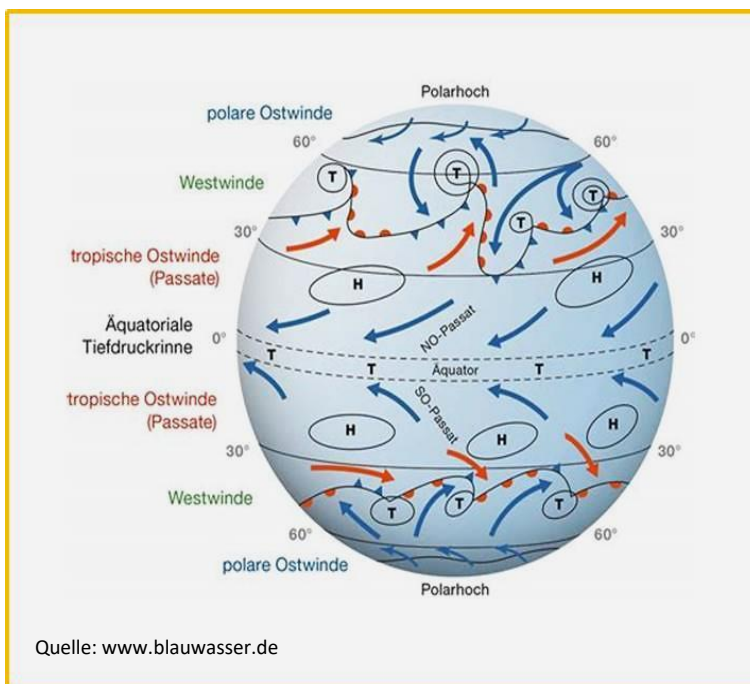


Abbildung 8: Globale Windsysteme

Küstenlinien der Kontinente, bringen gewaltige, kreisförmige Strömungen auf der Wasseroberfläche, die als Meereswirbel beschrieben werden können.

5.3 Müllwirbel im Meer

Das weltweit umfassende Förderband der Meeresströmungen bewirkt, dass der entsorgte Plastikmüll sich in den Meereswirbeln ansammelt. Das Förderband wird an der Meeresoberfläche von vie-

Die Hauptwinde sind polare Ostwinde, Westwinde und die Passatwinde, die für die Bildung von Meereswirbeln verantwortlich sind. Diese Winde transportieren durch die Wirkung der ‚Corioliskraft‘ die Wassermassen zum Äquator hin. Um den Breitengrad des Äquators herum strömt das Wasser in westlicher Richtung bis es dann auf einen Kontinent trifft.

Das Zusammenwirken von Luftströmen und Wassermassen, sowie die Begrenzungen durch die

len Wirbeln angetrieben, die wie Zahnräder eines Uhrwerks ineinandergreifen. Die Wirbel sind unterschiedlich groß und rotieren daher mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Callum Roberts schreibt hierzu: „Am langsamsten rotieren die arktischen Wirbel, die ungefähr alle 13 Jahre einen Umlauf vollenden. Die riesigen Wirbel des Pazifiks (...) brauchen für einen Umlauf sechseinhalb Jahre. Der Wirbel, der die Antarktis umrundet, wird durch den heftigen Wind stärker beschleunigt und dreht sich einmal in drei Jahren und vier Monaten.“²¹

Die fünf größten Plastikwirbel befinden sich in der Nähe des Äquators. Der weltweit bekannteste Wirbel mit Plastikmüll befindet sich im Nordpazifik. In ihm häufen sich wegen der günstigen Strömungsverhältnisse Unmengen von Plastikteilen an. Was einmal in die riesigen rotierenden Meereswirbel hineindriftet, wird überwiegend darin gefangen gehalten. „Es handelt sich bei dem Müllwirbel um den inneren Teil des Subtropenwirbels im Nordpazifik. Der Müll verfängt sich im Inneren, weil sich der Wirbel spiralförmig dreht und alles, was sich verfängt, in Richtung des Zentrums befördert wird. Die Abfälle können aus Südostasien stammen oder aus dem Tausende von Kilometer entfernten Nordamerika.

Im Zentrum des pazifischen Müllwirbels treiben auf einer Fläche, die schätzungsweise die Größe von Mitteleuropa hat, vermutlich zwischen 50 und 100 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle.“²² Vermutlich treiben in jedem dieser Müllstrudel etwa 1000 – 2500 g Plastikmüll auf jedem Quadratkilometer. Will man eine Kennzahl für die Plas-

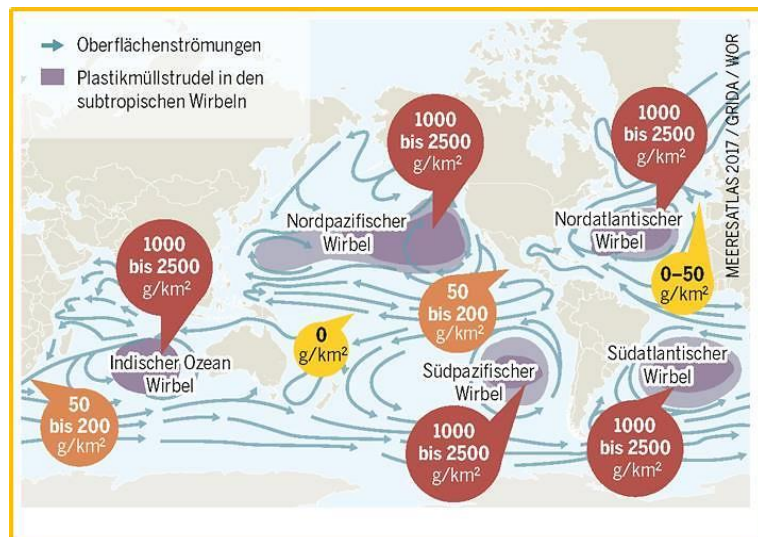


Abbildung 9: Plastikmüll-Konzentration in den subtropischen Wirbeln

man eine Kennzahl für die Plastikmüll-Konzentration in den Wirbel ermitteln, so liegt die Schwierigkeit darin, dass die Fläche, aus der die Plastiksuppe besteht, nicht genau zu bestimmen ist. Die Angaben der Konzentration des Plastikmülls pro Quadratkilometer sind je nach Quelle sehr unterschiedlich. Der Forschungsbericht „Plastic Pollutions in the World’s Oceans“²³ gibt eine nähere Auskunft über die Auswertung der Daten. Die Plastikmüllsdichte (siehe Abb. 9) aus dem Meeresatlas 2017²⁴ ist circa um den Faktor 24 geringer im Vergleich zu dem erwähnten Forschungsbericht für den Nordpazifischen Wirbel.

²¹ Callum Roberts(2013), S. 227

²² Mojib Latif(2014), S. 154

²³ Marcus Eriksen et al.(2014)

²⁴ Hrsg. Ulrich Bähr(2017)

Schätzung der Plastikverschmutzung in den Weltmeeren

	Size class	NP	NA	SP	SA	IO	MED	Total
Count	0.33–1.00 mm	68.8	32.4	17.6	10.6	45.5	8.5	183.0
	1.01–4.75 mm	116.0	53.2	26.9	16.7	74.9	14.6	302.0
	4.76–200 mm	13.2	7.3	4.4	2.4	9.2	1.6	38.1
	>200 mm	0.3	0.2	0.1	0.05	0.2	0.04	0.9
	Total	199.0	93.0	49.1	29.7	130.0	24.7	525.0
Weight	0.33–1.00 mm	21.0	10.4	6.5	3.7	14.6	14.1	70.4
	1.01–4.75 mm	100.0	42.1	16.9	11.7	60.1	53.8	285.0
	4.76–200 mm	109.0	45.2	17.8	12.4	64.6	57.6	306.0
	>200 mm	734.0	467.0	169.0	100.0	452.0	106.0	2028.0
	Total	964.0	564.7	210.2	127.8	591.3	231.5	2689.4

Estimated total count ($n \times 10^{10}$ pieces) and weight ($g \times 10^8$ g; or $g \times 10^2$ tons) of plastic in the North Pacific (NP), North Atlantic (NA), South Pacific (SP), South Atlantic (SA), Indian Ocean (IO), Mediterranean Sea (MED), and the global ocean (Total). Estimates were calculated after correcting for vertical distribution of microplastics [27].

doi:10.1371/journal.pone.0111913.t001

Modellergebnisse für die Gesamtpartikelzahl und das Gewicht des in den Weltmeeren schwimmenden Plastiks

Tabelle 2: Plastikverschmutzung in den Weltmeeren

Bezogen auf die geschätzten Daten in der Tabelle 2 lassen sich Anzahl und Gewicht der im Meer schwimmenden Plastikpartikel in absoluten Zahlen darstellen, wie in der Tabelle 3 aufgeführt. Die Tabelle 3 gibt die Gesamtpartikelanzahl ‚n‘ in Stück Milliarden an. Das Gewicht ‚G‘ des in den Weltmeeren befindlichen Plastiks wird in Tonnen angegeben, wobei ‚G‘ mit 100 multipliziert ist.

Benennung	Nord-Pazifik	Nord-Atlantik	Süd-Pazifik	Süd-Atlantik	Indischer Ozean	Mittelmeer
Gesamtpartikelzahl: n	1990 Mrd.	930 Mrd.	491 Mrd.	297 Mrd.	1300 Mrd.	247 Mrd.
Gewicht: G	96.400 t	56.470 t	21.020 t	12.780 t	59.130 t	23.150 t
Fläche der Plastikwirbel: A	1,6 Mio. km ²	747.739 km ^{2*}	394.774 km ^{2*}	238.794 km ^{2*}	1,05Mio. km ^{2*}	198.593 km ^{2*}

Tabelle 3: Daten der Plastikwirbel

*berechnete Werte d. Verf.

Die Fläche des Nordpazifischen Plastikwirbels wird im Plastikatlas 2019²⁵ mit 1,6 Mio. km² beziffert. Mit der Angabe der Gesamtmenge von Partikel n von 1990 Mrd. und der Fläche A von 1,6 Mio. km² lässt sich der Wert von 1.243.350 Partikel pro Quadratkilometer für n₀ berechnen. Mit

²⁵ BUND-Heinrich Böll Stiftung(2019), S. 29

dieser Annahme lässt sich für die weiteren lokalisierten Plastikwirbel im Nord- und Süd-Atlantik, im Indischen Ozean, Südpazifik und Mittelmeer die Fläche A als Schätzwert ermitteln.

All diese Plastikwirbel haben gemeinsam, dass mit jedem Umlauf ein Teil des schwimmenden Plastikmülls am äußeren Rand des Wasserwirbels wegströmt und an die Küstenstrände gespült wird. Nach Curtis Ebbesmeyer wird die Hälfte des mitgeführten Mülls bei jeder Umdrehung des Plastikhaufens freigesetzt. Für den am bestuntersuchten Nordpazifikwirbel ist das nach sechseinhalb Jahren 48.200 t Müll, die frei im Ozean herumtreiben und teilweise an den Küstenregionen anlanden. Zum Vergleich: Diese Menge könnte in 2.410 Standard-Güterwagen transportiert werden.

Nicht alle Plastikgegenstände schwimmen auf der Meeresoberfläche. Etwa die Hälfte von ihnen ist dichter als Wasser und fällt mit unterschiedlicher Sinkgeschwindigkeit auf den Meeresboden. Die andere Hälfte verbleibt im Meeresstrudel und bildet große Matten bestehend aus Plastik, Fischereinetzen, Tauen und Seilen sowie sonstigen Müllgegenständen. Diese Ansammlungen werden als Plastikinsel bezeichnet.

5.4 Das Bilden von Plastikinseln durch Müllanhäufung

Wasserwirbel mit Müll bilden Plastikinseln. Wie schon erwähnt, entstehen sie aus den Plastikmassen und durch die besonderen Meeresströmungen. Als Bestandteile dieser Plastikinseln finden wir neben großen Plastikteilen auch Plastikpartikel, diese werden durch Wellenbewegungen zerkleinert und unter der Einwirkung der UV-Strahlung zersetzt. Sie sind das Resultat unserer Epoche in der ununterbrochen Plastik produziert wird und es eine Mentalität des Wegwerfens gibt.

Bisher wurde nur die Art von Plastikinsel betrachtet, die durch Meereswirbel zur verstärkten Plastikanhäufung führt. Es gibt noch eine andere Art von Plastikinseln. Sie bestehen aus Landmasse und werden ausschließlich für die Aufnahme von großen Müllmassen verwendet. Am Beispiel der ‚Malediveninsel Thilafushi‘²⁶ wurde das Entstehen solcher soliden Plastikinseln durch direkten oder indirekten Einfluss des Menschen untersucht.

In den 1990er Jahren wurde durch einen Regierungsbeschluss festgelegt, dass die Lagune Thilafushi als Mülldeponie verwendet wird. Das Müllproblem stand ursächlich im Zusammenhang mit rund 1,5 Millionen Touristen im Jahr, welche die Malediven als ihr Urlaubsziel auserkoren hatten. Jeder einzelne Tourist produzierte im Durchschnitt 3,5 kg Müll am Tag. Diese Masse ist das Dreieinhalbfache dessen, was die Einwohner selbst erzeugen. Dies führt dazu, dass tagtäglich bis zu 400 Tonnen Müll, vermischt mit Plastik, auf die Müllinsel verbracht wurden. Sie ist eine offene Deponie, deren Müllberge angezündet werden und mit anderem Schutt abgedeckt werden. Die Rauchentwicklung dieser Schwelbrände ist bis zu der 10 km entfernten Hauptstadt Malé zu sehen.

²⁶ Jorge Alayo(2019), S. 8–9

Auch mit dieser Art der Müllverbrennung gelangen viele Plastikteile über Windströmungen in das Meer mit verheerenden Folgen für die Meerestiere und Meeresflora. Zusätzlich sind die Menschen, die in dieser Umgebung leben müssen, durch die giftigen Dämpfe des Verbrennungsprozesses in ihrer Gesundheit bedroht.

Dieses Beispiel zeigt, dass nicht nur die schwimmenden Plastikinseln eine Bedrohung für die Ozeane sind, sondern auch die Landinseln, die ausschließlich als Mülldeponien eingerichtet werden.

Jorge Alayo berichtet in seinem Artikel über die unbewohnte Insel namens **Hendersons Island**, „mit einer Größe von gerade einmal 37 Quadratkilometern (sie; Anm. d. Verf.) liegt im Südpazifik und gehört zum UNSECO Weltnaturerbe. Ihre weißen Strände und Kokospalmen könnten das Naturreservat zum Paradies machen, doch ist neben einer beeindruckenden Natur vor allem eines gegenwärtig: Plastik. Fast 38 Millionen Plastikteile mit einem Gesamtgewicht von 17,6 Tonnen machen die Insel zu dem Ort mit der höchsten Plastikmüll-Dichte weltweit (2015). Leider ist von noch größeren Mengen auszugehen, da Mikroplastikpartikel unter 2 Millimetern sowie das Plastik an felsigen Abschnitten der Küste nicht in die Zählungen mitaufgenommen wurden. Rund 68% des Mülls fanden die Forscher zudem in den ersten 10 Zentimetern unter der Sandoberfläche. Es ist also gut möglich, dass in tieferen Schichten weiteres Plastik verborgen liegt.“²⁷ Es ist nur eine Frage der Zeit bis auch diese Sandschicht vom Wasser freigespült wird und somit die Ozeane mit noch mehr Plastik anreichern.

6 Die Plastikflut in den Weltmeeren und ihre Folgen

Der Plastikmüll in den Weltmeeren besteht zum größten Teil aus Einwegartikeln, Verpackungsmaterial und Wegwerfprodukten, d.h. nicht reparierbaren oder nicht dauerhaft nutzbaren Produkten. Es sind meist die großen Flüsse, besonders die in Asien, die große Mengen von Plastikmüll in die Ozeane transportieren.

Die Studie „The New Plastics Economy“²⁸ der Ellen MacArthur Foundation kommt sinngemäß zu dem Ergebnis, „dass die südostasiatischen Länder für etwa 80% des Plastikmülls im Meer verantwortlich sind. In diesen Ländern sind mangelhafte Recycling-Systeme zu kritisieren, sowie eine unzureichende Bildung zu bemängeln. Auch steht auch ein unbewusster Konsum auf der Tagesordnung. Aus genau den Gründen wird Plastik nur selten recycelt. Der Müll landet auf Deponien und weht dort ins Meer, wenn er nicht schon direkt ins Meer gelangt.“

Warum ist gerade Asien ein Brennpunkt für die Verschmutzung der Flüsse durch den Plastikmüll? Zwei Gründe sind zu nennen. Zum einem exportiert Europa seinen Plastikmüll unter anderem nach Indonesien, Malaysia und China. Dort landet er meist in den Flüssen und damit auch in den Ozea-

²⁷ Jorge Alayo(2019), S. 8

²⁸ Hrsg. World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company(2016), S. 1–120

nen, weil er unsachgerecht oder ungeregelt entsorgt wird. Ein weiterer Grund ist die chinesische industrielle Produktion von Konsumgütern, die auch nach Europa exportiert werden. China gehört zu den weltweit größten Volkswirtschaften. Der Plastikmüll, der bei der Produktion dieser Güter anfällt, ist nach Zusammensetzung und Menge unbekannt. Hinzu kommt die Müllentsorgung auf hoher See hinzu. Der Müll wird schlichtweg über Bord ins Meer geworfen. Man findet darin auch ausgediente große Fischernetze und verrottende Taue. An den verschmutzten Meeresstränden sind die Folgen dieser Handlungen zu besichtigen.

Weiterführend ist zu erwähnen, dass im internationalen Ranking der größten Plastikmüll-Exporteure 2018 Deutschland an Position drei mit 701.539 Tonnen liegt (Tab. 4). Während die an-



deren EU-Mitglieder (Belgien, Frankreich und Polen) zusammen auf 978.077 Tonnen kommen. Akkumuliert mit dem Wert für Deutschland verbucht die EU rund 1.68 Mio. Tonnen Plastikmüll für den Export. Mit diesem Wert werden die USA und Japan im Ranking überholt und auf die Plätze drei und zwei verwiesen.

Betrachtet man die Plastik-

Tabelle 4: Plastikmüll-Exporteure

müllexporte nach Malaysia unter dem Gesichtspunkt der Geldströme (Tab. 5)²⁹, so wird deutlich, dass die Länder USA und Japan die höchste Exportrate aufweisen. Die europäischen Staaten Großbritannien, Deutschland, die Niederlande und Spanien sind in dieser Tabelle unter den zehn größten exportierenden Ländern zu finden, die ihren Plastikmüll nach Malaysia ausführen.

Rank	Country	Exports (Mio. US\$)
1.	USA	52,00
2.	Japan	39,00
3.	Großbritannien	25,00
4.	Deutschland	21,00
5.	China	11,00
6.	Mexico	8,00
7.	Niederlande	7,00
8.	Australien	6,00
9.	Spanien	4,00
10.	Kanada	4,00

Tabelle 5: Exportländer von Plastikmüll nach Malaysia

Der aus Deutschland nach Asien exportierte

²⁹ Arne Perras und Vivien Timmler(2019)

Plastikmüll gilt in Deutschland als ‚recycelt‘, aber tatsächlich er landet in den Plastikmüll importierenden Ländern in der Umwelt mangels fehlender Infrastruktur für ein geregeltes Recycling. Somit kann der Plastikmüll in den Flüssen und schließlich in den Ozeanen landen. Neben Deutschland und der EU haben „die USA rund 90 Prozent ihres Altplastiks nach Asien verschifft, davon etwa 70 Prozent nach China und Hongkong“; sinngemäß aus dem Online-Magazin ‚Energieleben.at‘³⁰ zitiert.

Für die Europäische Union ist zu erwähnen, dass ab dem 01. Januar 2021 neue EU-Regeln für den Umgang mit Plastikmüll in Kraft treten. Danach dürfen unsortierte oder verschmutzte Plastikgemische nicht mehr weltweit gehandelt werden. Künftig sollen nur noch saubere, gut sortierte Kunststoffabfälle, die einfach zu recyceln sind, unter strenger Kontrolle gehandelt werden. Im Einzelnen gilt:

- ❖ In die Entwicklungsländer dürfen nur noch saubere Kunststoffabfälle zum Recycling ausgeführt werden
- ❖ Ex- und Importe in und aus Ländern der OECD-Staaten sollen strenger kontrolliert werden
- ❖ Die Ausfuhr unsortierten Plastikmülls in NICHT-OECD-Staaten wird komplett verboten

Die neuen Regeln zeigen, dass die EU Verantwortung für den in der Europäischen Union produzierten Plastikmüll übernimmt.

Das Problem der Plastikverschmutzung im Pazifik und im Indischen Ozean liegt in der Hauptverantwortung der Anrainerstaaten. Besonders zu nennen die lokal handelnden Akteure in China und Südostasien. In diesen Staaten wird der importierte Plastikmüll aus Industrieländern in die Flüsse und in das Meer verbracht. Um dieses Handeln zu unterbinden, fehlen entsprechende Restriktionen und Gesetze vor Ort.

6.1 Anlandungen an Küstenregionen

Nehmen wir als Beispiel die deutsche Nordseeküste. „Allein in der Nordsee werden jährlich 20.000 Tonnen Müll eingetragen, schätzt das Umweltbundesamt. Der größte Teil davon besteht aus Plastik. Am Strand von Westerland auf der Nordseeinsel Sylt fallen auf einem einzigen Abschnitt mit einer Länge von sieben Kilometern ungefähr zwei Tonnen Müll an und das jeden einzelnen Tag.“³¹ Die Zusammensetzung der Abfälle, die am Strand gefunden wurden, bestanden aus Plastik, Holz, Glas, Papier und Karton. Auch Textilien, Metallteile und Rückstände von Nahrungsmitteln waren an den untersuchten Strandabschnitten zu finden. Der Plastikanteil der Gesamtanlandung an

³⁰ Hrsg. Redaktion Energieleben (2018), S. 2

³¹ Jennifer Timrott(2015), S. 10

den Stränden der deutschen Nordseeküste beträgt nach einer Berechnung des UBA 59,2 Prozent³². Dieser hohe Anteil an Plastikmüll ist besonders problematisch, weil Plastik extrem haltbar und langlebig ist. Wird der Müll an den Stränden nicht entfernt, wird der angelandete Abfall durch das Fluthochwasser und Stürme wieder zurück in das Meer gespült. Da das Plastik im Meerwasser eine hohe Verweildauer verzeichnet, um sich zu zersetzen (siehe Abb. 10), reichern sich in kurzer Zeit weitere große Mengen an Plastikmüll an.

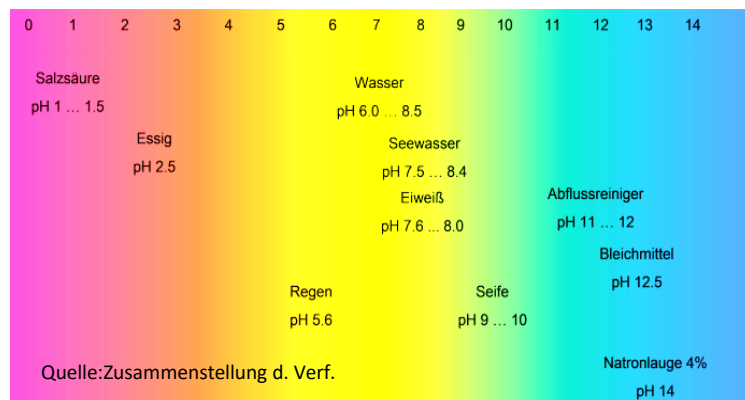


Die Meere werden damit weiterhin belastet. Die Meereslebewesen werden nicht nur gefährdet, sondern können auch getötet werden. Die ganze Lebensumgebung für die Tier- und Pflanzenwelt in den Ozeanen wird durch den Eintrag des Plastiks vielfältig zerstört, mindestens lebensfeindlich verändert. Eine weitere Folge ist die Versauerung der Ozeane durch die schwimmenden und absinkenden Abfälle.

Abbildung 10: Zersetzungszeiten von Müll im Meer

6.2 Versauerung der Ozeane

Von der breiten Öffentlichkeit nicht oder nur wenig wahrgenommen und daher kaum diskutiert ist die Versauerung der Ozeane durch Plastikmüll. Von der Wasseranalyse ist der Parameter ‚pH-Wert‘ bekannt. Dieser Wert gibt darüber Auskunft, ob das Wasser als basisch, neutral oder sauer zu bewerten ist. Die Skala des pH-Wertes reicht von 0 (sauer) über 7 (neutral) bis 14 (basisch). Für das unbelastete See-/ Meerwasser kann ein durchschnittlicher ‚pH-Wert‘ von 8,2 basisch angesetzt werden.



Übersicht 2: Substanzen auf der pH-Wert-Skala

³² Stefanie Werner(2010), S. 4

Seit der Industrialisierung in 18. Jahrhundert ist der ‚pH- Wert‘ auf 8,1 gesunken. Die Änderung des Wertes scheint auf den ersten Blick als sehr gering. Berücksichtigt werden muss, dass die Berechnung des pH-Wertes einer logarithmischen Funktion unterliegt. Daraus ergibt sich für die Änderung um 0,1 eine prozentuale Absenkung von rund 20 Prozent. Für das Jahr 2100 wird ein Absinken des pH-Wertes in den Ozeanen von 0,3 ... 0,4 Einheiten prognostiziert. Daraus könnte folgen, dass die Meere um 100% bis 150% saurer bzw. weniger basisch werden. Allgemein wird ein pH-Wert von 7,7 noch als basisch eingestuft.

In der Diskussion über die Versauerung der Meere wird neben dem Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂) eine weitere Quelle als Ursache erforscht. Nämlich Methan (CH₄), das auch in die Kategorie der Treibhausgase (THG) eingestuft wird.

Eine Forschergruppe der Universität Hawaii hat zum ersten Mal erkannt, dass Plastik Methan produziert. Bei der Untersuchung, wieviel Methan durch biologische Prozesse im Meerwasser freigesetzt wird, haben sie weit höhere Werte festgestellt als vorher vermutet. Diese hohen Mengen von Methan konnten nicht allein von den Meerestieren stammen, so war ihre Meinung. Die Wahrscheinlichkeit war recht groß, dass die Plastikflaschen, in denen die Wasserproben gelagert wurden, die Ursache für den hohen Methangehalt waren. Diese Entdeckung zeigte den Forschern, dass Plastik, hier in Form der Plastikflasche für die Probe, ebenfalls Methan abgibt.

Die kanadische Ozeanografin Sarah-Jeanne Royer und ihr Forschungsteam setzten hier mit ihrer Forschung an, um den Zusammenhang zwischen Plastik und Methanabgabe zu ergründen. Sie untersuchten unter anderem die häufigsten Plastikarten, die in den Meeren vorkommen.

In ihrem Experiment legten sie die Plastikproben in Quarzröhrchen. Die Plastikproben wurden mit Meerwasser aus einer Tiefe von 25 m umspült. Die so präparierten Quarzröhrchen wurden 212 Tage in die Sonne gestellt. Die UV-Strahlen der Sonne reagierten mit den Plastikproben so, dass diese die Treibhausgase Methan (CH₄) und Ethylen (C₂H₄) erzeugten. Ferner stellte das Forschungsteam fest, dass Polyethylen von allen untersuchten Plastikarten die größte Menge an Gasen abgab. Genau die Plastikart, welche für Einweg- oder Wegwerfprodukte und PET-Flaschen als Basisprodukt verwendet wird.

Über das Polyethylen schreibt Anja Krieger, Autorin vom Deutschlandfunk: *„Dieser Typ von Plastik ist meist flexibel besteht aus einfachen Ketten von Kohlenwasserstoffmolekülen. Wegen dieser schwachen chemischen Struktur setzt Polyethylen so viel Treibhausgas frei, wenn es vom Sonnenlicht zersetzt wird. In weiteren Experimenten stellten Sarah-Jeanne Royer und ihr Team auch fest, dass die Methanemissionen der Plastikpartikel mit ihrer Größe zusammen hängen. So produzierte ein feiner Puder fast 500-mal mehr Methan als dieselbe Menge Plastik in größeren Teilchen. Wenn*

*Plastikmüll zerfällt – ob im Meer oder an Land – dürfte er also auch mehr Treibhausgase produzieren.*³³

Ein weiteres Merkmal, das bei den Forschungsarbeiten von Sarah-Jeanne Royer festgestellt wurde, ist, dass die Abgabe von Methan aus dem Plastik auch ohne Einwirkung der UV-Strahlung stattfindet. Das bedeutet, hat der Abgabeprozess des im Plastik gebundenen Methans einmal begonnen, wird auch ohne Energiezufuhr in Form der UV-Strahlung Methan emittiert.

Royer und Kollegen fassen ihre Forschungsergebnisse so zusammen: *„Vorläufige Versuche zeigten, dass alle getesteten Polymertypen messbare Mengen an CH₄ und C₂H₄ produzieren, wenn sie der Sonneneinstrahlung ausgesetzt werden (Tab. 6; Auszug d. Verf.). (...) Die höchsten Produktionsraten für beide Gase wurden bei*

LDPE gemessen.“³⁴ Der Polymertyp LDPE ist das Low Density Polyethylene (Polyethylen mit niedriger Dichte), welches unter anderen für Behälter, Flaschen, Schläuche, Kunststoffteile für Computerkomponenten,

Plastic type	CH ₄ pmol/g d	C ₂ H ₄ pmol/g d
Polypropylene (PP)	160-180	49-51
Polyethylene Terephthalate (PET)	480-520	53-75
High-Density Polyethylene (HDPE)	80-100	170-210
Low-Density Polyethylene (LDPE)	3900-4300	4700-5500

Tabelle 6: Produktionsraten der Plastikarten

Plastiktüten, Spielplatzfolien, Plastikfolien verwendet werden. Zum Vergleich mit anderen Treibhausgasen aus Industrie und Landwirtschaft führt Royer sinngemäß weiter aus *„um das herauszufinden, fehlen noch wichtige Informationen. Wir müssten besser einschätzen können, wieviel und welche Typen von Plastik im Ozean schwimmen. Dafür bräuchten wir bessere Technologie, zum Beispiel Satellitenbilder. Und wir müssen wissen, wie groß die Oberfläche aller Plastikteilchen ist, die im Meer schwimmen.*“³⁵

Vorläufig ist damit zu rechnen, dass im Vergleich mit den CO₂-Emissionen die Methan-Ausgasungen in den Ozeanen durch Plastikpartikel zu gering sind, um entscheidet zur Versauerung der Meere beizutragen. Royer und Kollegen haben die Vermutung, dass der Ausstoß von Methan im Meer tausendmal kleiner sei als die Methanquellen aus der Viehzucht und dem Nassreisbau.

Aus diesen Methanquellen kann insgesamt ein Methan-Ausstoß von 134 Mio. Tonnen/Jahr³⁶ zum Ansatz gebracht werden. Nach den Ergebnissen und Annahmen der Forschergruppe um Royer verbleiben 0,134 Mio. Jahrestonnen an Methan in den Ozeanen.

³³ Anja Krieger(2018), S. 2

³⁴ Sarah-Jeanne Royer et al.(2018), S. 3-6

³⁵ Sarah-Jeanne Royer et al.(2018), S. 1–8

³⁶ Hrsg. Wikipedia Autoren(2022a), S. 7

Unter der Leitung von Nicolas Gruber, Professor für Umweltphysik an der ETH Zürich, ist es gelungen, in einem Zeitraum von 1994-2007 die CO₂-Aufnahme der Ozeane genau zu bestimmen. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass die Ozeane rund 34 Mrd. Tonnen CO₂³⁷ aus anthropogenen Emissionen aufgenommen haben. Das entspricht etwa 31% der gesamten vom Menschen verursachten Kohlendioxid Emission im genannten Zeitraum.

Im Vergleich der beiden Treibhausgase (THG) CO₂ und CH₄ in den Meeren ist der Anteil des Methans mit 3,94 ppm ($3,94 \times 10^{-3} \text{ ‰}$) am Gesamtaufkommen der THG in den Ozeanen vernachlässigbar klein. Der CH₄-Ausstoß des Plastikmülls als Spurengas trägt nicht entscheidend zur Versauerung der Meere bei. Die Hauptursache für die Versauerung der Meere ist in der Belastung der Atmosphäre mit 34 Mrd. Tonnen CO₂ zu sehen.

Dennoch ist der Klimaforscher Gunnar Luderer vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung der Auffassung, dass es auf jeden Fall notwendig ist, die Emissionen von Plastikmüll weiter zu untersuchen.

Das Entweichen des Methans hat zur Folge, dass es von Meeresorganismen aufgenommen wird und durch biochemische Prozesse zu Kohlendioxid oxidiert. Das so produzierte CO₂ verstärkt die Versauerung der Ozeane und entzieht dem Meerwasser den Sauerstoff. Beides schadet den Meeresorganismen, allerdings nur in einem sehr geringen Maße.

Der in den Ozeanen gelandete Plastikmüll leistet auf diese Art und Weise keinen wesentlichen Beitrag zu Versauerung der Meere. Diese Prozesse laufen langsam ab und können erst über einen längeren Zeitraum die Versauerung der Meere verstärken. Die Meeresökologie wird so allmählich negativ beeinflusst. Versauerte Ozeane haben noch andere weitreichende Auswirkungen. Das saurer werdende Meerwasser hemmt die Kalkbildung bei den im Meer lebenden Krustentieren. Betroffen davon sind: Krebse, Garnelen, Krabben und Hummer. Betroffen sind ebenso Korallen, Austern und das tierische Plankton. Dadurch wird eine Basis von natürlichen ozeanischen Prozessen, die zu der Lebensgrundlage der im Meer lebenden Organismen dienen, unmittelbar zerstört.

Mit der Versauerung der Meere sinkt auf Dauer allgemein die Aufnahmekapazität des CO₂-Speichers in der Hydrosphäre, sie umfasst den Teil der Erdoberfläche, der mit Wasser bedeckt ist. Eine Folge daraus ist, dass die mit CO₂ gesättigte Meeresbiologie kein weiteres Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen kann und verbleibt in der Luft. Die negative Auswirkung ist die Versauerung der Meere.

³⁷ Gruber N et al.(2019), S. 2

6.3 Auswirkungen auf das Klima

Das globale Klima ohne seine Beeinflussung durch die Ozeane zu betrachten, wäre wie eine Zeitung zu lesen ohne Buchstaben darin. Die Ozeane sind für unsere Atmosphäre die unbegrenzte Feuchtigkeitsquelle, weil die Ozeane Wasserdampf erzeugen. Der Wasserdampf gelangt durch den Prozess der Verdunstung in die Luft. Hierzu schreibt Mojib Latif zum Verdunstungsprozess: *„Der erfordert Energie, die dann als sogenannte latente Wärme in der Luft gespeichert ist und bei der Kondensation, der Umwandlung in flüssiges Wasser, wieder frei werden kann. ...()... Feuchtwarme Luft ist demnach energiegeladene Luft. Das Lehren uns die Gewitter immer wieder. Infolge der globalen Erwärmung nimmt die Verdunstung zwangsläufig zu.“*³⁸ Gleichzeitig aber bilden die Meere durch Verdunstung den ‚Luftbefeuchter‘ für die Lebewesen an Land.

Ein weiterer Aspekt in der Klimaveränderung und der Erderwärmung ist in der ‚Albedo‘³⁹ zu sehen, also dem Rückstrahlvermögen oder der physikalischen Reflexionsstrahlung von nicht selbst leuchtenden Oberflächen. Die Albedo kann einen Wert zwischen 0 (keine Reflexion) und 1 (vollständige Reflexion) annehmen. Sie kann auch in Prozentzahlen angegeben werden. Je höher die Reflexionsstrahlung (0 ...100%), desto heller ist die Oberfläche und umso höher die Albedo. Umgekehrt: Je heller das Objekt, desto größer die Reflexion.

In der Studie *„Plastic pollution in the artic“*⁴⁰ des Alfred Wegener Instituts schreiben die Autoren, sinngemäß zitiert: *„Zudem kann Mikroplastik die Albedo von Eis um bis zu 11% erhöhen. Das bedeutet, dass durch die dunkleren Partikel mehr Sonnenlicht absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Plastik könnte also zur verstärkten Eisschmelze beitragen.“*

Mit Blick auf die in den Ozeanen schwimmenden Plastikinseln kann angenommen werden, dass auch diese den Klimawandel beeinflussen. Ihre helleren Oberflächen gegenüber dem dunkleren Meerwasser kann eine veränderte Albedo zur Folge haben. Das heißt, die helleren Plastikpartikel können weniger Sonnenlicht absorbieren, verbunden mit einer geringeren Wärmeabgabe an die Umgebung. Das Meerwasser könnte sich weniger erwärmen. Das ist die positive Seite der mechanischen Barriere einer Plastikinsel. Die Kehrseite dieser Barriere ist, dass weniger Lichtenergie durch das Sonnenlicht in das Meerwasser eindringt. Dadurch werden biochemische Prozesse als die Grundlage von Leben der Mikroorganismen im Meereswasser beeinflusst, wenn nicht auch behindert. Dies betrifft besonders das ‚Phytoplankton‘ im Meerwasser. An späterer Stelle dieser Arbeit wird auf das Absterben des Planktons durch Plastikvermüllung und seine weiterreichende Wirkung auf die Umwelt näher eingegangen. Zunächst kann festgehalten werden, dass die großen Weltmee-

³⁸ Mojib Latif(2014), S. 183

³⁹ Wikipedia Autoren(2022c), S. 1

⁴⁰ Melanie Bergmann, France Collard et al.(2022), S. 331

re für unser Dasein auf dem Planeten Erde eine bedeutende Rolle spielen. Umso mehr sollten wir unseren Beitrag dazu leisten, um die Ozeane zu schützen, indem wir zum einen den Ausstoß der Treibhausgase Kohlendioxid und Methan vermindern und zum andern die Vermüllung der Weltmeere verhindern. Das Treibhausgas CO_2 im Meer wird hauptsächlich aus der Luft aufgenommen. Noch können die Ozeane durch die Aufnahme des Kohlenstoffdioxids aus der Luft die Erderwärmung reduzieren. Der Grund dafür ist, dass das ‚Phytoplankton‘ (z.B. Kiesel- und Grünalgen) in den obersten Wasserschichten der Meere über ‚Photosynthese‘ Sauerstoff produziert, der das Kohlenstoffdioxid bindet. Die benötigte Energie zur ‚Photosynthese‘ liefert die Lichtenergie, welche auf die Wasseroberfläche trifft und eindringt. Wird der Fluss der Lichtenergie durch den Schattenwurf des auf der Meeresoberfläche schwimmenden Plastiks minimiert, kann das ‚Phytoplankton‘ mangels Energiezufuhr absterben.

Wenn das ‚Phytoplankton‘ abstirbt, sinkt es zusammen mit den Ausscheidungen der kleinen Lebewesen, die sich vom ‚Phytoplankton‘ ernähren, als so genannter Meeresschnee, in tiefere Zonen des Meeres hinab. Ein geringer Teil des im Meeresschnee eingebauten Kohlendioxids wird damit für

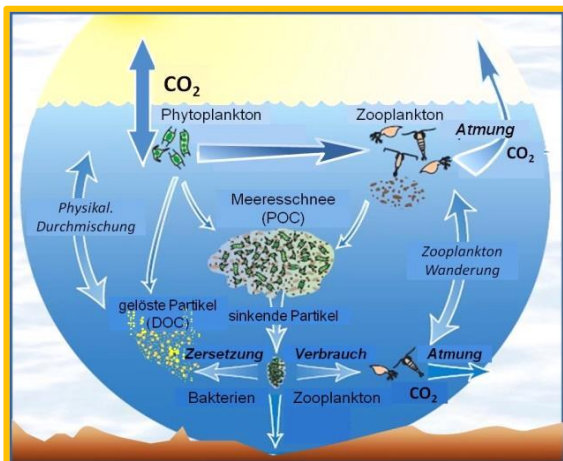


Abbildung 11: Biologische Kohlenstoffpumpe

Quelle: Scienceblog.at

Tausende von Jahren im Meeresgrund begraben. Dieser ständige Niederschlag von Meeresschnee führt den Kohlenstoff in die Meerestiefen hinab und lagert sich teilweise dort ein. Der größere Teil des Kohlendioxids im Meeresschnee wird durch die Nahrungsaufnahme und dem Stoffwechsel der Lebewesen im Meer durch ihre Ausatmung wieder freigesetzt. Dieser Strom von Kohlendioxid über die Aufnahme des CO_2 aus der Atmosphäre und Absenkung in die Meerestiefe wird in diesem Zusammenhang als ‚biologische Kohlenstoffpumpe‘ bezeichnet.

(siehe Abb. 11) bezeichnet. Diese Pumpe hat eine zentrale Stellung für die Funktion der Ozeane als Kohlenstoffsенке und hat einen wesentlichen Anteil zur Regulierung des Erdklimas.

Mit der Erkenntnis, dass das Mikroplastik durch die Einwirkung des Sonnenlichts die Ausgasung des Treibhausgases Methan auslöst, das wiederum zur Versauerung der Ozeane beitragen kann, könnten viele Phytoplankton-Arten aussterben. Dadurch wäre nicht nur der Anfang der Nahrungskette gestört, sondern es hätte auch Auswirkungen auf das Klima. In einem Interview mit einer Journalistin von der Süddeutschen Zeitung sagte die Umweltchemikerin Annika Jahnke vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig und Mitautorin des Forschungsberichts ‚The global threat from plastic pollution‘: „Die Plastikpartikel im Meer trüben unter anderem das

Wasser und schirmen dadurch das Phytoplankton und Blaualgen vom Sonnenlicht ab. Das führt dazu, dass diese Organismen in ihrem Wachstum eingeschränkt werden und weniger Kohlendioxid aus der Atmosphäre binden.“⁴¹

Wenn die Menge des Phytoplanktons sich, wie oben beschrieben, reduziert und die Ozeane sich dadurch erwärmen, dann kann teilweise die Meeresflora und -fauna sterben. Oder das Ökosystem im Meer beginnt sich komplett zu ändern. Dies wäre so, als würde der Mensch mit einer Körpertemperatur von knapp 37° C, im ‚Normalzustand‘, den Zustand einer fiebrigen Temperatur von 38°C erreichen. Der Mensch fühlt sich mit einer erhöhten Körpertemperatur unwohl oder sogar krank. In den Ozeanen würde der gleiche Effekt eintreten, also von einem normalen Zustand in einen fiebrigen Zustand mit allen sich daraus entwickelten Folgen. Auch für den Menschen.

Unter ‚normalen‘ Umweltgegebenheiten befindet sich das Treibhausgas Methan in großen Mengen im Meeresboden. Dort ist es als Methanhydrat gebunden und kann seine Wirkung auf das Klima daher nicht entfalten. Nun allerdings hat eine Forschergruppe an der Ostküste der USA an mehreren hundert Stellen festgestellt, dass das Methangas aus dem Meeresboden aufsteigt. Möglicherweise wird durch Erwärmung oder durch Mikroben oder geologische Prozesse das Gashydrat instabil und dadurch wird das Methan frei und kann in das Meerwasser und damit auch in die Atmosphäre entweichen. Die Forscher weisen darauf hin, dass die MethanAusgasungen zu tief im Meer liegen, um direkt in die Atmosphäre aufzusteigen. Stattdessen wird, wie erwähnt, das Methan von Meerestmikroorganismen aufgenommen und zu Kohlendioxid verstoffwechselt (oxidiert). Zwar wird der Treibhauseffekt damit gemindert, dennoch wird die Versauerung des Ozeans verstärkt und dem Meerwasser Sauerstoff entzogen.

6.4 Einflüsse auf die Nahrungskette

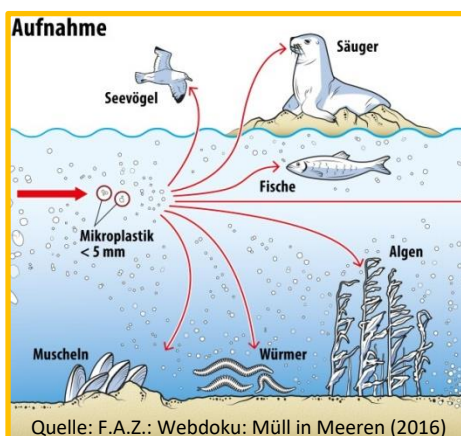


Abbildung 12: Aufnahme von Mikroplastik kette der Lebewesen.

Infolge des Eintrages von Plastikteilchen aller Art, Kunstfasern aus Bekleidungsstücken, sowie Mikroplastik als Bestandteil von Kosmetika und Peeling-Kügelchen, in die Meere ist festzustellen: Kunststoffprodukte brauchen, wie wir wissen, oft Jahrzehnte bis sie durch die physikalischen Prozesse wie Reibung, Wellengang und UV-Strahlung der Sonne zerkleinert und brüchig werden. So dann schwimmen die Mikroartikel, deren Größe auch im Nanometerbereich, also im millionstel Millimeter Bereich liegt, in den Weltmeeren und gelangen in die Nahrungs-

⁴¹ Tina Baier Süddeutsche Zeitung(2021), S. 5

Zunächst ist das ‚Phytoplankton‘ die Nahrung des ‚Zooplanktons‘ z.B. von Ruderfußkrebsen, dem Krill, Larven und vieler Meeresbewohner. Das ‚Zooplankton‘ dient als Lebensgrundlage von Fischen und Säuger und wird von ihnen verzehrt. Am Beispiel des Herings wird Nahrungskette bei Meerestieren erläutert.

Der Hering wird von dem Kabeljau verspeist. Dieser landet im Maul von verschiedenen Robbenarten, unter anderen der Kegelrobbe. Die stehen auf der Speisekarte von Haien und Orcas. Der Riesenhai als einer der größten Meeresbewohner ist Vegetarier und filtert als Nahrungsmittel das Plankton und das Mikroplastik gleich mit und direkt aus dem Wasser.

Die Beschreibung der Situation über die Folgen der Plastikanhäufungen in den Weltmeeren sollte darauf hinweisen, dass es an der Zeit ist, unser Konsumverhalten im Fall des Plastiks zu überdenken und entsprechend zu ändern. Laut dem Nachhaltigkeitsziel der UN-SDG 14 (Sustainable Development Goals) ist die Meeresverschmutzung jeglicher Art zu vermeiden.

7 Methoden zur Vermeidung von Plastikmüll

Zu viele Kunststoffe, insbesondere die als ‚Wegwerfartikel‘ benannten Plastikprodukte, landen nach dem Gebrauch in den Ozeanen oder in den Öfen der industriellen Müllverbrennungsanlagen. Um diesen Missstand zu beheben, müssen Methoden eingeführt werden, welche zur Vermeidung von Plastikmüll und zum Schutz unserer Umwelt beitragen.

Was ist Müll und was ist Abfall? Eine Definition für Abfall gibt das Umweltlexikon von Klaus Gebhardt: *„Abfall ist die summarische Bezeichnung für Gegenstände, Stoffe, Rückstände oder Reste, deren sich der Besitzer entledigen will. Der häufig sinnverwandte Begriff Müll wurde ursprünglich für Kehricht und trockene Abfälle verwandt. Das neue Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz unterscheidet nach Abfällen zur Verwertung und Abfällen zur Beseitigung (jene, die nicht verwertet werden können).“*⁴² Müll entsteht dadurch, dass verschiedene Abfälle zusammengemixt werden und auf Grund von Verschmutzung und Anhaftung nicht wieder getrennt werden können. Diese Art von Müll ist schwer oder gar nicht verwertbar. Ein Beispiel für Müll wäre der Inhalt in der sog. Restmülltonne.

Nicht zuletzt war die Ölkrise in den 1970’er Jahren Anlass für ein Umdenken, wie in Zukunft mit den endlichen Ressourcen der Erde umgegangen werden sollte. Einen Ansatz für den schonenden Umgang mit den Rohstoffen des Planeten Erde beschreibt das ‚**Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz**‘ aus dem Jahre 1994, welches im Jahr 2012 in das ‚**Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)**‘ überführt wurde. Auf den Aspekt der Kreislaufwirtschaft wird später noch in diesem Kapitel einge-

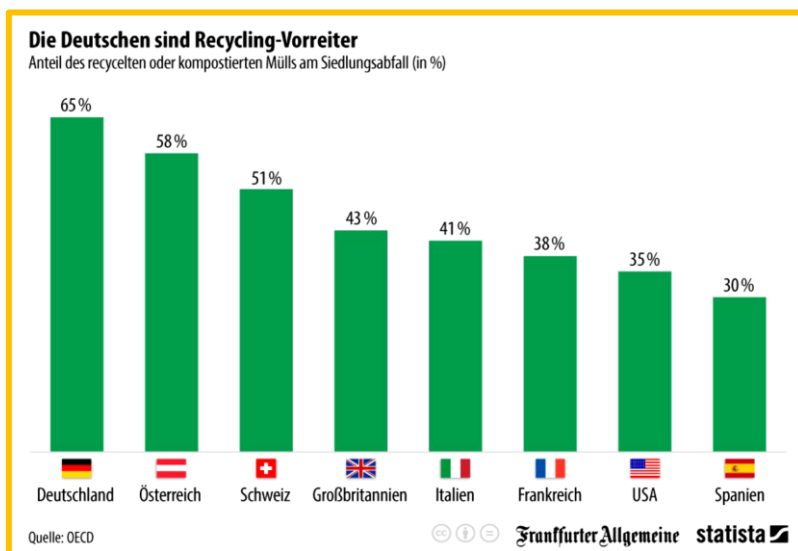
⁴² Klaus Gebhardt(2022), S. 1

gangen. Zum Kreislaufwirtschaftsgesetz selber schreibt das Regelwerk Technische Anleitung TA-Abfall / TA-Siedlungsabfall Folgendes vor:

- ❖ die Zuordnung zu Entsorgungsverfahren
- ❖ Anforderungen zur Schadstoffreduzierung
- ❖ Beschreibung der Stofflichen Verwertung
- ❖ Anforderungen zur Vorbehandlung von Abfällen

Das Regelwerk soll dazu beitragen, dass Aufkommen von Siedlungsabfällen, z. B. aus privaten Haushalten und Bürogebäuden, zu reduzieren und Abfälle nach Möglichkeit später zu verwerten oder umweltverträglich zu entsorgen.

Die Gesellschaft, also wir die Bürger, sind gefordert, deutlich besser für eine umweltfreundliche Entsorgung unseres Mülls zu sorgen. Besonders die Wirtschaft ist aufgefordert, umweltfreundliche und recycelbare Materialien in Umlauf zu bringen. Dies betrifft besonders Verpackungsmaterial und Folien. Die Regierungen haben die Aufgabe, durch Gesetze, Verordnungen und Richtlinien den Rahmen für die Abfallentsorgung zu schaffen. Die EU-Länder mit Deutschland haben das **„Baseler Übereinkommen vom 22. März 1989 über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung“** in ein Gesetz (30. September 1994, BGBl. II, S.2703) gefasst. Das Baseler Übereinkommen ist auch bekannt als **„Baseler Konvention“** und ist ein internationales Umweltabkommen, das ein umweltgerechtes Abfallmanagement eingeführt hat und die Kontrolle der grenzüberschreitenden Transporte gefährlicher Abfälle regelt.



Übersicht 3: Recycling-Quoten Europa und USA

Auch Österreich kommt auf gute 58%, die Schweiz erreicht 51 %. Frankreich und die USA liegen mit 38 % beziehungsweise 35 % noch deutlich im Hinterfeld. Spanien fällt mit 30% auf die letzte Position zurück.

Werden die Daten der OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) für das Recycling und das Kompostieren der Siedlungsabfälle zu Grunde gelegt, dann ist Deutschland in einer Vorreiter-Position.

Aus der Grafik (Übs.3) geht hervor, dass 65 % der Siedlungsabfälle in Deutschland wiederverwertet werden.

7.1 Wohin mit dem Plastikmüll?

Zahlreiche Produkte für den täglichen Bedarf sind in Plastik verpackt. Der dadurch entstehende Plastikabfall wird recycelt, deponiert, verbrannt oder als Handelsware in andere Länder exportiert.

Im Fachmagazin Recovery Ausgabe 03/2018 ist zu lesen: „Bis zum Jahr 2015 wurden etwa 8300 Mta⁴³ Kunststoffe produziert, davon wurden 600 Mta recycelt bzw. in andere Länder zum Recycling verschifft, 800 Mta wurden verbrannt bzw. zur Energiegewinnung genutzt und 4900 Mta gelangten auf Deponien bzw. in die Umwelt und die Meere. Nur 10 % der Recyclingmengen wurden mehr als einmal verwendet.“⁴⁴ Diese Zahlen beziehen sich auf die aufsummierte globale Kunststoffproduktion im zitierten Zeitraum.

Im Allgemeinen herrscht in unserer Gesellschaft die Annahme, dass der meiste Plastikabfall recycelt werde. In der Realität trifft diese Annahme nicht zu. Für Deutschland ist festzuhalten, dass der größte Teil der Endverbraucherabfälle aus Kunststoffen der energetischen Verwertung (52,8%) und der stofflichen Verwertung (46,6%) zugeführt werden. Auf Deponien landen 0,6% der Plastikabfälle. Nach Angaben des Umweltbundesamts wurden 99,4 % (Quelle: Umweltbundesamt / CONVERSIO Market & Strategy; 2019) der gesammelten Kunststoffabfälle im Jahr 2019 weiter verarbeitet, verwertet. Die stoffliche Verwertung schließt das Recycling der Plastikabfälle mit ein. In den Recyclinganlagen wird durch chemisch-physikalische Prozesse aus dem Rohstoff ‚Plastikabfall‘ das **Rezyklat** zur Herstellung von neuen Kunststoffprodukten produziert. Als Rezyklat werden Produkte aus Materialien bezeichnet, die z. B. als Granulat von einem Recyclingprozess entstammen. Dieses Granulat kann dann als Grundstoff wieder in den Herstellungsprozess für Kunststoffprodukte eingeleitet werden. Das Rezyklat ist damit der ‚neue‘ Stoff, der aus einem aufbereiteten Altmaterial hergestellt wurde. Der Anteil des Rezyklats betrug im Jahr 2019 15,6% am Gesamtaufkommen des Endverbraucherabfalls von Kunststoffen.

Die Prozentangaben stammen aus der Publikation „Kunststoffe“⁴⁵ des UBA.

Der Abfall, welcher nicht verbrannt, recycelt oder stofflich verwertet wird, wird zur Entsorgung in fremde Länder exportiert. Deutschland exportiert seinen Plastikabfall vorwiegend nach Asien und dort hauptsächlich nach Malaysia. Nachdem die VR China im Jahre 2018 ein Importverbot für ausländische Plastikabfälle aussprach, wurde dieser Exportweg nach China versperrt. Weiter ist festzustellen, dass sich in den südostasiatischen Ländern das Problem des importierten Plastikmülls dadurch verschärft, dass unzureichende Recycling-Kapazitäten zur Verfügung stehen und somit der Plastikmüll anderweitig entsorgt wird.

⁴³ Mta = Megatonnen im Jahr

⁴⁴ Dr.-Ing. Joachim Harder, S. 2

⁴⁵ Hsg. Umweltbundesamt / CONVERSIO Market & Strategy(2019), S. 3–5

In vielen Fällen wird der Plastikabfall in diesen genannten Ländern nicht ordnungsgemäß entsorgt. Aus diesem Grund will die Bundesumweltministerin Steffi Lemke ein Exportverbot für Plastikmüll aus Deutschland durchsetzen. Sie äußerte sich in einem Interview mit dem Tagesspiegel mit den Worten: „*Ich setze mich auf EU-Ebene für ein weitgehendes*

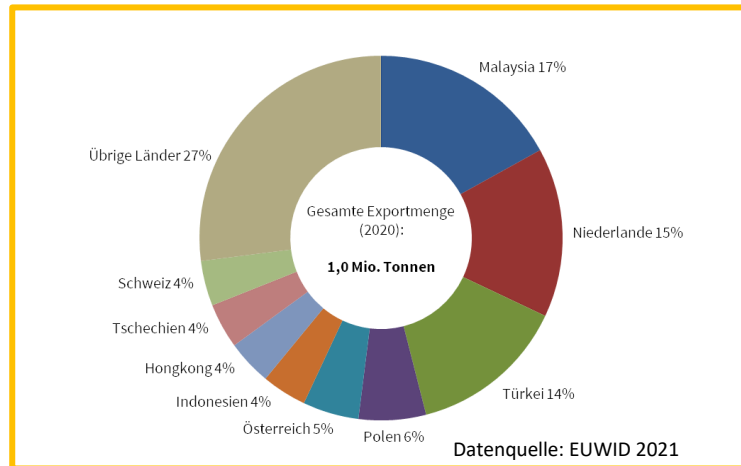


Abbildung 13: Zielländer Deutscher Müllexporte

*Exportverbot ein.*⁴⁶ Sinn gemäß weiter, illegale Abfallexporte sind zu unterbinden. Dies kann sinnvollerweise nur im Rahmen des EU-Binnenmarktes reguliert werden, um zu verhindern, dass das Exportverbot für den Plastikmüll unterlaufen wird.

Deutschland exportierte im Jahr 2020 rund eine Million Tonnen Plastikmüll. Der größte Anteil des Plastikmülls von 17% wurde nach Malaysia verbracht. Gefolgt von der Türkei mit 14% und Polen mit 6% (siehe Abb. 13). Bevor die VR China das Importverbot für Plastikmüll verhängt hatte, ging der Großteil deutscher Plastikmüllexporte dort hin. Nun landet der Plastikmüll in anderen Ländern innerhalb und außerhalb der Europäischen Union. Über den niederländischen Nordseehafen Rotterdam wird der Plastikmüll in die Türkei und in den südostasiatischen Raum verschifft.

Osteuropäische Länder wie Polen oder Tschechien haben in den vergangenen Jahren an Bedeutung für den Müllexport gewonnen, auch dadurch, dass die Exportwege nach Asien erschwert wurden.

Zum Plastikmüllexport nach Malaysia ist anzuführen, dass im Jahre 2021 nur noch 7% von der Gesamtmenge von 0,72 Mio. Tonnen Plastikmüll dorthin ausgeführt wurden (Quelle: EUWID Recycling und Entsorgung 2022).

Der Rückgang des Plastikmüllexports ist in dem Jahr 2021 u.a. auf die unterbrochenen Lieferketten während der Corona-Pandemie zurück zu führen.

Allgemein sollte die Beseitigung des Plastikmülls zur Schonung unserer Umwelt, insbesondere der Gewässer und der Weltmeere, nach der Abfallhierarchie laut der EU-Gesetzgebung erfolgen, sie lautet:

Abfall: Vermeiden vor Recycling, Recycling vor Beseitigung

⁴⁶ Tagesspiegel(2022), S. 1

Ein weiterer Schritt zur Vermeidung der Plastikflut ist die neue EU-Verordnung vom Juli 2021 zur Eindämmung der Produktion von einigen Einwegplastikprodukten u.a. Styropor-Becher, Plastik-Teller und -Besteck, sowie kosmetische Wattestäbchen, Rührstäbchen für Getränke und Trinkhalme. Hierzu erstellten die Verbraucherzentralen von Nordrhein-Westfalen und Bayern den folgenden Text:

- ❖ *„Die deutsche Verordnung ist am 3. Juli 2021 in Kraft getreten- im Handel und in der Gastronomie dürfen nur noch Restbestände ausgegeben werden.*
- ❖ *Manche Einwegprodukte werden nicht verboten, sondern nur gekennzeichnet.*
- ❖ *Grundsätzlich ist der Verzicht auf Einwegplastik immer am besten, oder man sollte Mehrwegprodukte bevorzugen.“⁴⁷*

Mit dem In-Kraft-Treten der erwähnten neuen EU-Regeln zur Handhabung von Plastikmüll zeigt die EU Verantwortung für den in der EU produzierten Kunststoffabfall. Der in der Vergangenheit unkontrollierte Handel mit Plastikmüll hatte zu Lasten der Umwelt und der öffentlichen Gesundheit in den Importländern zugenommen. Die Import-Länder haben weder die Kapazität noch die gesetzlichen Standards für eine sachgerechte und nachhaltige Verarbeitung des problematischen Plastikmülls aus der EU. Deshalb ist es notwendig, dass die Europäische Union mit Festlegung von Regeln für den globalen Handel mit Plastikmüll vorangeht.

7.2 Aufklärung als Handlungsziel

Müll ist für viele Menschen in den wirtschaftlich armen Ländern eine Einnahmequelle, um ihren Lebensunterhalt zu bestreiten, indem sie den auf Mülldeponien verbrachten Abfall nach bestimmten Materialien, sei es Papier, Karton, Plastikverpackungen, Plastikbeutel und dergleichen, durchsuchen und weiterverkaufen. Inzwischen ist in diesen Ländern ein inoffizieller Wirtschaftszweig entstanden, der den Müllsammlern durch den Verkauf der Materialien einen Großteil ihres Haushaltseinkommens einbringt.

Das Einsammeln und Verkaufen der Gegenstände von diesen Mülldeponien ist auch Ausdruck von sozialen und wirtschaftlichen Ungleichheiten in diesen Ländern. Hauptsächlich betroffen sind die Menschen in den Ländern in Afrika, Asien und Lateinamerika. Menschen ohne den Zugang zu Bildungseinrichtungen, ohne Wohnung und Gesundheitsbetreuung und oft auch ohne den Erhalt von Lebensmitteln, sind gezwungen, ihren Lebensunterhalt über Mülldeponien zu bestreiten, indem sie den Abfall anderer sortieren und Verwertbares verkaufen. Diese Menschen sind in den Armutskreislauf eingebunden und haben mit wirtschaftlichen und mit gesundheitlichen Problemen zu kämpfen. Manche verbringen einen Großteil sie ihres Lebens auf diesen Mülldeponien.

⁴⁷ Hrsq. Verbraucherzentrale NRW und Bayern(2021), S. 1

Im Rahmen der AGENDA 2030 der Vereinten Nationen sind 17 Handlungsziele für nachhaltige Entwicklung, den Sustainable Development Goals (SDGs), festgelegt worden. Unter anderem wird in dem SDG Nr. 4 das Thema Bildung hervorgehoben. Aufklärungsaktionen rund um die Problematik der Plastikvermüllung könnten mit Bezug auf das SDG Unterziel Nr. 4.7 etabliert werden. Hilfsorganisationen der UN und die privaten Träger von Bildungseinrichtungen könnten helfen, die enorme Aufklärungsarbeit zu organisieren und Verhaltensanweisungen geben. Ein Gedanke dazu: Durch die Ausbildung von Recycling-Lehrern oder Instruktoren, die regional die Menschen über die Plastikproblematik aufmerksam machen und zielgerecht über die Möglichkeiten des Recyclings, einhergehend mit Gesundheitskonzepten, könnten die Betroffenen aufgeklärt werden. Der nächste Schritt könnte die Anschaffung von kleinen Recyclinganlagen sein. Die zuvor eingewiesenen ehemaligen Müllsammler, könnten dann diese Anlagen betreiben und so ihre wirtschaftliche und gesundheitliche Lage verbessern. Nebenbei würden die wilden Mülldeponien mit der Zeit verschwinden und ein geordnetes Abfallkonzept könnte eingerichtet werden. Am Ende dieses Prozesses könnten Elemente der Kreislaufwirtschaft eingeführt werden.

7.3 Das Prinzip der Kreislaufwirtschaft

Das in Deutschland im Jahr 1994 verkündete Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) wurde 2012 als Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) dauerhaft eingeführt. Es bezieht sich im Wesentlichen auf das Trennen, Entsorgen und Recyceln von Abfall. Der Begriff **CIRCULAR ECONOMY** für Kreislaufwirtschaft ist weiter gefasst. Es geht hierbei von Anfang an um durchdachte Kreisläufe. Dies schließt ein, dass die Produkte und deren Herstellung von Beginn an recycelfähig und als wiederverwendbar geplant und produziert werden. Dieser Ansatz widerspricht dem linearen Wirtschaftsmodell, bei dem immer wieder neue Produkte mit neuen Anreizen geschaffen werden, während die alten in den Müll wandern. Die Circular Economy ist das Gegenteil der Linearwirtschaft, die als sogenannte Wegwerfwirtschaft bezeichnet wird. Dies ist das gängige Wirtschaftsprinzip für die industrielle Produktion von Gütern. Gemäß der Gesetzeslage wird dabei ein Großteil der eingesetzten Rohstoffe nach der jeweiligen Nutzungsdauer der Produkte deponiert oder verbrannt; nur ein geringer Anteil wird einer Wiederverwertung zugeführt.

Einige Autoren der ‚Wikipedia-Gruppe‘ schreiben hierzu: *„Eine Kreislaufwirtschaft (englisch: circular economy) ist ein regeneratives System, in dem Ressourceneinsatz und Abfallproduktion, Emissionen und Energieverschwendung durch das Verlangsamten, Verringern und Schließen von Energie- und Materialkreisläufen minimiert werden; dies kann durch langlebige Konstruktion, Instandhaltung, Reparatur, Wiederverwendung, Remanufacturing, Refurbishing und Recycling erzielt werden. Das Recycling ist dabei zumeist das Mittel letzter Wahl.“*⁴⁸

⁴⁸ Wikipedia Autoren(2022b), S. 1

Eine Kreislaufwirtschaft im eigentlichen Sinn soll zur Schonung der natürlichen Ressourcen und der Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfall dienen. Das Fraunhofer-Institut in Oberhausen zielt mit seinen Untersuchungen in die Richtung der Circular Economy. Die Wissenschaftler sind der Auffassung, dass es Zeit ist für eine zirkuläre Kunststoffwirtschaft (Circular Plastics Economy). Damit die Kunststoffe nicht nach Ende ihrer Nutzung in den Ozeanen, Deponien oder in den Verbrennungsöfen landen, sollten die Konsumenten den Wert der Kunststoffe schätzen. Der Kunststoff ist zu wertvoll, um ihn nach Gebrauch einfach wegzuworfen. Die hieraus entwickelte Grundidee ist die der zirkulären Kunststoffwirtschaft. Darunter versteht man, den Abbau der fossilen Ressourcen und die Verluste, die am Ende der Produktphasen entstehen, zu minimieren und gleichzeitig einen echten Kreislauf von Kunststoffverwendung zu ermöglichen. Im Vordergrund der zirkulären Kreislaufwirtschaft stehen:

- ❖ Reduzierung
- ❖ Wiederverwendung
- ❖ Verwertung

In diesem Zusammenhang veröffentlichte das Umweltbundesamt einen ‚Leitfaden für die Kreislaufwirtschaft‘⁴⁹ mit neun Leitsätzen wie sie in der Übersicht 4 zu lesen sind.

„1 Begriffseinordnung

Die Kreislaufwirtschaft ist Teil einer ressourceneffizienten, nachhaltigen Lebens- und Wirtschaftsweise, welche die Umsetzung der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen fördert und planetare Grenzen respektiert.

2 Geltungsbereich

Die Kreislaufwirtschaft bezieht über die klassische Abfallwirtschaft hinaus alle Phasen von Material- und Produktlebenszyklen in die Betrachtung ein. Sie muss global, inklusive der grenzüberschreitenden Rohstoff-, Waren- und Abfallströme und damit verbundener ökologischer und sozialer Auswirkungen sowie in langfristiger zeitlicher Perspektive der Güterbestände und daraus hervorgehender Materialflüsse betrachtet werden.

3 Ziele

Die Kreislaufwirtschaft dient der Schonung natürlicher Ressourcen einschließlich des Klimaschutzes, dem Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit unter Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips. Darüber hinaus zielt sie auf die Rohstoffsicherung ab. Die Kreislaufwirtschaft soll zur Reduzierung der lebenszyklusweiten negativen Auswirkungen sowohl von Mate-

⁴⁹ Felix Müller et al.(2020), S. 8ff

rialien und Produkten – durch Einsparung von Primärmaterialien und deren Substitution mit Sekundärmaterialien – als auch der Abfallerzeugung und Abfallbewirtschaftung beitragen.

4 Aufwandsmaßstab

Der Aufwand für Maßnahmen in einer Kreislaufwirtschaft soll sich am Aufwand der Primärrohstoffwirtschaft mit den dabei auftretenden Umweltwirkungen inklusive der externen sozialen und ökologischen Belastung bemessen, um die gleichen Materialien oder Materialien und Güter gleichen Nutzens bereitzustellen.

5 Materialkreisläufe

Kreislaufwirtschaft zielt auf eine Bewirtschaftung von Materialien in möglichst gleich- oder höherwertigen Kreisläufen ab, wodurch Primärmaterialien durch Sekundärmaterialien geeigneter

Qualität substituiert und eingespart werden. Gleichwohl sind auch Kaskadennutzungen und endgültige Beseitigungen im Hinblick auf die Ziele (3) und die Aufwandsmaßstäbe (4) erforderlich.

6 Vermeidung

Die Vermeidung von Abfällen und Reststoffen ist der Kreislaufführung grundsätzlich vorzuziehen, da letztere immer verlustbehaftet und mit Energieaufwendungen verbunden ist. Vermeidungsmaßnahmen bemessen sich an dem Beitrag zur Zielerreichung (3) und den Aufwandsmaßstäben (4).

7 Design

Design für eine Kreislaufwirtschaft bedeutet, den funktionalen und wirtschaftlichen Wert von Produkten, ihren Komponenten und Materialien so lange wie möglich zu erhalten, um auf diese Weise negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu minimieren. Dabei sollen die Designansätze die Neuordnung der Produktions- und Konsumformen in der Gesellschaft unterstützen. Die Optimierung des Designs bemisst sich an dem Beitrag zur Zielerreichung (3) und den Aufwandsmaßstäben (4).

8 Schadstoff

Das Inverkehrbringen von Produkten mit Stoffen, von denen Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit speziell für die menschliche Gesundheit sowie die Umwelt ausgehen, ist zu vermeiden. Sofern derartige Stoffe nicht substituierbar, bereits enthalten sind oder sich erst im Nachhinein als solche herausstellen, so sind sie zu zerstören oder durch Ablagerung in sichere Senken aus zu schleusen oder unter Abwägung der Ziele (3) und Aufwandsmaßstäbe (4) in si-

cheren Kreisläufen zu führen, wobei eine Schadstoffanreicherung zu verhindern ist.

9 Verantwortung

In einer Kreislaufwirtschaft tragen alle Akteure innerhalb von Produktlebenszyklen und entlang von Materialwertschöpfungsketten eine Verantwortung für das Erreichen der Ziele der Kreislaufwirtschaft. Die Übernahme der Verantwortung muss rechtlich sichergestellt werden, sofern diese anderenfalls nicht hinreichend wahrgenommen wird.⁵⁰

Übersicht 4: Kurzfassung der Leitsätze zur Kreislaufwirtschaft

Am Beispiel der PET-Flaschen soll gezeigt werden, wie ein Lebenszyklus auf der Grundlage einer echten Kreislaufwirtschaft realisiert werden kann. Die gebrauchten PET-Flaschen werden eingesammelt und zu einer Recyclinganlage transportiert. Dort werden Verschlüsse und Etiketten von der PET-Flasche entfernt und die Flaschen nach Farben sortiert. Nach der Zerkleinerung wird das



Abbildung 14: PET-Recycling

Material gewaschen, getrocknet und von den letzten Verunreinigungen befreit. So vorbereitet kommt das Material in die Schmelze bei 270°C. Danach wird das entstandene Produkt abgekühlt und zu Granulat verarbeitet. Das entstandene Rezyklat kann mit neuem Granulat gemischt und wieder eingeschmolzen werden. Die zähflüssige Masse des Mischgranulats aus der Schmelze wird

einer Spritzgussmaschine zugeführt, die Rohlinge für eine neue PET-Flasche herstellt. Zum Schluss werden die Rohlinge in Form geblasen, gereinigt, abgefüllt und etikettiert. Jetzt können die neuen PET-Flaschen in den Handel gebracht werden und somit wird der Kreislauf geschlossen. Ein neuer Lebenszyklus der PET-Flasche beginnt. Weitere Anwendungen zur Wiederverwertung von PET-Flaschen bieten die Folien- und Textilfaserindustrie, sowie Hersteller von Kunststoffbehältern. Auch hier wird das neu gemischte Granulat aus den PET-Flaschen in den jeweiligen Verfahrensprozess eingeschleust. Die Abbildung 14 zeigt zum einen den Recyclinggrad des Recyclingprozesses mit 93%. Das bedeutet, dass von den in den Recyclingprozess zugeführten PET-Flaschen 93% des Materials wiederverwendet wird.

⁵⁰ Felix Müller et al.(2020), S. 8–9

Ein weiteres Prinzip der Circular Economy ist das **Cradle-to-Cradle**-Prinzip. Aus Wikipedia: „Cradle to Cradle (engl. ‚von Wiege zu Wiege‘, sinngemäß ‚vom Ursprung zum Ursprung‘; abgekürzt auch C2C) ist ein Ansatz für eine durchgängige und konsequente Kreislaufwirtschaft. Das auch als Philosophie bzw. System wahrnehmbare Prinzip wurde Ende der 1990er-Jahre von dem deutschen Chemiker Michael Braungart und dem US-amerikanischen Architekten William McDonough entworfen. ‚Cradle-to-Cradle-Produkte‘ sind demnach solche, die entweder als biologische Nährstoffe in biologische Kreisläufe zurückgeführt oder als ‚technische Nährstoffe‘ kontinuierlich in technischen Kreisläufen gehalten werden können.“⁵¹

Auf der biologischen Seite zirkulieren im Kreislauf die biologischen Verbrauchsgüter, die nach ihrem Gebrauch in diesen zurückgeführt werden können. Sie werden zu Kompost oder zu anderen Nährstoffen, die wiederum für ein Pflanzenwachstum zur Verfügung stehen. Auf der technischen Seite zirkulieren im Kreislauf die Gebrauchsgüter und Materialien, die immer wieder sortenrein zurückgewonnen und zur Herstellung neuer Produkte genutzt werden können (siehe Abb15).

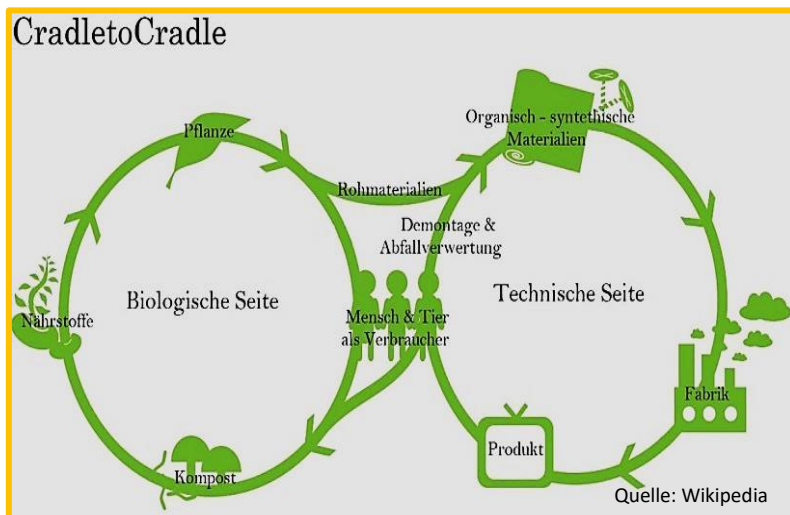


Abbildung 15: Cradle-to-Cradle Kreisläufe

Als Nachteil dieses Prinzips kann angeführt werden, dass nur Produkte, die aus komplett recycelbaren und schadstofffreien Materialien bestehen, sich im Sinne des C2C-Konzepts sortenrein zerlegen und behandeln lassen. Deshalb ist das Cradle to Cradle Prinzip nicht nur eine Methode zur Aufbereitung, sondern beinhaltet auch

einen planerischen Ansatz für den Produktionsprozess.

Ein anderer Ansatz zur Vermeidung von Plastikmüll könnte sein, die Kunststoffverpackungen des täglichen Bedarfs durch Ersatzstoffe zu ersetzen.

7.4 Verpackungen aus Ersatzstoffen

Bei den Lebensmitteln ist es oft notwendig, die Produkte aus hygienischen Gründen besonders zu verpacken. Das Verpackungsmaterial, bestehend aus Plastikfolien, -schalen und -boxen, schützt vor äußeren Einflüssen und hält die Ware länger frisch. Wir wissen, dass zu viel Plastik der Um-

⁵¹ Wikipedia Autoren(2022a), S. 1

welt, insbesondere den Ozeanen schadet. Nachhaltige Ersatzstoffe, die die Plastikverpackungen ersetzen können, sind noch ungenügend verbreitet und meist mit Mehrkosten verbunden.

Die Bundesvereinigung der Deutschen Ernährungsindustrie schlägt unter anderem die folgenden Ersatzstoffe zur Vermeidung von Plastikverpackungen vor:

- ❖ Algen
- ❖ Holzfolie
- ❖ Palmblätter
- ❖ Stroh
- ❖ Zuckerrohr

Algen

Verpackungsmittel, die aus Algen hergestellt werden, sind biologisch abbaubar und können auf dem Kompost zu Pflanzendünger verrotten. Das Verpackungsmaterial aus Algen kann für Kaffee und Tee, Fast-Food-Produkte sowie für Gewürze und Pulver in den Verkauf gelangen.

Holzfolie

Aus dem Rohstoff Holz wird Zellulose gewonnen. Um eine Holzfolie für Verpackungszwecke herstellen zu können, braucht man Holzspäne, einen bestimmten Anteil von Frischholz und ein spezielles Viskose-Verfahren aus Säure und Lauge, wie es bei der Textilverarbeitung angewandt wird. Nach dem Gebrauch der Folie verrottet diese nach einiger Zeit ohne Rückstände, sogar im Komposthaufen. Zum Einsatz könnte diese Folie für trockene Lebensmittel wie Nüsse, Nudeln, Pulver, Reis und Schokolade kommen.

Palmblätter

Ein anderer Ersatzstoff für Plastikverpackungen sind Palmblätter. *„Die Blätter der Arekapalme bleiben beim Ernten der Betelnuss als Abfallprodukt übrig. Sie werden gesammelt, in Wasser eingeweicht, in der Sonne getrocknet und anschließend in Form gepresst. Die so entstehenden Verpackungen sind stabil, wasserabweisend und vollständig kompostierbar. Zudem sind sie besonders hitze- und kältebeständig.“*⁵² So lautet der Kommentar zweier Kommunikationsdesignerinnen, die während ihres Auslandssemesters in Indien diese Methode zur nachhaltigen Herstellung von Verpackungen kennen lernten. Diese Verpackungen sind besonders hitze- und kältebeständig; sie eignen sich für Take-Away-Produkte und für Tiefkühlprodukte.

Stroh

⁵² Hsg. BVE(2021), S. 1–7

Stroh hat Isoliereigenschaften ähnlich wie Styropor und ist besonders einfach zu entsorgen. Ferner hat Stroh auf Grund seines Strukturaufbaus gute Materialeigenschaften zur Feuchtigkeitsregulierung und zur Dämmung. Stroh kann als Isolationsmaterial oder zur Stoßdämpfung für den Versand von temperaturempfindlichen Waren sowie für Glasflaschen verwendet werden.

Zuckerrohr

In Zuckermühlen wird das geerntete Zuckerrohr verarbeitet. Nach dem Pressvorgang fällt ein faseriger, gemahlener Überrest ab, die Bagasse. In der Zellstoffindustrie wird stofflich die Bagasse hauptsächlich zur Herstellung von Verpackungsmaterial genutzt. Bagasse kann aber auch als Plastikalternative für Einwegprodukte eingesetzt werden. Die Eigenschaften von Bagasse sind: wasserundurchlässig, widerstandsfähig gegen Fett, hitze- und kältebeständig. Eingesetzt werden die Produkte auf Basis von Bagasse für Verpackungsschalen, Einmalgeschirr und Fast-Food Verpackungen.

Die Entsorgung dieser Verpackungsart bringt aber auch einen Nachteil mit sich. Nämlich, Bagasse muss korrekt entsorgt werden. Wird sie dem Restmüll zugeführt, geht durch die Verbrennung des Mülls der Vorteil der Kompostierbarkeit verloren. Bagasse-Produkte sollten nicht in der Umwelt entsorgt werden. Sie sind zwar abbaubar, brauchen aber dafür eine bestimmte Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Diese Rahmenbedingungen können in Deutschland nur in industriellen Kompostieranlagen erfüllt werden.

7.5 Recycling von Plastikmüll

Recycling, Rezyklierung oder Müllverwertung sind Begriffe, die für eine Wiederverwertung von Abfallprodukten stehen. Die aus dem Wiederverwertungsprozess entstehenden Materialien werden zu Sekundärrohstoffen. Die so erhaltenen Stoffe werden als Recyclat / Rezyklat bezeichnet. Im Gegensatz zu den Primärrohstoffen, gewonnen aus natürlichen Ressourcen, schonen die Sekundärrohstoffe die natürlichen Ressourcen und tragen zu einer nachhaltigen Entwicklung der Produktionsprozesse bei. Je mehr recycelt wird und die Recyclingprozesse verbessert werden, desto mehr können Sekundärrohstoffe gewonnen werden.

Zum Unterschied zwischen Primär- und Sekundärrohstoff ist für die Kunststoffherstellung festzustellen:

- ❖ Primärrohstoff → Erdöl
- ❖ Sekundärrohstoff → Kunststoffgranulat oder geschredderter Kunststoff

Ein Hauptanteil des Kunststoffrecyclings basiert auf der Verwertung von Verpackungen des täglichen Bedarfs, sowie von PET-Flaschen und Folien, wie sie in der Industrie und beim Transport verwendet werden.

Mit Blick auf die EU-Abfallhierarchie liegt die folgende Maßnahmenreihenfolge zugrunde:

- 1. Abfallvermeidung:**
Hierzu gehört unter anderem auch das Verbot von umweltgefährdenden Stoffen wie PCB und FCKW.
 - 2. Vorbereitung zur Wiederverwendung:**
Das heißt eine erneute Nutzung des Guts wie bei Pfandflaschen oder Second-Hand-Nutzung.
 - 3. Recycling durch stoffliche Verwertung:**
Definierte Abfallstoffströme oder Teile davon werden aufbereitet, um daraus wieder vermarktungsfähige Sekundärrohstoffe zu gewinnen.
 - 4. sonstige Verwertung, z. B. durch energetische Verwertung:**
Die Stoffe werden verbrannt oder vergast, jedoch mit dem alleinigen Ziel der Energiegewinnung.
 - 5. Beseitigung, z. B. durch Deponieren**
- Quelle: Wikipedia Autoren-Gruppe

Das Recycling durch stoffliche Verwertung beginnt in der Regel mit dem Zerkleinern oder Schreddern der nach Art (z. B. Getränkeflaschen oder Folien) sortierten Kunststoffabfälle. Die sortenreinen Teile sind Voraussetzung für den weiteren Prozess des Kunststoffrecyclings. Als Beimischung oder als Granulat kann das gewonnene Material aus den oben genannten mechanischen Verfahren,

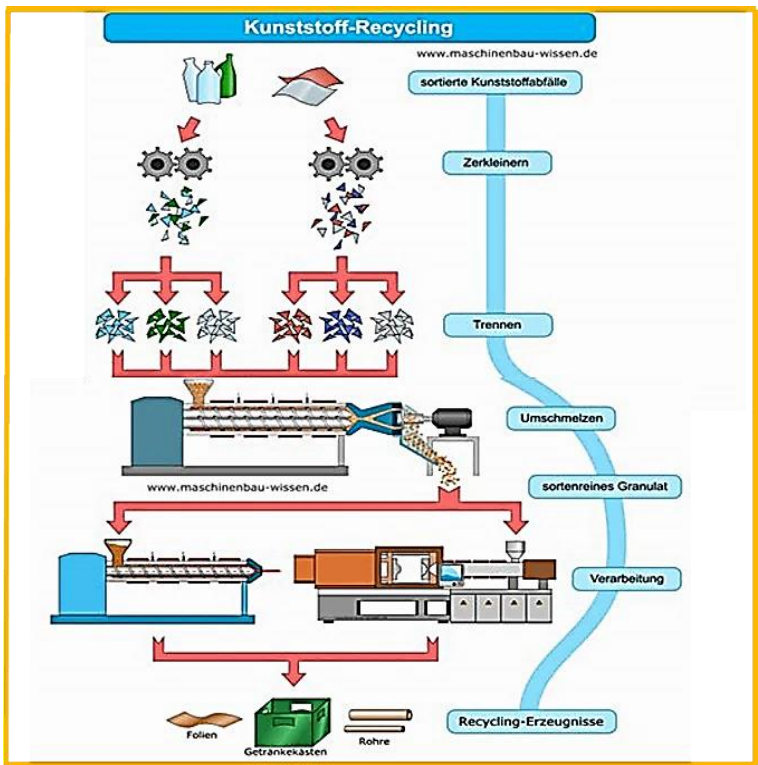


Abbildung 16: Werkstoffliche Verwertung

in den Primärkreislauf eines Herstellungsprozesses eingeschleust werden. Es entstehen so neue Folien, Getränkeboxen oder Rohre (siehe Abb. 16). Die werkstoffliche Verwertung im Recyclingprozess zeigt, dass aus Altplastik neue Plastikprodukte entstehen können.

Bestehen Plastikteile aus Mischprodukten, z. B. Verpackungsfolien mit verschiedenen Kunststoffschichten, oder sind stark verschmutzt, dann steht als letztes Mittel der Entsorgung nur das energetische Recycling zur Wahl. Das bedeutet thermische

Verwertung, d. h. die Plastikteile werden verbrannt. In diesem Fall kann von Recycling kaum eine

Rede sein. Zwar dienen diese Stoffe als Ersatz für Kohle, Gas und Erdöl zur Energiegewinnung, sind aber für den Stoffkreislauf des Kunststoffes verloren. Besonders zu erwähnen ist, dass die Kunststoffarten Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) einen höheren Heizwert erzielen als Braunkohle und liefert bei der Verbrennung fast die dreifache Energie (Tab. 7).

Benennung	Heizwert [Megajoule / Kilogramm]
Polypropylen (PP)	44 MJ/kg
Polyethylen (PE)	43 MJ/kg
Braunkohle	15 MJ/kg
Steinkohle	29 MJ/kg
Quelle: Zusammenstellung d. Verf.	

Tabelle 7: Heizwerte verschiedener Kunststoffe und Kohle

Entscheidend für die Umwelt- und Ressourcenschonung durch die Recycling-Prozesse ist, gleich ob werkstofflich oder thermisch verwertet wird, die Recyclingquote des anfallenden Plastikmülls. Das Umweltbundesamt (UBA) kommt bei dem Thema ‚Kunststoff-Recycling‘ zu dem Schluss: *„Die Höhe der Recyclingquote lag bei Abfällen aus der Kunststoffherzeugung und Kunststoffverarbeitung im Jahr 2019 bei 82 % beziehungsweise bei 94 %. Von Kunststoffabfällen aus privaten Haushalten wurden 33 % stofflich verwertet, von den Kunststoffabfällen aus dem gewerblichen Endverbrauch 47 %. Der Grund für diese unterschiedlichen Quoten ist, dass Kunststoffe in der Industrie meist sehr sauber und sortenrein anfallen, in Haushalten und bei vielen Gewerbebetrieben jedoch Kunststoffabfälle verschmutzt und vermischt. Aus Umweltschutzsicht ist es sinnvoll, vermehrt Altkunststoffe aus dem Restmüll „abzuschöpfen“ und einer möglichst hochwertigen werkstofflichen Verwertung zuzuführen. Denn diese Verwertung ist, wie viele Ökobilanzen zeigen, vorwiegend die umweltgünstigste Entsorgungsvariante. Haupteinsatzgebiete von Kunststoffrezyklaten in Neuprodukten sind Bauprodukte und Verpackungen. Im Jahr 2019 wurden rund 67 % der in Deutschland eingesetzten Rezyklate in diesen beiden Anwendungsbereichen verwendet.“*⁵³

Grundsätzlich ist der Begriff Recycling neutral. Denn er gibt keine Auskunft darüber, ob ein Produkt nach einem Recycling-Prozess gleich-, höher- oder minderwertiger ist. Um einen Qualitätsunterschied zu erklären, werden die Begriffe Upcycling und Downcycling benutzt.

Upcycling kann definiert werden, dass aus einem alten Produkt oder einem Sekundärrohstoff durch Ideenreichtum ein neues-, höherwertiges‘ Produkt hergestellt werden kann. Aus Plastikverpackun-

⁵³ Hsg. Umweltbundesamt / CONVERSIO Market & Strategy(2019), S. 4

gen können zum Beispiel Taschen oder aus kleinen Plastikteilen kann Schmuck hergestellt werden. Im Gegensatz dazu wird beim Downcycling die Qualität eines Produktes während seiner Wiederverwertung ‚schlechter‘. Ein Beispiel hierzu: Mit dem gewonnenen Granulat aus dem PET-Flaschen- Recycling-Prozess lassen sich minderwertige Spielzeuge produzieren.

Es zeigt sich, dass Kunststoffe nicht nur vielfältig einsetzbar sind, sondern sie können auch nach dem Gebrauchsende in einem neuen Produkt aus Kunststoff wiederverwertet werden.

8 Zusammenfassung

Plastikprodukte aus Kunststoffen sind überall zu finden und kaum noch aus unserem alltäglichen Leben wegzudenken. Die Vorteile der Plastikprodukte sind hinreichend bekannt, über kostengünstige Herstellung bis hin zu ihren flexiblen Einsatzmöglichkeiten. Plastik wird genutzt in lebensrettenden Geräten in der Medizintechnik, Bekleidung, Kosmetik und Spielzeug, sowie für Geräte der industriellen und landwirtschaftlichen Produktion. Bekannt ist auch, welches Risiko die Plastikprodukte nach ihrem Endgebrauch, wenn sie als Plastikmüll, in der Umwelt, in den Weltmeeren oder auf den Deponien landen, darstellen. Besonders die folgenreiche Belastung der Meere mit Plastikmüll und Mikroplastik sind Gegenstand des Themas dieser Arbeit **„Plastikmüll und Mikroplastik – Ballast für die Meere“**.

Der enorme Eintrag von Plastikmüll und Mikroplastik in die Ozeane hat folgenschwere Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme und auf die in ihnen lebenden Meerestiere. Viele Seevögel und Meeressäuger verheddern sich in den im Meer treibenden Fischnetzen, Tauen und Seilen. Die Tiere strangulieren sich und ersticken daran. Außerdem verwechseln die Meeresbewohner Mikroplastik mit Plankton, welches ein Teil ihrer Grundernährung bildet. Das Plankton steht am Anfang der marinen Nahrungskette und ist deshalb von besonderer Bedeutung für den Fortbestand der Meerestiere.

Durch die Aufnahme von Plastikteilchen können für die Meerestiere lebensbedrohliche Lagen entstehen. Die betroffenen Tiere können mit vollem Magen verhungern oder an inneren Verletzungen verenden. Zudem verwechseln Meeresschildkröten z. B. Plastiktüten mit Quallen, von denen sie sich sonst ernähren, und können ebenso daran sterben. Ein weiteres Problem ist, dass sich das Plastik in Mikroplastik zersetzt und in die Nahrungskette gelangt. Es findet sich in Muscheln, Fischen und anderen Meerestieren. Somit kann das Mikroplastik letztendlich wieder in die menschliche Nahrung gelangen. Im menschlichen Körper kann es dann zu Reaktionen kommen, die Auswirkungen auf das Immunsystem oder auf die Reproduktionsfähigkeit haben.

Forschungsergebnisse wiesen darauf hin, dass zwar der Plastikmüll und das Mikroplastik die Versauerung der Ozeane verstärken kann, tragen aber nur zu einem sehr geringen Maße dazu bei, dass der pH-Wert als Indikator der Versauerung sich verändert. Ähnlich ist es bei der Erwärmung der

Wassermassen durch den CO₂-Anstieg in der Atmosphäre. Falls die Ozeane auf Grund von chemischen Reaktionen eine CO₂-Sättigung durch den Plastikmüll erfahren, kann möglicherweise kein weiteres CO₂ aus der Luft durch die Ozeane aufgenommen werden. In diesem Fall wäre die ‚CO₂-Senke Ozean‘, welche für das Klima auf der Erde von Bedeutung ist, nicht in der bisherigen Form verfügbar. Somit würde die Erderwärmung weiter fortschreiten.

Der Treibhauseffekt entsteht, wenn energiereiche, kurzwellige Sonnenstrahlung (UV-Strahlung) auf die Erdoberfläche trifft und diese erwärmt. Die Erdoberfläche gibt ihrerseits eine langwellige Wärmestrahlung (IR-Strahlung) in die Atmosphäre ab. In den obersten Luftschichten stößt diese Infrarotstrahlung unter anderem auf die CO₂-Schicht, welche sich in der Atmosphäre auf Grund des anthropogenen CO₂-Ausstoßes bildet. In Folge behindert diese Schicht die Wärmeabstrahlung und lässt weniger IR-Strahlung von der Erde in das All hinaus diffundieren und reflektiert die Strahlung zur Erde. Was wiederum das Ansteigen der Erdtemperatur zur Folge hat. Schließlich, je dichter die CO₂-Schicht in der Atmosphäre ist, desto stärker erwärmt sich die Erde.

Der Plastikmüll und das Mikroplastik in den Meeren sind nicht die hauptsächlichen Verursacher für die Versauerung der Meere und den Klimawandel. Sie können aber auf Dauer einen Verstärkungsgrad erreichen, der bewirkt, dass die zuvor beschriebenen Phänomene Versauerung und Klimawandel beeinflusst werden.

Die in dieser Arbeit zitierten Studien beschreiben Veränderungen in den marinen Ökosystemen und den Folgen für die Lebewesen auf dem Planet Erde. Insbesondere haben die Ansammlungen von Plastikmüll, in Form der in den Ozean schwimmenden ‚Plastikinseln‘, weitreichende Folgen für die Meeresbewohner und den Fortbestand ihrer Art. Einige Arten (z. B. Quallen, Tintenfische oder Seesterne) können die Veränderungen in ihrer Umwelt, speziell die Erhöhung der Wassertemperatur, zu ihrem Vorteil nutzen, während andere Arten zum Aussterben verurteilt sind.

Ein weiterer Punkt ist, dass ein Teil des angesammelten Plastikmülls, welcher an der Peripherie der Plastikinsel anhaftet, sich aus der kreisenden Bewegung lösen kann und an den Küsten und Stränden anlandet und sie verschmutzt.

Es kann festgehalten werden, dass der Plastikmüll und das Mikroplastik, mit den benannten und verstärkenden Auswirkungen für unsere Umwelt, die Meere mit ihren Ökosystemen und Meeresbewohnern aller Art zwar stark belasten, aber in den Punkten ‚**Versauerung der Ozeane**‘ und ‚**Klimawandel**‘ keinen signifikanten Effekt haben.

Trotz allem sind Politik, Wirtschaft und wir als Endverbraucher gefordert, Wege und Maßnahmen zu finden, um die Plastikflut einzudämmen.

Nun, was ist zu tun, um der Belastung der Weltmeere entgegenzuwirken? Es könnten z.B. die folgenden Punkte Berücksichtigung finden:

- ❖ überflüssige Verpackungen (z.B. extra Folien für Obst, Gemüse oder Blister-Schachteln für Kleinbatterien oder Rasierklingen) sind zu vermeiden
- ❖ Verpackungen und andere Produkte umweltfreundlicher gestalten
- ❖ Recycling stärken, mehr Recyclate einsetzen
- ❖ Vermeidung von Kunststoffen in Bioabfällen
- ❖ Internationales Engagement gegen Plastikmüll

Weitere Möglichkeiten wären nach Mark Lenz vom GEOMAR,

- ❖ *„Verbesserung des Müllmanagements und eine stärkere Kontrolle der Müllströme*
- ❖ *Bewusstsein schärfen, Bildung und Forschung zum Thema fördern*
- ❖ *Strände säubern*
- ❖ *Reduzierung des Einsatzes von Mikroplastikpartikeln*
- ❖ *Einsatz von Tuchfiltern in Kläranlagen*⁵⁴

Als ungeeignet scheinen die Maßnahmen wie das Abfischen von Plastikmüll auf offener See mit großen Netzen wie mit dem sog. Clean Ocean Project. Bei diesem Projekt gab es im Betrieb auf hoher See große Schwierigkeiten beim Einfangen des Kunststoffes. Es wurde berichtet, dass zwar die Plastikteile in das U-förmige System hereingeflossen seien, aber durch Wellen, Wind und Meeresströmungen geradewegs wieder herausgetrieben wurden.

Abschließend: Wenn die modernen Gesellschaften, die Industrieländer, weiterhin uneingeschränkt Plastikprodukte produzieren und den Plastikmüll ungehindert so entsorgen wie es zuletzt praktiziert wird, dann werden in Zukunft mehr Plastikteile im Meer schwimmen als Fische. Im Interesse einer Schonung unserer Umwelt und zur Vermeidung von Müll jeglicher Art, besonders der des Plastikmülls, sind internationale Regelungen und Maßnahmen gemeinsam zu erlassen und durchzuführen.

Es ist nochmals hervorzuheben, dass die Hauptverursacher des Eintrags von Plastikmüll in die Gewässer nicht die Industrieländer sind, sondern die Staaten in Asien, besonders Indien und China. In diesen Ländern wird der importierte Plastikmüll, mangels entsprechender Infrastruktur, nicht fach- und sachgerecht entsorgt.

In den betroffenen Ländern kommt es darauf an, dass die Menschen durch gezielte Aufklärungsaktionen (Methoden der Plastikmüllentsorgung) und Vorstellung konkreter-Projekte, z.B. dem Bau von Recyclinganlagen, an die Ziele einer sachgerechten Entsorgung des Plastikmüll herangeführt

⁵⁴ Dr. rer. nat. Mark Lenz(2016), S. 21

werden. Die Maßnahmen könnten mit einer Finanzierung durch die Industrieländer initiiert und forciert werden. Parallel dazu müsste die Politik in diesen Ländern durch entsprechende Gesetzgebung diese Maßnahmen unterstützen.

Die Vereinten Nationen haben mit der Entwicklungsagenda 2030, den SDG 1-17 Zielen, einen Rahmen für eine globale, nachhaltige Leitidee entwickelt, die für die wirtschaftliche, soziale und ökologische Transformation zum nachhaltigen Wirtschaften und Handeln der Weltgemeinschaft steht.

Die internationale Staatengemeinschaft will mit den folgenden Maßnahmen gegen die Plastikverschmutzung vorgehen:

- ❖ Der vollständige Lebenszyklus von Plastik soll untersucht werden und zwar von der Herstellung über Gebrauch, Entsorgung und Wiederverwendung
- ❖ Festlegung von Höchstgrenzen und verbindliche Maßnahmen gegen Plastikmüll an Land und im Meer
- ❖ Kontroll- und Hilfsmaßnahmen für ärmere Länder

Inwieweit die genannten Maßnahmen ganz oder nur teilweise ergriffen und durchgeführt werden, wird die Zukunft zeigen. Sie mögen zwar nicht ausreichend sein, zumindest lassen die angekündigten Maßnahmen erkennen, dass der Gesetzgeber das Problem der Plastikverschmutzung erkannt hat. Entscheidend für den Erfolg wird sein, dass sich die Hauptverursacher der Plastikverschmutzung in Asien (Indien und China) an der Lösung des Problems beteiligen.

Mit dem beabsichtigten globalen Plastikabkommen, vorbereitet durch die UNO Umweltversammlung (UNEA) Anfang des Jahres 2022 in Nairobi, haben sich die UNO dem Thema Plastikmüll angenommen. Das Problem der Plastikverschmutzung ist schließlich nur weltweit zu lösen und gehört, ähnlich wie der Weltklimarat (IPCC) für das Klima, unter die Obhut der UNO.

9 Literaturverzeichnis

- Anja Krieger (2018): Klimawandel. Plastikmüll im Meer verursacht Treibhausgase 2018, URL: <https://www.deutschlandfunk.de/klimawandel-plastikmuell-im-meer-ve>.
- Arne Perras und Vivien Timmler (2019a): Deutscher Plastikmüll verschmutzt Malaysia, URL: [sueddeutsche.de](https://www.sueddeutsche.de).
- Arne Perras und Vivien Timmler (2019b): Vermülltes Idyll, URL: <https://www.sueddeutsche.de/projekte/artikel/wirtschaft/deutscher-plastikmuell-verschmutzt-malaysia-e590969/>.
- Autoren der Wikimedia-Projekte (2022): Versauerung der Meere, URL: de.wikipedia.org, 12.04.2022.
- BUND-Heinrich Böll Stiftung (2019): Plastikatlas 2019 -Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff, Berlin 2019.
- Callum Roberts (2013): Der Mensch und das Meer. Warum der größte Lebensraum der Erde in Gefahr ist, 1, München 2013.
- Dr. Kim Cornelius Detloff et al. (2016): Müllkippe Meer -Wege aus der Plastikflut-, Berlin 2016.
- Dr. rer. nat. Manfred Schroeder (2020): Nachhaltigkeit, Herausforderungen und Lösungen in einer globalen Welt -Vorlesung U3L 15.12.2020.
- Dr. rer. nat. Mark Lenz (2016): Plastik im Meer – Versuch einer Übersicht, Hermann-Ehlers-Akademie 30.11.2016.
- Dr.-Ing. Joachim Harder: Plastikmüll im Meer – Auswirkungen und Lösungsstrategien, in: , Heft 03/2018, URL: www.recovery-worldwide.com/de/artikel/plastikmuell-im-meer-auswirkungen-und-loesungsstrategien_3187754.html.
- Erich Fromm (1976): Haben oder Sein: Die seelischen Grundlagen einer neuen Gesellschaft, Darmstadt 1976, URL: <https://www.getabstract.com/de/zusammenfassung/hab>.
- Felix Müller et al. (2020): Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft, Dessau-Roßlau 2020, URL: www.umweltbundesamt.de/publikationen.
- Gruber N et al. (2019): Marine Senke für menschengemachtes CO2 bestimmt 2019, URL: <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2019/03/marine-senke-fuer-co2-bestimmt.html>, 03.06.2022.
- Günter Mitlacher / Thomas Köberich (2018): © World Wide Fund For Nature (WWF), Living Planet Report 2018: Kurzfassung Planet Living Report, Gland / Switzerland 2018, URL: https://www.wwf.de/fileadmin/user_upload/living-planet-report/2018/WWF_Living_Planet_Report_Kurzfassung.pdf.
- Hannah Gould (2016): From oil use to ocean pollution: five facts about the plastics industry, in: 2016, S. 1, URL: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2>.
- Hrsg. Redaktion EnergieLeben (2018): Plastikmüll aus den USA - EnergieLeben, in: 04.12.2018, S. 1–4, URL: energieleben.at, 11.03.2022.
- Hrsg. Ulrich Bähr (2017): Meeresatlas -Daten und Fakten über unseren Umgang mit dem Ozean, Kiel 2017, URL: www.meeresatlas.org.
- Hrsg. Verbraucherzentrale NRW und Bayern (2021): Einwegplastikverbot in der EU: Das sind die Alternativen, Essen 2021.
- Hrsg. Wikipedia Autoren (2022a): Methan – Klimawandel, URL: wiki.bildungsserver.de, 12.04.2022.
- Hrsg. Wikipedia Autoren: Corioliskraft, URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Corioliskraft>.

- Hrsg. World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company (2016): The New Plastics Economy — Rethinking the future of plastics 2016, URL: <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>.
- Hsg. BVE (2021): 10 Alternativen für Plastik- Verpackungen, URL: BVE-online.de.
- Hsg. Umweltbundesamt / CONVERSIO Market & Strategy (2019): Kunststoffabfälle, URL: umweltbundesamt.de, 25.02.2022.
- Jennifer Timrott (2015): Strandgut aus Plastik. und anderer Meeresmüll, 1, Kiel / Hamburg 2015.
- Jorge Alayo (2019): Plastikinseln & Plastikstrudel: Müll im Meer, URL: <https://sinplastic.com/plastikinseln/>.
- Jürgen Bertling, Ralf Bertling, Leandra Hamann et al. (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie, Oberhausen 2018, URL: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/publikationen/2018/kunststoff-offe-id-umwelt-konsortialstudie-mikroplastik.pdf>.
- Kai Pohlmann (2016): Mikroplastik: Probleme für die Nahrungskette. Ein UNEP Report warnt., Hamburg 2016, URL: meeresstiftung.de, 16.12.2021.
- Klaus Gebhardt (2022): Das Umweltlexikon, URL: umweltdatenbank.de, 18.01.2022.
- Laurent C.M. Lebreton et al. (2016): River plastic emissions to the world's oceans, URL: www.nature.com/naturecommunications.
- Marcus Eriksen et al. (2014): Plastic Pollution in the Worlds Oceans. More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea, URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0111913>.
- Melanie Bergmann, France Collard et al. (2022): Plastic pollution in the Arctic, URL: green-wire.greenpeace.de.
- Mojib Latif (2014): Das Ende der Ozeane. Warum wir ohne Meere nicht überleben werden, Freiburg im Breisgau 2014.
- Sarah-Jeanne Royer et al. (2018): Production of methane and ethylene from plastic in the environment 2018, URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200574>.
- Stefanie Werner (2010): Abfälle im Meer. Ein gravierendes, ökologisches, ökonomisches und ästhetisches Problem. Zur Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie, Dessau-Roßlau 2010.
- Stothra Bhashyam, S., Nash, R., Deegan, M., Pagter, E., Frias., J. (2021): Microplastics in the marine environment: sources, impacts and recommendations., Galway-Mayo Ireland 2021, URL: <http://research.thea.ie/handle/20.500.12065/3593>.
- Sybille Müller (2021): Mikroplastik im Meer. Eine Gefahr für die Gesundheit, URL: <https://www.zentrum-der-gesundheit.de/bibliothek/umwelt/plastik/mikroplastik>.
- Tagesspiegel (2022): Plastikmüll: Lemke will Müllexport durchsetzen 2022, URL: Tagesschau.de.
- Thomas Seilnacht (2021): Naturwissenschaften Unterrichten. Definitionen und Einteilungen, URL: https://www.seilnacht.com/Lexikon/k_eint.html.
- Tina Baier Süddeutsche Zeitung (2021): Plastikmüll beschleunigt Klimawandel und Artenschwund, URL: sueddeutsche.de.
- UNEP (2017): Frontiers 2017-Emerging issues of Environmental Concern, Nairobi 2017.
- Wikipedia Autoren (2022a): Cradle to Cradle, URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Cradle_to_Cradle.

Wikipedia Autoren (2022): Kunststoff, URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Kunststoff.html>, 06.01.2022.

Wikipedia Autoren (2022b): Kreislaufwirtschaft, URL: de.wikipedia.org, 16.02.2022.

Wikipedia Autoren (2022c): Albedo, URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Albedo>.

Wilfried Knoch (1994): Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Abfallentsorgung. Chemische und analytische Grundlagen, 2. aktualisiert, Weinheim 1994.