

Studienarbeit

Am

Lehrstuhl für Kreislaufwirtschaft
Professor Dr. Christian Abendroth

Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Fakultät 2
Institut für Umwelt und Naturwissenschaften

Prozesse der Wiederverwertung von Plastik und deren Effizienz

Grundzüge des Umweltingenieurwesens
7. Semester

Verfasser

Name: Alexander Hübner
Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen
Fachsemester: 7. Semester
E-Mail: huebnale@b-tu.de
DOI: 10.26127/BTUOpen-6213

Betreuer

Prof. Dr. Christian Abendroth

Cottbus, 14.01.2023

Inhalt

1. Abstract.....	1
2. Einleitung.....	2
3. Material und Methoden.....	2
4. Bibliografische Analyse.....	4
5. Plastik als Rohstoff.....	6
6. Die Methoden des Recyclings.....	8
6.1 Mechanisches Recycling und Vorprozesse.....	8
6.2 Chemisches und thermochemisches Recycling.....	9
7. Effizienz ausgewählter Methoden.....	11
8. Fazit.....	12
9. Quellenverzeichnis.....	14

1. Abstract

Aufgrund einer weltweit geringen Recyclingquote der Kunststoffe von 9% und Belastung von Luft, Wasser und Boden, ist es notwendig das Recycling und alles darum zu optimieren. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es unterschiedliche Methoden des Recyclings und Prozesse vor dem Recycling, wie die Sortierung und Reinigung zu analysieren und in Bezug auf ihre Effizienz zu bewerten. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde das Sortierverfahren der Flotationstrennung mit diversen Ausgangsstoffen genauer untersucht. Hier beweisen experimentelle Ergebnisse eine maximale Rückgewinnungsrate von 99,65%. Zudem wurde auch die beste sensorgestützte Sortiermethode im Zusammenhang der verwendeten Literatur genannt. Dieser Mechanismus nennt sich VIP-Scores-Verfahren. Zur Thematik Reinigung von kontaminierten Kunststoffen gibt es ein neuartiges Verfahren zur wasserlosen Reinigung mit Flusssand. Diese Methodik erlaubt eine Reinigungsrate von bis zu 94% bei einer mittleren Partikelgröße. Dazu geht diese Arbeit auf Verfahren des mechanischen, chemisch und thermischen Recyclings ein. Der Prozess des mechanischen Recyclings kann nahezu unendlich oft durchlaufen werden. Jedoch müssen für die Durchführung dieser Prozess einige Bedingungen erfüllt sein. Das thermochemische Verfahren der hydrothermalen Verflüssigung bietet dagegen Möglichkeiten auch gemischte Kunststoffe zu verarbeiten. Des Weiteren ist das Upcycling von Kunststoffen mittels enzymatischer Depolymerisation möglich. Der Stand der Forschung dieser Arbeit beschränkt sich auf den Zeitraum 01.01.2020- 14.11.2022

2. Einleitung

Kunststoff hat in der heutigen Gesellschaft einen besonders großen Stellenwert. Allein in Deutschland fallen neuer Forschung zufolge pro Jahr 39,7 kg Plastikverpackungsabfall je Einwohner an (Statista 2022). Doch nicht nur in der Verpackungsindustrie bekommen immer mehr Kunststoffe ihre Bedeutung. Auch in vielen anderen Sektoren, welche eine stark ausgeprägte aktuelle ökonomische Relevanz besitzen, ist die Verwendung von Kunststoffen aus technologischen Gründen nicht weg zu denken (Kökkılıç et al., 2022). Ein gutes Beispiel dafür stellen Technologien wie Windkraft, Wasserkraft und Photovoltaik dar, welche ohne den Einsatz von Kunststoffen praktisch unmöglich sind. Der Kunststoff ist hier in Kollektoren und in Bauteilen verarbeitet, welche starken Bewegungen ausgesetzt sind. Unter anderem sind Bauteile dieser Art für die Bewegung von Turbinen notwendig. Auch bei der Wärmedämmung führt der Einsatz zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und sogar in mancher Hinsicht zur Energieeinsparung. (Reis 2020b) Der am meisten verwendete Kunststoff ist Polyethylenterephthalat (PET), welcher zu 97 % seiner produzierten Menge zu Abfall wird. Hier kommt auch der ökologische Aspekt ins Spiel. PET ist ein kurzlebiger Kunststoff und kommt hauptsächlich als Verpackungsmaterial zum Einsatz. Dazu kommt, dass PET und auch die meisten anderen Kunststoffe einem sehr langsamen biologischen Abbauprozess ausgesetzt sind. (Geyer et al., 2017, Fehér et al., 2022). Zu vielen positiven Aspekten von Kunststoffen gibt es auch Negative. Einer der größten Probleme ist die mit Kunststoff verbundene Belastung unserer Ökosysteme und Ozeane (Hu et al., 2022). Jedes Jahr werden mehr als 8 Millionen Tonnen Plastikmüll in die Weltmeere geworfen, was schädliche Wechselwirkungen mit den Ökosystemen der Meere mit sich bringt. Mittlerweile existiert im Nordpazifik eine Müllgrube, welche 2-mal so groß wie Texas ist. (Moreno-Sierra et al., 2020) Aufgrund dieser schwerwiegenden Folgen für Mensch und Umwelt muss der gesamte Prozess von der Herstellung des Kunststoffes bis zum Recycling jeglicher Formen optimiert werden

3. Material und Methoden

Die Auswahl der passenden Literatur für diesen Review-Artikel ist durch systematisches Eingrenzen der Suchergebnisse erfolgt. Recherchiert wurde über die Datenbank *Web of Science*. Der Startpunkt dieser Literaturrecherche ist der 14.11.2022, jeder Artikel über diesen Zeitpunkt hinaus, ist kein Teil der Literatur, mit der sich diese Arbeit auseinandersetzt. Für die primäre Recherche wurden die Suchbegriffe "*plastic recycling*" und *efficient* verwendet, wobei beide Begriffe mit einer *and* Verknüpfung angegeben wurden. Das Ergebnis belief sich auf 82 Artikel. Die Eingrenzung der Literatur wurde im Rahmen einer Empfehlung auf maxi-

mal 40 Artikel limitiert. Um nun die Zahl der Ergebnisse weiter einzugrenzen, wurde das Zeitintervall für die Publikationen auf 2020-2022 beschränkt, was zu einer Anzahl von 52 publizierten Artikeln führte. Folglich wurden die Review-Artikel eliminiert, worauf hin 35 von 52 Artikeln übriggeblieben sind. Durch genauere Betrachtung der Artikel wurden final 23 relevante Veröffentlichungen ausgewählt, welche in dieser Arbeit untersucht wurden. Dieser Prozess wurde unter Verwendung eines Flussdiagramms in Abbildung 1 dargestellt.

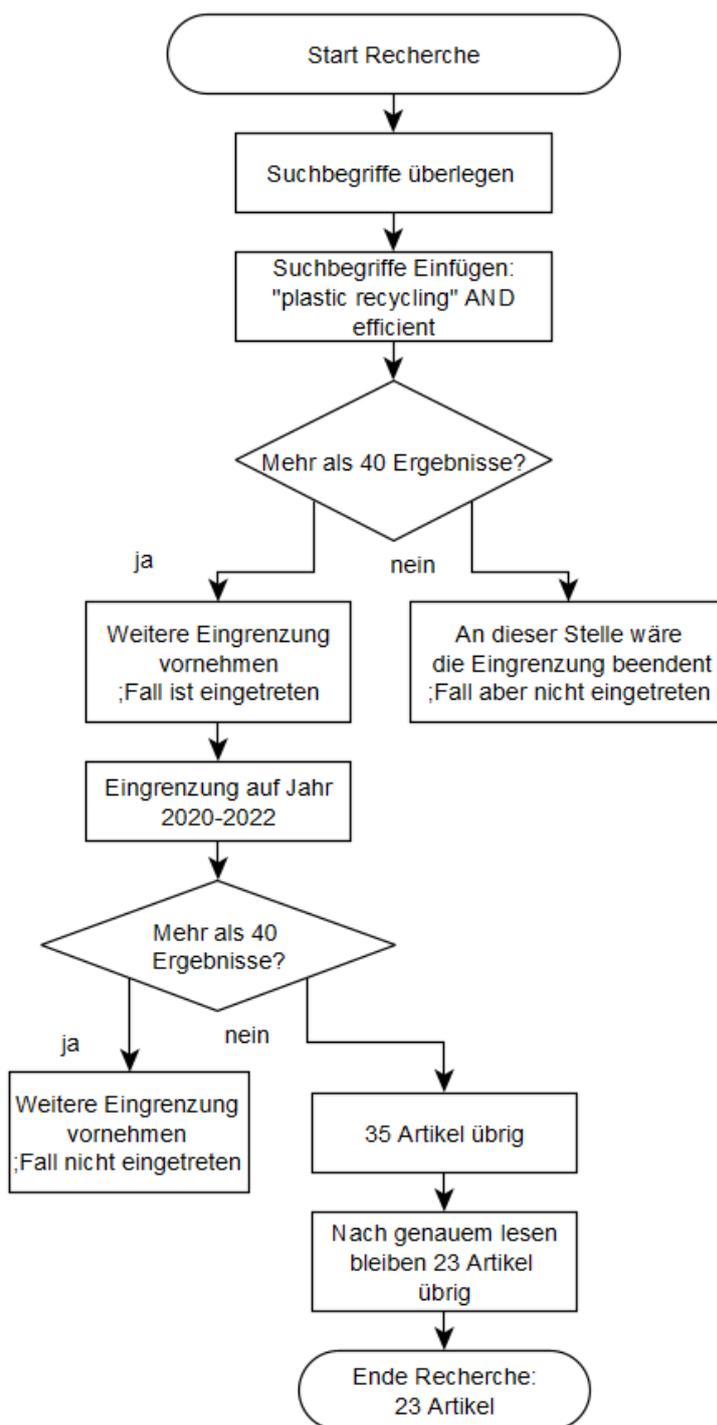


Abbildung 1 Verfahren zur Literatureingrenzung

4. Bibliografische Analyse

Systematische Literaturanalyse

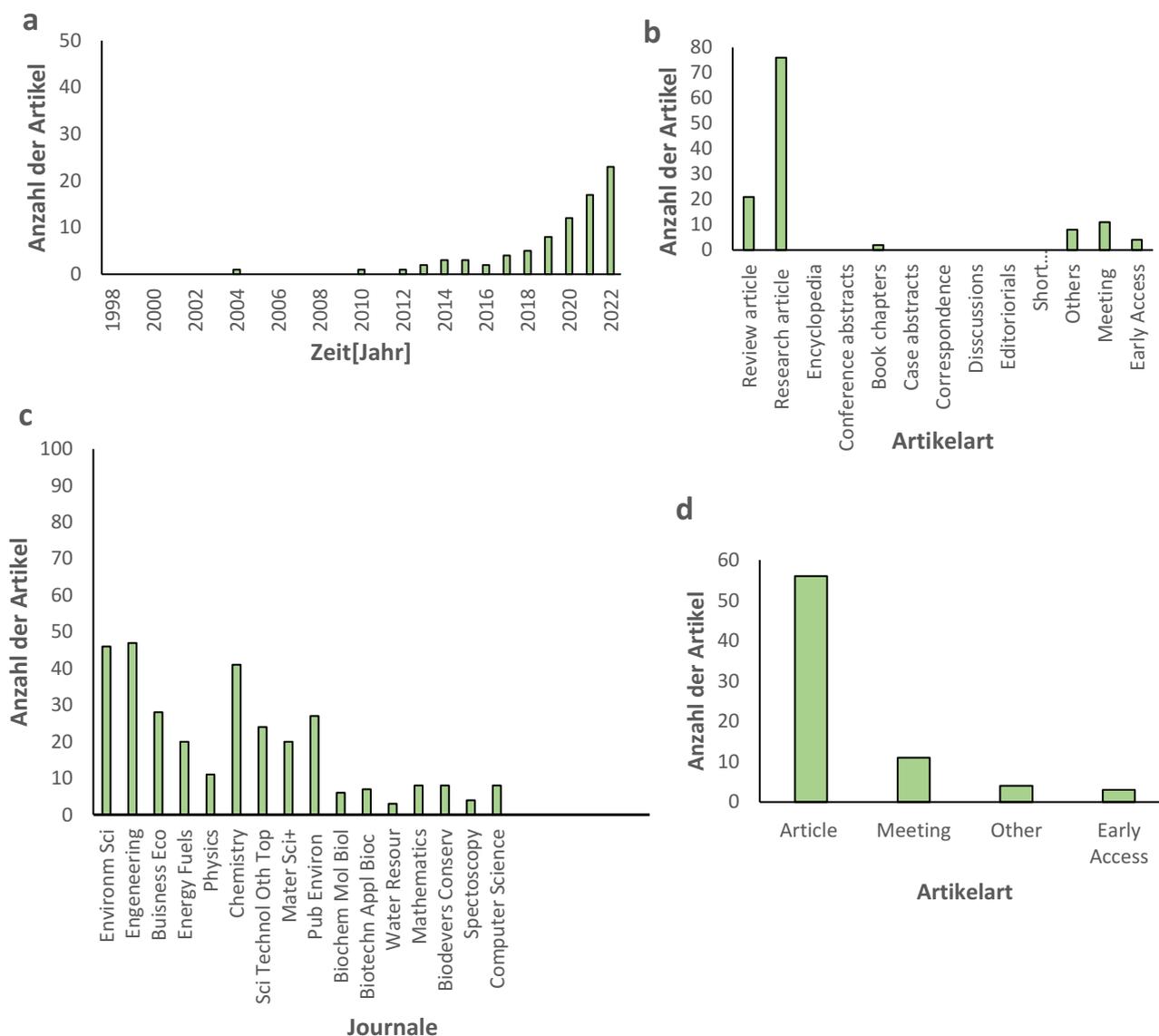


Abbildung 1: a) Anzahl Publikationen von 1998-2022, b) Anzahl Artikel pro Artikeltyp, c) Artikelanzahl pro Journal, d) Anzahl Publikationen von 1998-2022 ohne Review-Artikel

In den dargelegten Abbildungen werden schematisch, mit Hilfe von Diagrammen, die Ergebnisse der präventiven und dezimierten Literaturrecherche für den Zeitraum 01.01.1998-14.11.2022 dargestellt. Die Abbildung a ist definiert durch die x-Achse, welche die Veröffentlichungsjahre abbildet und die y-Achse, welche wiederum die Anzahl der veröffentlichten Artikel darstellt. Deutlich zu erkennen ist hier, dass im Jahre 1998-2012 keine, bis kaum For-

schung in diesem Gebiet betrieben wurde. Ab 2013 steigt dann die Anzahl der Veröffentlichung, was zeigt, dass dieser Thematik mehr an Popularität gewinnt. Von 2013-2016 werden jährlich neue Artikel publiziert. Dennoch ist anhand der Anzahl zu erkennen, dass das Thema Recycling noch kein überaus stark erforschtes Gebiet ist. In den weiterführenden Jahren wird deutlich, dass der Trend der veröffentlichten Artikel pro Jahr stetig steigt, wodurch das Interesse und die Notwendigkeit der Forschung in dieser Thematik im Laufe der Zeit unterstrichen wird. Das Diagramm b bekommt seine Bedeutung, durch die Abszisse, welche für die Kategorie der Artikel steht und die Ordinate, welche als die Anzahl der Artikel definiert ist. Das abgebildete Ergebnis ist durch das Zeitintervall von 1998-2022 begrenzt, wobei die letzte Recherche im Jahr 2022 am 14.11.2022 stattgefunden hat. Wie hier gut zu erkennen ist, teilt sich ein Großteil der gesamten Rechercheergebnisse auf zwei Kategorien auf, worunter zum einen der Artikel mit einer Anzahl von 76 Stück und zum anderen, der Review Artikel mit 21 Ergebnissen zählt, dazu muss aber gesagt sein, dass die Review Artikel sich aber auch in anderen Kategorien wiederfinden. Die anderen Kategorien weisen eine weniger bis keine Häufigkeit auf. In Diagramm c sind Journals abgebildet, welche mit den verwendeten Suchbegriffen am meisten vertreten sind. Die drei häufigsten Journale sind Environmental Science, Engineering und Chemistry. Diagramm d spiegelt die gleiche Suche, wie Diagramm b wider, der Unterschied liegt darin, dass die Review Artikel eliminiert wurden. Grafisch wird hier sehr gut gezeigt, dass die Review Artikel bei Diagramm b noch in den Artikeln und in anderen Kategorien mit beinhaltet waren. Trotz dem sind die Artikel immer noch die Kategorie mit der meisten Anzahl

5. Plastik als Rohstoff

Plastik ist ein Rohstoff mit einer Vielzahl an Verwendungsmöglichkeiten. Auch Kunststoffe in recycelter Form besitzen eine hohe Belastbarkeit gegenüber sämtlichen Wetterbedingungen. Aufgrund dieser Merkmale finden diese auch im Bauwesen ihren Einsatz. (Moreno-Sierra et al., 2020). Einer der am meisten verwendeten Kunststoffe ist PET (Fernandes, 2021). Aufgrund der vielseitigen Anwendung trägt Kunststoff weltweit mit einem Prozentsatz von 15-40 % zur Füllung der Deponien bei, was einen hohen Anteil darstellt (Geng et al., 2022). Weltweit betrachtet werden nur 9% aller Kunststoffe recycelt und der übrige Teil wird verbrannt oder landet in der Umwelt und verschmutzt dort Boden, Luft und Grundwasser (Han et al., 2022). Das allgemeine Problem bei Kunststoffen ist hierbei auch, dass Kunststoffe ein komplexes Abauverhalten besitzen und somit für sehr lange Zeit in der Natur verweilen (Khadke et al., 2021). Aus diesem Grund ist es von hoher Bedeutung, Lösungen für die Wiederverwendung von Kunststoff zu finden (Moreno-Sierra et al., 2020). Einen großen Beitrag zur Verschmutzung und Gefährdung tragen auch gefährliche Stoffe, wie Chlor und Bisphenol A bei, welche aus Kunststoffen, wie PVC und PC hervorgehen (Jiang et al., 2021). Neben den herkömmlichen Kunststoffen finden auch immer mehr Biokunststoffe ihre Anwendung, welche die Eigenschaft besitzen, unter bestimmten Bedingungen vollständig zersetzt werden zu können (Oh et al., 2022) In folgender Tabelle sind die wichtigsten Kunststoffe und deren Verwendung abgebildet.

Tabelle 1: Kunststoffarten und ihre Verwendung

Polymer	Anwendung
PET (Polyethylenterephthalat)	Verpackungsmaterial verwendet bzw. Verpackungsfolien und Streifen, PET-Flaschen, Medikamentenbehälter, Röntgen und Fotofilme usw.
HDPE (Polyethylen hoher Dichte)	Milch und Waschmittelverpackungen, Blasgeformte Getränkeverpackungen, Rohr und Verarbeitungsgeräte, kunststoffgebundener Sand usw.
PVC (Polyvinylchlorid)	Flaschen, Rohre, Kabel, Draht, Kabelisolierung, Fens- tereinfassungen, Wand, Boden und Dachverkleidung usw.
LDPE (Polyethylen niedriger Dichte)	Beschichtete Papiere, Müllsäcke, Drahtummantelung, Kabelummantelung, kunststoffgebundener Sand usw.
PP (Polypropylen)	Joghurt und Margarinebehälter, Medizinflaschen, Sprit- zen, Becher, Trinkhalme, elektrische Geräte
PC (Polycarbonat)	Telekommunikation und Elektrohardware
PS (Polysterol)	Einweggeschirr, Becher aus Schaumstoff, Eierkartons, Schaumstoffisolierung usw.
ABS (Acrylnitril-Butadien- Styrol)	Abfluss und Entlüftungssysteme, Musikinstrumente, Te- lefonkomponenten, Computergehäuse, gemischt mit anderen Kunststoffarten zur Verbesserung Physikali- scher und chemischer Eigenschaften
PCL (Polycaprolacton)	Biologisch abbaubarer Kunststoff, Verpackungsmaterial, Medizintechnik

Quelle: (Fernandes, 2021; Kökkılıç et al., 2022; Kumi-Larbi Jnr et al., 2022; Oh et al., 2022; Wei et al., 2022)

6. Die Methoden des Recyclings

Der Prozess des Recyclings lässt sich in 3 Arten eingrenzen, das mechanische, das chemische und die Verbrennung bzw. das Recyclingverfahren durch Energierückgewinnung (Moreno-Sierra et al., 2020). In diesem Kapitel wird spezifisch auf 2 dieser Arten eingegangen.

6.1 Mechanisches Recycling und Vorprozesse

Direktes oder auch mechanisches Recycling läuft vonstatten, indem Polymermaterial zerkleinert, gewaschen und extrudiert wird. Dadurch entstehen dann Kunststoffgranulate, die wiederum mit Hilfe von Wärme in andere Teile umgewandelt werden können (Moreno-Sierra et al., 2020). Das mechanische Recycling wird auch als *Closed-Loop-Recycling* bezeichnet und bekommt seinen Namen durch die Eigenschaft, einer nahezu endlosen Möglichkeit zum Recyceln und somit am Ende dieselben Produkte wieder zu erhalten. Trotzdem erleiden Kunststoffe nach wiederholten Abläufen an einem Grad des Abbaus (Kökkılıç et al., 2022). Das ist auch der Grund dafür, warum das mechanische Recycling in der Regel zu einem Downcycling führt (Lu et al., 2022). Um dieses Verfahren durchzuführen, setzt das mechanische Recycling vorliegende Sortenreinheit voraus und der Kunststoff darf nur in einem geringen Maß kontaminiert sein. Um Sortenreinheit zu gewährleisten, müssen Verfahren zur Trennung möglichst effizient und genau sein (Maisel et al., 2020). Ein mögliches Verfahren ist die Flotationstrennung. Neu ist eine Methode der Flotationstrennung mit einer, durch Chlordioxid (ClO_2) behandelten, modifizierten Oberfläche. Diese Methode wurde mit Hilfe sämtlicher Tests ausschließlich für die Flotationstrennung von Polyvinylchlorid (PVC) und Polycarbonat (PV) analysiert. Einer dieser Tests ist die Kontaktwinkelmessung, welche zeigte, dass die PC-Oberfläche nach der Behandlung mit ClO_2 hydrophil wird. Das Ergebnis dieser Methode ist eine optimale Rückgewinnung und Reinheit von 97% bei PC und mit der Modifizierung sogar 99%. (Zhang et al., 2020). Ähnlich ist ein weiteres Verfahren zur Flotationstrennung, diesmal aber zur Trennung von PVC und PC. Hier wird $\text{Al}(\text{OH})_3$ mithilfe einer Ultraschallbehandlung, als Beschichtung genutzt. Aufgrund seiner starken Affinität zu PVC wird die Mikrokunststoffoberfläche selektiv beschichtet, was dazu führt, dass der Kontaktwinkel aufgrund von der vielen vorhandenen Hydroxylgruppen bei $\text{Al}(\text{OH})_3$ um 24 Grad abnimmt. PC blieb dagegen hydrophob. Bei diesem Versuch zeigen Ergebnisse eine optimale Reinheit von 99,65%. Schlussendlich ist das Ergebnis im Prozess der Flotationstrennung ein schwimmendes Produkt PC und ein sinkendes Produkt PVC. (Jiang et al., 2021) Wie hier gut zu erkennen ist, gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten, um die Flotationstrennung durchzu-

führen. All diese Verfahren basieren darauf, einen der zu trennenden Stoffe hydrophil zu machen, während der andere hydrophob bleibt. Das zeigt auch ein weiteres Verfahren, welches sich als Oberflächenalkoxylierungsvorbehandlung (SAP) betitelt, was eine gute Möglichkeit zur Trennung von Gemischen aus PS und PC darstellt und unter optimalen Bedingungen eine Abscheideleistung von 99,34% erreicht. (Du et al., 2020) Anders als die Flotationstrennung ist die Sensorgestützte Sortierung, worunter auch die *Variable Importance in Projection* bzw. *VIP-Scores* Methode zählt und durch den hohen Grad an Effizienz einen leistungsfähigen Ansatz für sensorbasierte Online-Sortierung darstellt (Bonifazi et al., 2022). Wenn diese Sorten Reinheit nicht gewährleistet werden kann, dann wird es beim mechanischen Recycling nahezu unmöglich Kunststoffmischungen wiederzuverwerten (Lu et al., 2022). Um der Thematik Kontamination entgegenzuwirken, müssen Kunststoffe entweder in einer sauberen Form vorliegen oder es müssen entsprechende Reinigungsverfahren zu Einsatz kommen und erst dann kann mit dem eigentlichen Recyclingprozess begonnen werden. Hierfür gibt es laut aktuellem Stand der Forschung eine neuartige wasserlose Reinigungsmaschine, welche mit Flusssand funktioniert. Ergebnisse dieser Methode zeigen unter Verwendung von Sand mit mittleren Partikelgröße von 4-14 Mesh eine optimale Reinigungsrate von 94%. (Geng et al., 2022)

6.2 Chemisches und thermochemisches Recycling

Ein weitere schon genannte Recyclingtechnik ist das Chemische Recycling. Beispiele hierfür sind zum Beispiel die Alkoholyse, Hydrolyse, der enzymatische Abbau und die reduktive Depolymerisation (Feghali et al., 2020). Für den enzymatischen Abbau gibt es Anhand Forschung aus den letzten 16 Jahren nur wenige ausführlich beschriebene Benchmark-Enzyme, welche einem Protein-Engineering unterzogen wurden (Wei et al., 2022). Die Funktionsweise all dieser Methoden beruht auf Fraktionierung seiner Zusammensetzung in Monomere und im weiteren Verlauf wird unter Verwendung eines Katalysators eine Solvolyse durchgeführt bzw. eine chemische Bindung wird mithilfe eines Lösungsmittels gebrochen (Moreno-Sierra et al., 2020). Bei der Alkoholyse werden die hydrobasierten Bindungen eines Polymers mit Hilfe eines Alkohols aufgebrochen. Hierbei ist der am häufigsten verwendete Alkohol Methanol. (Feghali et al., 2020) Laut aktuellem Stand der Forschung gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren zur Depolymerisation (Kang et al., 2020). Mit Hilfe von enzymatischer Depolymerisation ist das Upcycling von Kunststoffen möglich, die zu früherer Zeit nicht als biologisch abbaubar galten. Dies funktioniert, indem die Depolymerisation unter Ablauf der mikrobiellen Umwandlung PET in wertvolle Polymere kaskadiert. Das genannte Verfah-

ren bietet eine Lösung kommerziellen PET zu biologisch Abbaubaren Biokunststoff und Hydroxyalkanoyloxyalkanoate (HAAs) mit einem außerordentlichen biotechnologischen Potential umzuwandeln. Hier lässt sich auch der Begriff Upcycling ableiten, denn das PET wird zu höherwertigen Polymeren verarbeitet. (Tiso et al., 2021). Es gibt auch Methoden, welche auf der Mischung von Kunststoffen und Baustoffen beruhen. Besonders in Entwicklungsländern liefern Methoden der Kunststoffabfallwiederverwendung beeindruckende Ergebnisse. Ein Beispiel hierfür ist der kunststoffgebundene Sand, welcher aus Polyethylen niedriger Dichte (LDPE) und Polyethylen hoher Dichte (HDPE) hergestellt wird. (Kumi-Larbi Jnr et al., 2022) Ähnliche Ergebnisse mit anderen Produkten und Ausgangsstoffen gehen auch über Entwicklungsländer hinaus (Beghetto et al., 2021). Zu dem eben erwähnten kunststoffgebundenen Sand zeigen Ergebnisse, dass die Eigenschaften vergleichbar mit C20/25 Beton sind und zu dem deutlich besser als Sandbeton. Zum Einsatz kommt dieser dann als Pflasterstein, Trennwand, Dachziegel usw. (Kumi-Larbi Jnr et al., 2022) Wie hier deutlich wird, gibt es eine Vielzahl an chemischen Recyclingmöglichkeiten, welche zu einer Verbesserung der Zustände der Umwelt und der Weltmeere führen können. Als eine weitere Lösung dieses Problems gilt das Verfahren der hydrothermalen Verflüssigung (HTL), welche hauptsächlich verwendet wird, um vorbehandelten *ocean-bound plastic* (OPW), worunter größtenteils HDPE-Abfälle zählen, im überkritischen Zustand zu Öl umzuwandeln. Die Funktionsweise dieser Recyclingmethode beruht auf der Nutzung unter/ überkritischen Wassers als Medium der Reaktion um damit Kunststoffe thermochemisch in wertvolle Chemikalien wie Naphtha und Wachs umzuwandeln. (Lu et al., 2022) Bei Biokunststoff sieht es in Bezug auf die Eigenschaften etwas anders aus, denn einige besitzen die Eigenschaft biologischer Abbaubarkeit, jedoch auch nur unter bestimmten Bedingungen. Damit ein Abbauprozess stattfinden kann, müssen geeignete zersetzenden Mikroorganismen vorhanden sein. Hierfür werden Enzyme erforscht und hergestellt, die Eigenschaften zur Depolymerisation besitzen. (Hu et al., 2022) Zu dieser Art von Enzymen zeigt bestehende Forschung Enzyme mit verbesserter Polycaprolacton (PCL)-polymerisierender Aktivität (Oh et al., 2022). In einem konkreten Beispiel wurden Enzyme zur Depolymerisation von PCL untersucht und es wurden das Enzym *Lipase B* aus *Candida Antarctica (CalB)* entdeckt. Dieses Enzym findet sich in mehreren *CalB* Varianten wieder, mitunter *Calb-658* und das *Wildtyp-Calb*, welche beide die Eigenschaft besitzen, PCL zu depolymerisieren. Ergebnisse zeigen, dass der *Wildtyp-Calb* 54,2% und *Calb-658* sogar 97,3% eines 60mg PCL- Films innerhalb von 32 Stunden abbaut haben. (Hu et al., 2022)

7. Effizienz ausgewählter Methoden

Grundsätzlich kann das mechanische Recycling beliebig oft durchlaufen werden. Dennoch sind die Anwendungen stark begrenzt, da mechanisches Recycling, wie im vorherigen Kapitel schon erwähnt, nur stattfinden kann, wenn die Kunststoffe sortenrein sind und der Grad an Kontamination nur minimal ist. Nach jedem Ablauf des mechanischen Recyclens, leiden Kunststoffe an einem Grad des Abbaus, das Molekulargewicht verändert sich sowie auch die physikalischen Eigenschaften. (Kökkılıç et al., 2022). Um sicherzustellen, dass auch der Ablauf der Prozesskette vor dem mechanischen Recycling so effizient wie möglich gestaltet wird, sind moderne Sortierverfahren notwendig. (Maisel et al., 2020) Ein Verfahren zur Steigerung der Effizienz bei der Sortierung ist, wie schon genannt, die Flotationstrennung, welche eine hohe Effizienz aufweist. Zudem dauert die Aluminiumbeschichtung im Verhältnis zu anderen Modifizierungsmethoden kürzer und verbraucht weniger Chemikalien. (Jiang et al., 2021). Unabhängig von den Ergebnissen vorheriger Sortierverfahren untersuchte eine Studie drei verschiedene sensorgestützte Sortiermechanismen und Ergebnisse zeigen, dass das *VIP-Scores-Verfahren*, welches eine durchschnittliche Effizienz von 0,98 besitzt, einen der besten sensorbasierten Online-Sortierungs-Ansätze darstellt. (Bonifazi et al., 2022) Zu chemischen Recyclingverfahren der reduktiven Depolymerisation mithilfe eines Zink Katalysators zeigt Forschung, dass die Möglichkeit besteht, mit einem umweltfreundlichen, günstigen und kommerziell erhältlichen Katalysator effizient zu recyceln, was die Menge an Kunststoffabfälle deutlich reduzieren kann (Fernandes, 2021). Ein weiterer Schwerpunkt im Bereich Plastikrecycling und Verschmutzung ist der Plastikhaushalt in Entwicklungsländern. Hier gibt es Möglichkeiten, wie schon im Kapitel 6 erwähnt, welche es möglich machen, mit geringem Wasserbedarf und Energieeinsatz kunststoffgebundenen Sand herzustellen. Zudem ist das Recycling von Kunststoffabfällen zu kunststoffgebundenem Sand eine ressourceneffiziente Möglichkeit mit einem Vorteil gegenüber bestehenden Methoden in Bezug auf Umwelt und Gesundheit. (Kumi-Larbi Jnr et al., 2022) Andere Forscher haben ebenfalls gezeigt, dass recycelter Kunststoff leistungsfähige Eigenschaften zum Bauen besitzt. In Entwicklungsländern hat man besonders im Katastrophenszenario beim Wiederaufbau herausgefunden, dass bestimmte Modulmontagesysteme unter Verwendung von Recyclten Kunststoffen effiziente, belastbare und thermisch komfortable Systeme darstellten, welche dann für Wohnräume, Schulen und Gesundheitseinrichtungen als Notunterkünfte verwendet werden können. (Moreno-Sierra et al., 2020) Im ähnlichem Kontext dazu kann *Waste of Polyolefin (WOPO)* als Asphaltadaptiv genutzt werden und folglich eine Verringerung von Treibhausgasemission, Kosten und zusätzlich einem sinkenden Verbrauch fossiler Brennstoffe mit sich bringen. Dies führt im Endeffekt nicht nur zu ökologischen Vorteilen, sondern auch zu ökonomischen. (Beghetto et al., 2021). Effizienz kann auch beim thermischen Recycling gesteigert werden,

so kann durch photothermische Systeme Energie gespart werden, indem statt zusätzlich zugeführter elektrischer Energie, Sonnenenergie verwendet wird. Bei einem Beispiel der gewöhnlichen thermischen katalytischen PET-Glycolysereaktion wird beim Recycling insgesamt 146.400.000 kWh elektrische Energie für 100.000 Tonnen recycelten PET-Abfall benötigt. Ein Großteil dieser Energie kann in einem photothermischen System eingespart werden. (Liu et al., 2022). Eingespart werden kann auch der Aufwand, so kann die HTL-Methode im Verhältnis zu herkömmlichen Verfahren auch gemischte Kunststoffe verarbeiten und besitzt einen signifikant höheren Energieertrag und einen geringeren Ausstoß an Treibhausgasen gegenüber der Verbrennung. (Lu et al., 2022)

8. Fazit

Zusammenfassend befasst sich diese Arbeit mit der Bewertung der Effizienz verschiedener Verfahren der Kunststoffsortierung, Reinigung und dem Recycling. Ursprünglich war das Ziel dieses Artikels unterschiedliche Methoden des Recyclings in Bezug auf ihrer Effizienz zu bewerten. Im Rahmen der genaueren Untersuchung der zu Grunde liegender Forschungsartikel ist deutlich geworden, dass zur Bewertung der Effizienz des Recyclings auch die Prozesse, die vor dem Recycling stattfinden, besonders wichtig sind. So zeigt sich bei er Sortierung die Flotationstrennung als besonders effiziente Methode mit einer optimalen Rückgewinnung von bis zu 99,65%. Auch sensorgestützte Sortierung trägt zu einem insgesamt effizienteren Prozess, ins besonders beim mechanischen Recycling bei. Besonders gute Ergebnisse erzielt die *VIP-Scores-Methode*, mit einer durchschnittlichen Effizienz von 98%. Auch die Reinigung von kontaminierten Kunststoffen zählt zu den wichtigen Bestandteilen eines effizienten Recyclings. Hierzu präsentiert aktuelle Forschung eine neue wasserlose Methode mit Flusssand, welche eine optimalen Reinigungsrate von 94% aufweist. Die betrachtete Literatur zeigt eine Vielzahl von unterschiedlichen chemisch-thermischen Recyclingmethoden. Eine davon ist die Enzymatische Depolymerisation, die das *Upcycling* von Kunststoffen möglich gemacht hat, die früher als biologisch nicht abbaubar galten. Des Weiteren zeigt sich eine Möglichkeit Kunststoffabfälle aus LDPE und HDPE zu mit Kunststoff gebundenem Sand zu verarbeiten und somit kann diese Art von chemisch-thermischem Recycling ins besonders in Entwicklungsländern zu einer effizienteren Wertschöpfung beizutragen. Biokunststoffe sind nur dann umweltfreundlich, wenn sie ordentlich recycelt werden oder die Bedingungen für eine vollständige Zersetzung gegeben sind. Hierfür wird das Vorhandensein von Mikroorganismen vorausgesetzt. Für das saubere und effiziente Recycling auf biologischem Weg werden Enzyme mit Eigenschaften zur Depolymerisation untersucht und hergestellt. Die besten Ergebnisse hat das Enzym *Calb-658* mit einer Abbaurrate von

97,3% eines PCL-Films innerhalb von 32 Stunden erzielt. Der gesamte Prozess des Recyclings kann mit aktuellem Stand der Forschung noch effizienter gestaltet werden, als er schon ist. Auch Energie kann durch aktuelle Technik, wie photochemische Systeme eingespart werden.

9. Quellenverzeichnis

- Beghetto, V., Bardella, N., Samiolo, R., Gatto, V., Conca, S., Sole, R., Molin, G., Gattolin, A. & Ongaro, N. (2021) „By-products from mechanical recycling of polyolefins improve hot mix asphalt performance“, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 318, S. 128627.
- Bonifazi, G., Capobianco, G., Cucuzza, P., Serranti, S. & Uzzo, A. (2022) „Volume 18 - March 2022“, *Detritus*, No. 18, S. 42–49.
- Du, Y., Zhang, Y., Jiang, H., Li, T., Luo, M., Wang, L., Wang, C. & Wang, H. (2020) „Hydrophilic modification of polycarbonate surface with surface alkoxylation pretreatment for efficient separation of polycarbonate and polystyrene by froth flotation“, *Waste management (New York, N.Y.)*, Vol. 118, S. 471–480.
- Feghali, E., Tauk, L., Ortiz, P., Vanbroekhoven, K. & Eevers, W. (2020) „Catalytic chemical recycling of biodegradable polyesters“, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 179, S. 109241.
- Fehér, Z., Kiss, J., Kisszékelyi, P., Molnár, J., Huszthy, P., Kárpáti, L. & Kupai, J. (2022) „Optimisation of PET glycolysis by applying recyclable heterogeneous organocatalysts“, *Green Chemistry*, Vol. 24, No. 21, S. 8447–8459.
- Fernandes, A. C. (2021) „Reductive Depolymerization of Plastic Waste Catalyzed by $Zn(OAc)_2 \cdot 2H_2O$ “, *ChemSusChem*, Vol. 14, No. 19, S. 4228–4233.
- Geng, X., Song, N., Zhao, Y. & Zhou, T. (2022) „Waste plastic resource recovery from landfilled refuse: A novel waterless cleaning method and its cost-benefit analysis“, *Journal of environmental management*, Vol. 306, S. 114462.
- Han, Z., Mao, Y., Pang, X. & Yan, Y. (2022) „Structure and functional group regulation of plastics for efficient ammonia capture“, *Journal of hazardous materials*, Vol. 440, S. 129789.
- Hu, Q., Ok, Y. S. & Wang, C.-H. (2022) „Sustainable and Highly Efficient Recycling of Plastic Waste into Syngas via a Chemical Looping Scheme“, *Environmental science & technology*, Vol. 56, No. 12, S. 8953–8963.
- Jiang, H., Zhang, Y., Wang, C. & Wang, H. (2021) „A clean and efficient flotation towards recovery of hazardous polyvinyl chloride and polycarbonate microplastics through selective aluminum coating: Process, mechanism, and optimization“, *Journal of environmental management*, Vol. 299, S. 113626.
- Kang, M. J., Yu, H. J., Jegal, J., Kim, H. S. & Cha, H. G. (2020) „Depolymerization of PET into terephthalic acid in neutral media catalyzed by the ZSM-5 acidic catalyst“, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 398, S. 125655.
- Khadke, S., Gupta, P., Rachakunta, S., Mahata, C., Dawn, S., Sharma, M., Verma, D., Pradhan, A., Krishna, A. M. S., Ramakrishna, S., Chakraborty, S., Saianand, G., Sonar, P., Biring, S., Dash, J. K. & Dalapati, G. K. (2021) „Efficient Plastic Recycling and Remolding Circular Economy Using the Technology of Trust–Blockchain“, *Sustainability*, Vol. 13, No. 16, S. 9142.
- Kökkılıç, O., Mohammadi-Jam, S., Chu, P., Marion, C., Yang, Y. & Waters, K. E. (2022) „Separation of plastic wastes using froth flotation - An overview“, *Advances in colloid and interface science*, Vol. 308, S. 102769.
- Kumi-Larbi Jnr, A., Galpin, R., Manjula, S., Lenkiewicz, Z. & Cheeseman, C. (2022) „Reuse of Waste Plastics in Developing Countries: Properties of Waste Plastic-Sand Composites“, *Waste and Biomass Valorization*, Vol. 13, No. 9, S. 3821–3834.
- Liu, Y., Wang, X., Li, Q., Yan, T., Lou, X., Zhang, C., Cao, M., Zhang, L., Sham, T.-K., Zhang, Q., Le He & Chen, J. (2022) „Photothermal Catalytic Polyester Upcycling over Cobalt Single-Site Catalyst“, *Advanced Functional Materials*, S. 2210283.

- Lu, T., Jan, K. & Chen, W.-T. (2022) „Hydrothermal liquefaction of pretreated polyethylene-based ocean-bound plastic waste in supercritical water“, *Journal of the Energy Institute*, Vol. 105, S. 282–292.
- Maisel, F., Chancerel, P., Dimitrova, G., Emmerich, J., Nissen, N. F. & Schneider-Ramelow, M. (2020) „Preparing WEEE plastics for recycling – How optimal particle sizes in pre-processing can improve the separation efficiency of high quality plastics“, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 154, S. 104619.
- Moreno-Sierra, A., Pieschacón, M. & Khan, A. (2020) „The use of recycled plastics for the design of a thermal resilient emergency shelter prototype“, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 50, S. 101885.
- Oh, J. Y., Oh, Y.-R., Kim, D.-M., Eom, G. T. & Song, J. K. (2022) „Screening and efficient production of engineered lipase B from *Candida Antarctica* for eco-friendly recycling of waste polycaprolactone“, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 195, S. 109807.
- Rocha, A, Adeli, H, Dzemyda, G & Moreira, F (Hg.) (2022) *Information Systems and Technologies*, Cham, Springer International Publishing.
- Tiso, T., Narancic, T., Wei, R., Pollet, E., Beagan, N., Schröder, K., Honak, A., Jiang, M., Kenny, S. T., Wierckx, N., Perrin, R., Avérous, L., Zimmermann, W., O'Connor, K. & Blank, L. M. (2021) „Towards bio-upcycling of polyethylene terephthalate“, *Metabolic engineering*, Vol. 66, S. 167–178.
- Wei, R., Haugwitz, G. von, Pfaff, L., Mican, J., Badenhorst, C. P. S., Liu, W., Weber, G., Austin, H. P., Bednar, D., Damborsky, J. & Bornscheuer, U. T. (2022) „Mechanism-Based Design of Efficient PET Hydrolases“, *ACS catalysis*, Vol. 12, No. 6, S. 3382–3396.
- Zhang, Y., Li, C., Wang, L. & Wang, H. (2020) „Application of froth flotation in the separation of polyvinyl chloride and polycarbonate for recycling of waste plastic based on a novel surface modification“, *Waste management (New York, N.Y.)*, Vol. 110, S. 43–52.
- Statista (2022c): Plastikmüll, Statista, [online]
<https://de.statista.com/themen/4645/plastikmuell/> [abgerufen am 11.01.2023].