



Lehrstuhl für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften

Masterarbeit

Darstellung ökologischer Aspekte der
Aufbereitung wichtiger Reststoffgruppen
und deren Relevanz für den Klimaschutz
mittels Ökobilanzierung

Alexandra Groiss, BSc

April 2021

Aufgabenstellung

Frau Alexandra Groiss, BSc wird das Thema

Darstellung ökologischer Aspekte der Aufbereitung wichtiger Reststoffgruppen und deren Relevanz für den Klimaschutz mittels Ökobilanzierung

zur Bearbeitung in einer Masterarbeit gestellt.

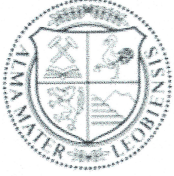
Im ersten Abschnitt der Masterarbeit sind die theoretischen Grundlagen zur Bearbeitung der beschriebenen Themenstellung herauszuarbeiten. Dazu ist im Verpackungswesen auf die Kreislaufwirtschaft im Allgemeinen und das Eco Design im Speziellen einzugehen. Anschließend sind zwei Verpackungslösungen hinsichtlich deren Lebenszyklus von der Rohstoffzusammensetzung bis zur Entsorgung zu beschreiben. Für letztere sind Abfallsammel- und Abfallsaufbereitungstechniken vorzustellen sowie deren Schwachstellen aufzuzeigen. Ergänzend dazu sind nationale und internationale Vorschriften in der Entsorgung von Reststoffen zu berücksichtigen.

Der Schwerpunkt des praktischen Teils bildet die Gegenüberstellung von haushaltüblichen Getränkeverpackungen. Dazu sind zwei Verpackungslösungen zu wählen und deren Lebenszyklus auf Basis zuvor definierter Systemgrenzen softwaregestützt zu modellieren. Anhand dessen sind in weiterer Folge die ökologischen Auswirkungen zu ermitteln, zu diskutieren und Empfehlungen abzuleiten.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Hubert Biedermann', with a stylized, flowing script.

Leoben, November 2020

o.Univ.Prof. Dr. Hubert Biedermann



MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN

www.unileoben.ac.at

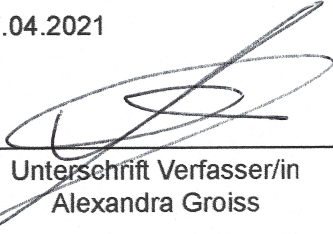
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 27.04.2021



Unterschrift Verfasser/in
Alexandra Groiss

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Es wird ausdrücklich festgehalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

Danksagung

Johann Jungwirth, MSc danke ich für die engagierte Förderung und Unterstützung dieser Arbeit. Ohne seine Hilfe und konstruktive Kritik wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Darüber hinaus gebührt o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Hubert Biedermann besonderer Dank, dass er die Bearbeitung dieser Arbeit ermöglicht hat.

Mein Dank gebührt ebenfalls meinen Studien- und Arbeitskollegen ohne deren Hilfe und vor allem mentale Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre, Christina Nader und Patrick Arth, die mich mit ihren Meinungen und Gedanken bereichert und unterstützt haben. Darüber hinaus will ich mich bei meinem Partner Oliver Theussl bedanken, der mir immer mit Rat und Tat zur Seite steht.

Nicht zuletzt möchte ich Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Andreas Böhm für seine Inspiration danken mich mit diesem Thema zu befassen und tiefer in die Materie der Aufbereitung einzutauchen.

Darüber hinaus gebührt Eva Podebradsky ein großer Dank für ihre Hilfe bei der Wahl der richtigen Nuancen, die ohne sie niemals so schöngeistig geworden wären.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern für das allgegenwärtige Vertrauen und ihre Unterstützung während meiner Ausbildung, die ohne sie nicht möglich gewesen wäre.

Kurzfassung

Um dem anhaltenden Klimawandel entgegen wirken zu können muss in vielen Sektoren des modernen Lebens ein Wandel stattfinden. Der Umgang mit endlichen Ressourcen im Verpackungssektor soll in dieser Arbeit genauer beleuchtet und untersucht werden. Dazu wird der Lebenszyklus von zwei, für den europäischen Handel typischen, Verpackungsvarianten für antialkoholische Getränke, untersucht. Dabei handelt es sich um die PET-Flasche sowie die Glasflasche für den halben Liter. Ein detailliertes Grundwissen zu technischen Vorgängen der Herstellung, der Logistik und der zur Verfügung stehenden Entsorgungs- beziehungsweise Wiederverwertungsoptionen sind von elementarer Bedeutung, um eine fundierte Lebenszyklusanalyse erstellen zu können. Auch die Bewertung der Ergebnisse ist ohne die vorhergehende Wissensgrundlage nicht aussagekräftig, denn eine vollständige Lebenszyklusanalyse betrachtet ebenfalls die gesamten Auswirkungen eines Produktes „von der Wiege bis zur Bahre“. Nur mittels gesamtheitlicher Betrachtung ist es möglich Lösungsansätze zur Reduktion der Emissionen zu diskutieren, ohne diese lediglich durch eine Verschiebung hin zu anderen Lebensphasen zu verfälschen.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass Kunststoffe ihren negativen Ruf oft unberechtigt innehaben, während Glasverpackungen in der vermeintlich ökologischen Konsumgesellschaft des 21. Jahrhunderts bevorzugt werden. Um diesen Sachverhalt darzustellen wurden die Ökobilanzen beider Produkte auf Basis generischer Daten erstellt. Hierzu wurde sowohl auf die Verwendung von Datenbanken zurückgegriffen, als auch auf öffentliche Statistiken rund um den Güterverkehr und -konsum in Deutschland und Österreich. Durch eine zusätzliche Ausweitung der Systemgrenzen wurden die, zum Transport der Güter notwendigen, Verpackungsmaterialien in einer Modellalternierung ebenfalls mitberücksichtigt. Die Modellierung bezieht sich in der vorliegenden Studie auf die ökologischen Auswirkungen der beiden Verpackungsoptionen, spricht jedoch auch die Option der Wiederbefüllung in diesem Zusammenhang an. Durch eine eingehende Aufbereitung der wichtigsten Informationen zur Herstellung, Verarbeitung und Wiederbeziehungsweise Weiterverwertung wird versucht eine möglichst vollständige Abbildung des Lebenszyklus zu ermöglichen. Dadurch soll darüber hinaus die Komplexität und der Facettenreichtum scheinbar banaler Thematiken wie Abfallverwertung in Zusammenhang mit ökonomischen und ökologischen Aspekten der Kreislaufwirtschaft dargestellt werden.

Inwiefern Handlungsbedarf besteht, um aktuelle Richtlinien der Europäischen Union in Bezug auf Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft zu erfüllen, soll durch die eingehende Aufbereitung beider Verpackungsoptionen hervorgehoben werden. Auch die Auswirkung von vermeintlich als ökologisch beworbenen Produkten auf den aktuellen Markt und der damit einhergehende Begriff des „Greenwashing“ soll, vor allem im Zusammenhang mit Biokunststoffen, Einblick in die komplexe Welt der Abfallbehandlung und nachhaltigen Wirtschaften beziehungsweise Umgang mit endlichen Ressourcen schaffen.

Abstract

In order to slow down the ongoing climate change it is mandatory to make changes in many different aspects of modern life. The consumption of non-renewable resources within the packaging sector for beverages is the topic of this thesis, which will be discussed thoroughly throughout the different aspects of concern. To do so a life cycle analysis was performed for two different packaging options being a PET-bottle and a glass bottle both for half a liter of volume. For performing a life cycle analysis, it is mandatory to obtain a thorough knowledge about the technical process of producing the product, as well as the logistic of transports and the different options being available for disposal or recycling. This knowledge is also of great importance when it comes to understanding and evaluating the results, as a life cycle analysis itself also takes every aspect into account, by definition from “cradle to grave”. Only with an overall evaluation a deduction of possible solutions in regard to emissions can be found without falsifying the results by transferring emissions to different life phases of the product.

The given study is meant to show that polymers often have a bad reputation unrectified, while glass is often seen as an ecological alternative especially through the eyes of the modern consumer society. In order to prove this statement, a life cycle analysis was performed for both products on the basis of generic data. The data was either obtained from databases or through public statistics, concerning the consumption and transport of goods throughout Germany and Austria. Through an extension of the system borders to the point of packaging material needed for the transport of the concerned goods, different models were regarded within the analysis of the modelling results. While this study mainly focuses on single use options of both packaging materials, an short overview about refilling options for bottles and how they influence the given result will be given. A thorough study of many different aspect concerning both options are being discussed in order to allow an accurate depiction of the whole lifecycle. Nevertheless, it is also important to mention those aspects to depict the complete complexity of a topic, which seems to be as easy as waste recycling, in regard to economic and ecologic aspects, within a circular economy.

The need for action in order to fulfill European guidelines, when it comes to a circular economy, will be shown by the thorough discussion of both packaging options. Another aspect, which will be discussed is the importance of products which are declared to be ecological by the producers and sellers even though the reality behind it is quite more complicated. This so called “greenwashing” of products will be discussed with the focus set on biological polymers and will give an example of the complexity of waste treatment and an ecological, sustainable future.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung.....	12
1.2	Zielsetzung	12
1.3	Methodische Vorgehensweise	12
1.4	Aufbau der Arbeit.....	13
2	Grundlagen der ökologischen Bewertung	15
2.1	Lebenszyklusdenken	17
2.2	Ökonomische und ökologische Unternehmensleistung.....	18
2.3	Methoden der Umweltleistungsbewertung.....	20
2.4	Systemgrenzen.....	21
2.5	Lebenszyklusbezogene Umweltleistungsbewertung	22
2.5.1	Ökobilanz	23
2.5.2	Umweltbelastungspunkte.....	25
2.5.3	Intergovernmental Panel for Climate Change.....	25
3	Einblicke in das Verpackungswesen	27
3.1	Kreislaufwirtschaft.....	27
3.2	Abfallsammelkonzepte.....	30
3.3	Kunststoffe	34
3.4	Glas	38
4	Grundlagen der Aufbereitungstechnik.....	41
4.1	Zerkleinerung.....	41
4.2	Klassierung	42
4.3	Sortierung	43
4.3.1	Magnetsortierung	43
4.3.2	Wirbelstromsortierung.....	44
4.3.3	Automatisierte Sortierung	45
4.3.4	Dichte Sortierung	47
4.3.5	Elektrosortierung.....	48
5	Technische Grundlagen zu Kunststoffen.....	50
5.1	Einteilung der Kunststoffe.....	50
5.1.1	Polymerisation	54
5.1.2	Thermoplaste	57
5.2	Polyethylenterephthalat	58

5.3	Spritzgieß-, Extrusionsverfahren und Blasformen	61
5.4	Aufbereitung und Recycling	64
5.4.1	Mechanische Aufbereitung	67
5.4.2	Beispiel einer Kunststoffsortieranlage	69
5.4.3	Chemische Aufbereitung	70
5.4.4	Ökonomische Analyse	71
6	Technische Grundlagen zu Glas	74
6.1	Glasstruktur	75
6.2	Eigenschaften und Zusammensetzungen von Gläsern	77
6.2.1	Netzwerkbildner	77
6.2.2	Netzwerkwanler	77
6.2.3	Glasfärbung	78
6.3	Glasherstellung	79
6.4	Verpackungsglas	81
6.5	Glasaufbereitung und Recycling	82
6.5.1	Wichtigkeit der Glasaufbereitung	83
7	Praktische Fallstudie	84
7.1	Vorgehensweise	84
7.2	PET-Flasche	87
7.2.1	Annahmen	87
7.2.2	Alternierende Modelle	91
7.2.3	Ergebnisse	91
7.3	Glasflasche	97
7.3.1	Annahmen	97
7.3.2	Alternierende Modelle	98
7.3.3	Ergebnisse	98
7.4	Vergleich, Interpretation und Bewertung der Ergebnisse	102
8	Zukunftsaublick im Verpackungswesen	105
9	Zusammenfassung	109

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Überblick über das Zusammenwirken verschiedener Bereiche der ökologischen Unternehmensbewertung	16
Abbildung 2-2 DuPont-Kennzahlensystem.....	19
Abbildung 2-3 Emissionen entlang der Lieferkette und mögliche Bilanzgrenzen.....	21
Abbildung 3-1 Verwertungswege für Kunststoffe in den Ländern Europas 2018.....	29
Abbildung 3-2 Verteilung der globalen Kunststoffproduktion von 368 Millionen Tonnen	35
Abbildung 3-3 Kunststoffnachfrage im Jahr 2019 aufgeteilt nach Einsatzsegmenten	36
Abbildung 3-4 Anteile der Kunststoffsorten am Markt und deren Verwendungszweck	37
Abbildung 3-5 Glasproduktion im Jahr 2019 und die Anteile der einzelnen Glasbranchen	38
Abbildung 3-6 Rohstoffe für die Herstellung von Grünglas im Jahre 1972.....	39
Abbildung 3-7 Rohstoffe für die Herstellung von Grünglas mit Recycling-Scherben	40
Abbildung 4-1 Prinzipien der Zerkleinerung	42
Abbildung 4-2 Trommelsieb (links) und Zick-Zack-Windsichter (rechts)	43
Abbildung 4-3 Überband Magnet.....	44
Abbildung 4-4 Prinzip Schaubild Wirbelstromscheider.....	45
Abbildung 4-5 Schematische Darstellung eines Hydrozyklons	48
Abbildung 4-6 Schematische Darstellung Walzenscheider und Kammerscheider...	49
Abbildung 5-1 Verknäuelte, lineare und verzweigte Makromoleküle.....	51
Abbildung 5-2 Einteilung der Kunststoffe	52
Abbildung 5-3 Aufteilung der Polymerisationsreaktionen	57
Abbildung 5-4 Chemische Struktur Polyethylenterephthalat	59
Abbildung 5-5 Fließbild PET-Produktion	61
Abbildung 5-6 Schematische Darstellung einer Spritzgießmaschine	62
Abbildung 5-7 Verfahrensschritte des Extrusionsblasverfahrens	63
Abbildung 5-8 Prinzip des Streckblasens	63
Abbildung 5-9 Kunststoffkreislauf.....	66
Abbildung 5-10 Beispielhaftes Fließbild einer Kunststoffsortierung	69
Abbildung 6-1 Glasvolumen als Funktion der Temperatur	75
Abbildung 6-2 Zweidimensionale Strukturmodelle von kristallinem Quarz, Quarzglas und Silikatglas.....	76
Abbildung 6-3 Funktionsweise Tropfenspeise.....	80

Abbildung 6-4 Prinzip Press-Blas-Verfahren	80
Abbildung 7-1 Ausschnitt des PET-Flaschen Standardmodells	86
Abbildung 7-2 Ausschnitt des PET-Flaschen Standardmodells in Sankey-Format..	86
Abbildung 7-3 PET-Flaschen Standardmodell UBP nach Phasen	94
Abbildung 7-4 PET-Flaschen Standardmodell UBP	95
Abbildung 7-5 PET-Flaschen Standardmodell GWP	96
Abbildung 7-6 PET-Flaschen Standardmodell GWP nach Phasen.....	97
Abbildung 7-7 Glasflaschen Standardmodell GWP	100
Abbildung 7-8 Glasflaschen Standardmodell GWP nach Phasen.....	101
Abbildung 7-10 Glasflaschen Standardmodell UBP nach Phasen	101
Abbildung 7-9 Glasflaschen Standardmodell UBP	102

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Produktbezogene Umweltinformationssysteme	22
Tabelle 3-1 Unterschied zwischen "Gelbem Sack" und „Gelbe Froschaugen Tonne“	31
Tabelle 3-2 Altglassammel System	33
Tabelle 3-3 Altglasaufkommen in Österreich im Jahr 2014.....	39
Tabelle 4-1 Sensoren und Trennmerkmale der automatischen Sortierung.....	46
Tabelle 5-1 Übersicht Thermoplaste	52
Tabelle 5-2 Übersicht Elastomere	53
Tabelle 5-3 Übersicht Duroplaste	54
Tabelle 5-4 Ablauf der Additionspolymerisation	55
Tabelle 5-5 Übliche Dichten verschiedener Kunststoffe.....	68
Tabelle 5-6 Investitionen verschiedener Sortieranlagen von Leichtverpackungen (Preisbasis 2018).....	72
Tabelle 6-1 Gläser und ihre typische chemische Zusammensetzung	78
Tabelle 6-2 Farbkationen in Gläsern	78
Tabelle 7-1 Gewicht verschiedener Verschlusskappen und PET-Flaschen.....	88
Tabelle 7-2 errechnetes Etiketten Gewicht und die benötigte Energie zur Etikettierung und Befüllung.....	89
Tabelle 7-3 Distanzen des Gütertransportes.....	89
Tabelle 7-4 Prozentualer Anteil der Transportwege am Güterverkehrsaufkommen	90
Tabelle 7-5 Leistungen verschiedener Kühlregale	91
Tabelle 7-6 Ergebnisse der PET-Flaschen Modelle als GWP und UBP	92
Tabelle 7-7 Ergebnisse der Glasflaschen Modelle als GWP und UBP	99
Tabelle 7-8 Vergleich der Standardmodelle	103

Abkürzungsverzeichnis

ACM	Acrylatelastomer
CO_2	Kohlendioxid
dm^3	Kubik Dezimeter
EU	Europäische Union
EPM	Ethylen-Propylen-Elastomer
kg	Kilogramm
ISO	International Organisation for Standardization
NR	Naturgummi
PC	Polychlorid
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
SBR	Styrol-Butadien-Gummi
UN	United Nations

1 Einleitung

Die steigende Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre ist eine der großen globalen Aufgaben in der heutigen Zeit. Der Anteil an Kohlendioxid ist seit Beginn der Industrialisierung im 18. Jahrhundert um 44% gestiegen, während er in den vorherigen 10.000 Jahren annähernd konstant war.¹ Es wurden die 18 wärmsten Jahre innerhalb der letzten beiden Jahrzehnte, seit Beginn der Temperaturlaufzeichnungen beobachtet.² Nicht zuletzt deswegen können die Argumente einiger Skeptiker, dass der Klimawandel nicht anthropogen Ursprungs ist oder die derzeitige Entwicklung natürlichen Ursprungs sei, längst von Wissenschaftlern widerlegt werden.³

Auch das vermehrte Auftreten von Naturkatastrophen, wie Erdbeben, Hochwasser oder extreme Hitzeperioden konnte neben Krankheiten, begünstigt durch die Belastung der Atemwege, in direkten Zusammenhang mit dem Klimawandel gebracht werden.⁴ Ein Umdenken hat in der Politik längst stattgefunden. Bereits 1997 wurde das Kyoto-Protokoll der Vereinten Nationen angenommen, das 2005 in Kraft trat und erstmals eine rechtlich bindende Begrenzung des Treibhausgasausstoßes in einem völkerrechtlichen Vertrag verankerte.⁵ Im Jahr 2015 wurde auf der Pariser Klimakonferenz die erste umfassende und rechtsverbindliche, weltweite Klimaschutzvereinbarung geschlossen.⁶ Die Europäische Union hat sich darüber hinaus im Rahmen der Klima- und Energiepolitik 2014 dazu entschlossen ihre Emissionen bis 2030 um mindestens 40%, gegenüber 1990, zu senken. Dieses Vorhaben wurde 2020 durch ehrgeizigere Ziele, nämlich eine Reduktion um mindestens 55% gegenüber 1990, ersetzt.⁷ Ein entscheidender Beitrag zu diesem Ziel soll durch den „Circular Economy Action Plan“ erreicht werden.⁸

Dieser sieht, neben der Transformation hin zu verwertungsfreundlicherem Produktdesign, vor allem die Kreislaufwirtschaft als ein Hauptaugenmerk. Diese Strategie zielt darauf ab den Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen solange wie möglich aufrecht zu erhalten, somit möglichst geringe Mengen an Abfall zu erzeugen und gleichzeitig eine nachhaltige, ressourceneffiziente, CO₂-arme und dennoch wettbewerbsfähige Wirtschaft zu ermöglichen.⁹ Jedoch stellt dieses Konzept den momentan vorherrschenden Umgang der Gesellschaft mit Verpackungsmaterialien in Frage und vor allem vor neue Herausforderungen. Welche Überlegungen hinter der

¹ Umwelt Bundesamt (2020), S.1

² Consilium Europa, <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/climate-change/> (Zugriff: 21.02.2021)

³ Krätzig, C., <https://www.uni-hamburg.de/newsroom/im-fokus/2019/09-27-klimaluegner.html> (Zugriff: 21.02.2021)

⁴ Bunz, M.; Mücke, H.-G. (2017), S.1

⁵ Berger, J., <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/kyoto-protokoll> (Zugriff: 19.08.2020)

⁶ European Commission, https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de (Zugriff: 20.08.2020)

⁷ Consilium Europa, <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/climate-change/> (Zugriff: 21.02.2021)

⁸ European Commission (2020)

⁹ European Commission (2015), S.2

Kreislaufstrategie stehen, welche Möglichkeiten zur Umsetzung es gibt und welche Problematiken das nicht zuletzt für die Abfallwirtschaft mit sich bringt, soll im Laufe dieser Arbeit dargestellt werden. Den Beitrag den Verpackungsmaterialien, deren Herstellung, Nutzung und Entsorgung darstellen soll durch die Durchführung einer Lebenszyklusanalyse verdeutlicht werden. Dieses Vorgehen soll deren Relevanz, im Umgang mit endlichen Ressourcen und energieintensiven Herstellungsschritten, sowie die Notwendigkeit von Adaptionen für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft unterstreichen.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Aufgrund des oben erwähnten Aktionsplans der EU, bezogen auf die antizipierte Kreislaufwirtschaft, sind diverse Maßnahmen nötig um den vorgesehenen Plan der CO_2 Einsparungen einhalten zu können. Doch bereits zum gegenwärtigen Zeitpunkt scheint klar zu sein, dass mit dem momentan eingeschlagenen Weg und den zu Verfügung stehenden Mitteln das Einsparungsziel nicht erreicht werden kann.¹⁰ Um im Bereich der Kreislaufwirtschaft den vorgegebenen Maßstäben zu entsprechen ist eine umfassende Lebenszyklusanalyse vieler verschiedener Produkte nötig. Dadurch kann bereits beim Design neuer Produkte der Aspekt der Kreislaulösung mit einbezogen werden. Nur durch eingehende Analyse des gesamten Lebenszyklus ist eine fundierte Entscheidung zwischen Werkstoffen, Abläufen und den dazu gehörigen Aufbereitungsschritten möglich.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es eine Lebenszyklusanalyse für Polyethylenflaschen (PET) und für Glasflaschen zu erstellen, um so eine Aussage über deren ökologische Auswirkungen und Tragweite treffen zu können. Es soll ein Basiswissen über die gesetzlichen Grundlagen, die Ist-Situation, sowie die Grundlagen der ökologischen Bewertung erarbeitet werden. Auch die Herstellungs- und Aufbereitungsverfahren der verschiedenen Verpackungstypen sollen angesprochen werden um die Ergebnisse des praktischen Teils bewerten zu können.

1.3 Methodische Vorgehensweise

Zuerst wurde eine eingehende Literatur Recherche vorgenommen, um sowohl das Grundwissen zu erwerben als auch aktuelle Daten zur Marktsituation zu generieren. Die

¹⁰ Auer, M. (2020), S.1

neuen Bestimmungen der EU wurden eingehend studiert, um deren Relevanz für die zukünftige Marktsituation sowohl im Bereich der Auswahl von Verpackungsmaterialien als auch deren späterer Aufbereitung, Entsorgung und Verarbeitung zu ergründen. Um die erstellte Lebenszyklusanalyse korrekt vorzunehmen wurde eine eingehende Studie der Herstellung von PET Flaschen sowie von Glasflaschen vorgenommen. Eine fundierte Recherche zum Themengebiet der Transportwege sollte in diesem Zusammenhang eine realistische und faktenbasierte Darstellung ermöglichen.

Aufgrund der Modellierung soll eine effektive Aussage getroffen werden, inwiefern die Verpackungsfraktionen zum derzeitigen Klimawandel beitragen. Eben jene Abfallfraktionen sind im Jahr 2020, in dem „To-Go“ Produkte und Lieferservice mehr Nachfrage erfahren denn je, immer mehr von ökonomischer und ökologischer Bedeutung. Die Recherche zu den verschiedenen aufbereitungstechnischen Möglichkeiten soll eine Abbildung des momentanen Standes der Technik ermöglichen und somit eine realistische Einschätzung erlauben, welche Produkte eine Kreislaufführung unter gegebenen Rahmenbedingungen gestatten.

1.4 Aufbau der Arbeit

Im ersten Teil der Arbeit wird ein Grundwissen rund um das Thema der ökologischen Bewertung, Verpackungen und deren Relevanz für den Alltag und die Wirtschaft aufgebaut. Unter anderem wird hier ein kurzer Exkurs in die Kunststofftechnik und Glastechnik gegeben. Dies ermöglicht eine Einschätzung deren gegenwärtiger Bedeutung in Bezug auf Verbrauchsaufkommen und Klimaschutz. Um über die Zukunft des Verpackungssektors nachzudenken, soll auch deren Geschichte und Werdegang erfasst werden. Für die Berücksichtigung möglichst vieler relevanter Aspekte ist auch eine eingehendere Beschäftigung mit der momentanen Gesetzeslage beziehungsweise dem Aktionsplan der EU notwendig.

Es soll beleuchtet werden, inwiefern bereits beim Produktdesign an die Kreislaufwirtschaft gedacht werden muss. Im weiteren Verlauf wird aufgezeigt welche Probleme es derzeit mit der Umsetzung von neuen EU-Plänen gibt und wo diese gleichzeitig ein Potential wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Natur für Österreich und die EU als Gesamtes darstellen. Auch die Umweltrisiken und Probleme, die durch den momentanen Umgang mit Verpackungsmaterialien entstehen, werden im Laufe dieser Arbeit erläutert.

Um die Wichtigkeit des Beitrags von Verpackungsmaterialien zum globalen CO_2 -Problem darzustellen wird im praktischen Teil dieser Arbeit die Lebenszyklusanalyse beider Produkte durchgeführt werden, bevor genauer darauf eingegangen wird welche Möglichkeiten zur Aufbereitung und zum Recycling zur Verfügung stehen. Im Zuge dessen wird auch diskutiert werden welche Anforderungen Produkte für eine reale Recyclingfähigkeit erfüllen müssen. Auch die thermische Verwertung von Kunststoffverpackungen wird in diesem Abschnitt erwähnt, um neben der Deponie, alle Möglichkeiten des Lebensendes eines Produktes darzustellen.

Vor der Conclusio wird als abschließender Gedanke die Dezentralisierung als mögliche Option der Abfallaufbereitung und Verwertung diskutiert. Die Conclusio selbst soll ein kurzes Resumé des generierten Wissens darstellen und hervorheben welches wirtschaftliche und ökologische Potenzial in dem steckt, das momentan oft leichthin schlichtweg als „Müll“ bezeichnet wird.

2 Grundlagen der ökologischen Bewertung

Nachhaltige Entwicklung ist in der heutigen Zeit eines der zentralen Leitbilder, das vielerorts diskutiert wird.¹¹ Dabei ist nachhaltige Entwicklung so definiert: „Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.“¹²

Mit der Frage nach den Grenzen des Wachstums wurde 1972 erstmals das vorherrschende Wachstumsparadigma in Frage gestellt, während 1987 durch die Veröffentlichung des Brundt-Landberichtes die Integration von ökonomischen, sozialen, sowie ökologischen Aspekten dem Begriff der Nachhaltigkeit weltweite Geltung verlieh. In diesem Bericht der UN-Kommission wurde damit erstmals der Begriff des „Sustainable Development“, oder kurz „Sustainability“, definiert, um Produzenten von Gütern und Dienstleistungen in Bezug auf die von ihnen verursachten negativen Externalitäten, wie beispielsweise Emissionen in die Umwelt, zur Verantwortung zu ziehen.

Seitdem werden Begriff wie Nachhaltigkeit oftmals verwendet, auch wenn diese in vielen Fällen weder stichhaltig belegt noch zutreffend sind wie am Beispiel des „Bio-Kunststoffes“ gezeigt werden soll. Oftmals kommt es zu Umweltbelastungen, die nicht nur am jeweiligen Produktionsstandort anfallen, sondern auch bei den Lieferanten, Kunden oder bei der Endentsorgung. Die Ergebnisse der Emission entlang des Lebensweges lassen Bewertungen zu, welches Produkt „klimafreundlicher“ ist, an welchen Stellen der Wertschöpfungskette Einsparungspotenzial besteht oder was im Laufe des Produktlebens unternommen werden kann, um die Klimawirkungen weitestgehend zu minimieren. Um eine bessere Belastbarkeit und Nachprüfbarkeit des unternehmerischen Handelns unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit zu ermöglichen, wurden standardisierte Analysemethoden erarbeitet, auf welche im weiteren Verlauf dieses Abschnittes genauer eingegangen werden soll. Darüber hinaus schaffen Gesetze und Verordnungen, wie der europäische Emissionshandel von Treibhausgasen beispielsweise, einen administrativen Rahmen, um die Überprüfung und Begrenzung von Emissionen nachzuweisen.¹³

Abbildung 2-1 stellt eine Übersicht der Interaktion zwischen Daten, Management und Umweltaspekten eines Unternehmens dar, um vorab schon einen Einblick in den Inhalt des kommenden Kapitels zu geben.

¹¹ Hofmeister, S. (1998), S.338

¹² OECD (2008), S.24

¹³ Haubach, C. (2013), S.V f.

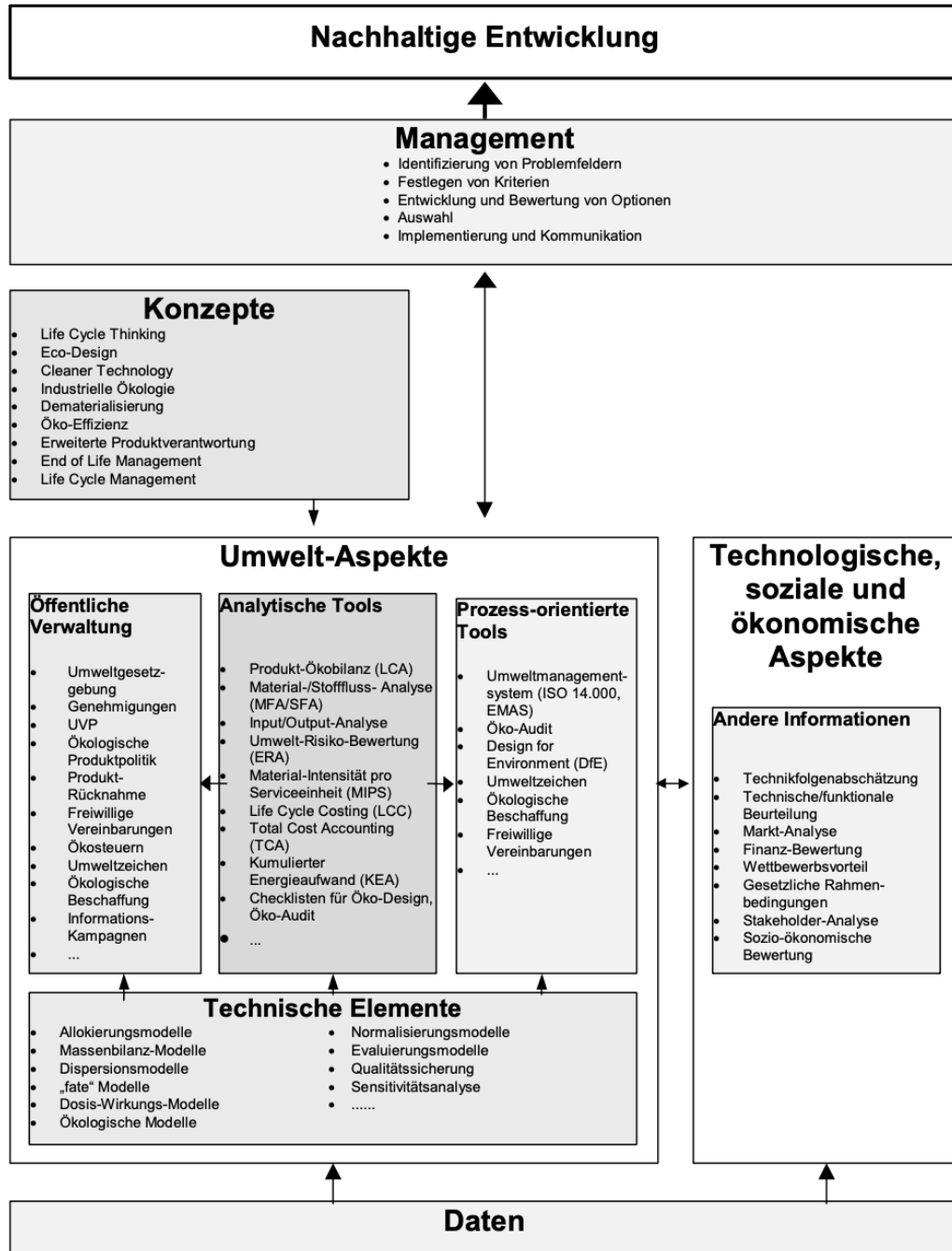


Abbildung 2-1 Überblick über das Zusammenwirken verschiedener Bereiche der ökologischen Unternehmensbewertung¹⁴

Das folgende Kapitel legt das Hauptaugenmerk darauf einige Grundlagen der ökologischen Bewertung zur Quantifizierung der Nachhaltigkeitsbestrebungen zu erarbeiten und deren Vor- und Nachteile zu beleuchten. Ein Schwerpunkt wird dabei auf die Lebenszyklusanalyse gelegt und die für diese Arbeit relevanten

¹⁴Quelle: BMVIT (2003), S.9

Bewertungsmethoden. Des Weiteren sollen wichtige Aspekte, die mit dieser Thematik im Zusammenhang stehen, diskutiert werden.

2.1 Lebenszyklusdenken

Der bereits angesprochene Brundt-Landbericht der UN beinhaltet die zentrale Aussage, dass nur ein Paradigmenwechsel der sozialen und ökonomischen Entwicklung den Schutz und die Erhaltung der Umwelt gewährleisten kann und hat damit das Konzept der nachhaltigen Entwicklung begründet. Auch die „Agenda 21“ welche in Rio de Janeiro auf der UN-Konferenz verabschiedet wurde schlägt in die gleiche Kerbe und bietet mit der Einführung eines Umweltmanagementsystems eine europaweite, einheitliche Basis zur Umsetzung auf Unternehmensebene.¹⁵

Ein vielfach angeführtes und zentrales Konzept in Bezug auf Nachhaltigkeit stellt das Interagieren der „drei Säulen“, Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt, dar. Denn mit unseren Handlungen und deren Auswirkungen auf die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft tragen wir nicht nur zur heutigen Situation bei sondern müssen auch das Wohlergehen der zukünftigen Generationen sicherstellen.¹⁶ Nachhaltigkeit bedeutet in diesem Zusammenhang nicht nur Umweltschutz. Die drei Säulen sollen dazu beitragen ein ganzheitliches und umfassendes Zukunftskonzept sicherzustellen.¹⁷

Um eine fundierte Entscheidung in Bezug auf Nachhaltigkeit treffen zu können benötigen Entscheidungsträger Möglichkeiten, um die Folgen auf alle drei Aspekte, allen voran die Umwelt, abschätzen zu können und so im Entscheidungsprozess mit zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang treten jedoch oft Konflikte zwischen Ökologie und Ökonomie auf, denn das umweltfreundlichste Produkt ist nicht immer das, das von Konsumenten favorisiert wird. Die Bewertung mit Hilfe von Instrumenten wie der Ökobilanz soll helfen eine höhere Rationalität in umweltpolitische Entscheidungen einzubringen.¹⁸

Unabhängig davon welche Bewertungsmethoden zur Sicherstellung des nachhaltigen Wirtschaftens genutzt werden, führt die gegenwärtige Fragmentierung der Lieferkette, die sich durch die Aufteilung der Arbeitsschritte entlang der Wertschöpfungskette manifestiert, dazu, dass sich auch die Entstehung der Umwelteinwirkungen entlang dieser Kette verschieben. Dieser Aspekt wird weiter verkompliziert durch das „Outsourcing“ bei dem manche Produzenten nur mehr virtuell, durch den Erwerb der Rechte an Produkten, beteiligt sind. Dadurch wird die Zuordnung entstehender Emissionen oder ähnlicher Umweltbelastungen weiter erschwert. Darüber hinaus führt das „Offshoring“, ein produktionsökonomischer Makrotrend, zur vermehrten Fertigung von Produkten an billigen Standorten desselben Unternehmens.

Beide haben nicht nur das Problem der Zuordnung von Umweltauswirkungen gemein, sondern auch die Tatsache, dass oftmals nicht nur die Fertigungskosten im

¹⁵ BMVIT (2003), S.6

¹⁶ OECD (2008), S.3, S.27

¹⁷ Koch, S. (2012), S.XI

¹⁸ Ankele, K.; Meyerhoff, J. (1997), S.8

Bestimmungsland geringer sind, sondern vor allem die geringeren Ansprüche in Bezug auf den Umweltschutz oft ein ausschlaggebender Grund sind, wodurch es zu „Verschmutzungssoasen“ in weniger entwickelten Ländern kommt.¹⁹

Dieses Problem schlägt sich auch im EU-Emissionshandel nieder, in dem dieser Sachverhalt auch als „Carbon-Leakage“ bezeichnet wird.²⁰

Mit Hilfe einer Lebenszyklusanalyse, die sich mit allen involvierten Teilen der Prozesskette auseinandersetzt, kann unter anderem festgestellt werden, ob es sich bei einem betrachteten Produkt oder Unternehmen um eine tatsächliche Effizienzsteigerung beziehungsweise Emissionsminderung handelt, oder ob diese lediglich durch Verlagerungseffekte erreicht wurden. Um Entscheidungen für ein nachhaltiges und umweltgerechtes Wirtschaften umsetzen zu können, brauchen Unternehmen Ziele und Steuergrößen, dementsprechend Indikatoren, mit denen sich Handlungsfelder und Erfolg bemessen lassen. Umweltkennzahlen gehören daher zu den wichtigsten Instrumenten des Umweltmanagements.²¹

2.2 Ökonomische und ökologische Unternehmensleistung

Bei Kennzahlen, welche oftmals zur Unternehmensbewertung herangezogen werden, handelt es sich im weiteren Sinne um quantitative Informationen, für spezifische Bedürfnisse, die für die Unternehmensanalyse oder Steuerung aufbereitet worden sind. Im engeren Sinne handelt es sich bei Kennzahlen um Informationen oder Größen die stark verdichtet wurden, um in präziser Form über einen zahlenmäßigen Sachverhalt zu berichten.²²

Verschiedene betriebliche Kennzahlen werden zur Darstellung der finanziellen Performance im Rahmen eines ökonomischen Kennzahlensystems verwendet. Ein Beispiel ist das Kennzahlensystem von der Firma DuPont, welches bereits 1919 eingeführt wurde und in Abbildung 2-2 gegeben ist²³

¹⁹ Haubach, C. (2013), S.2 f.

²⁰ European Commission, https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/allowances/leakage_en (Zugriff: 27.03.2021)

²¹ Haubach, C. (2013), S.3 f.

²² Gladen, W. (2003), S.12 f.

²³ Haubach, C. (2013), S.13

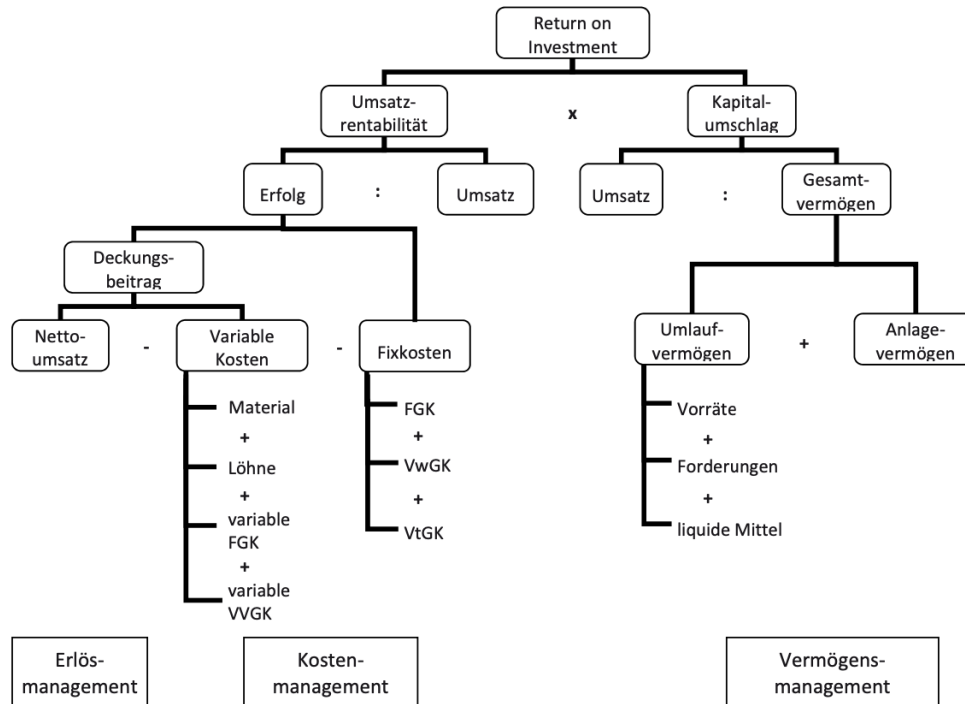


Abbildung 2-2 DuPont-Kennzahlensystem²⁴

Alle Informationen, welche für die Berechnung dieser Kennzahlen benötigt sind, werden im Rahmen des betrieblichen Rechnungswesens erhoben und durch die Gewinn- und Verlustrechnung und die Bilanz, dem Jahresabschluss, zur Erfolgsermittlung genutzt.

Es handelt sich dabei um den Ansatzpunkt zur Bestimmung der ökonomischen Unternehmensleistung und kann, je nach Adressat, zwischen internem und externem Rechnungswesen unterschieden werden. Des Weiteren kann die Unternehmensleistung, neben den klassischen Zielen wie etwa Gewinnmaximierung, auch andere langfristige Ziele beinhalten und deswegen kurzfristig von der Gewinnorientierung abweichen. Um diese weitläufige betriebliche Performance zu erfassen, wurde das Konzept der Balanced Scorecard entwickelt, wodurch die Dominanz der Finanzzahlen ausgeglichen werden soll, indem zusätzliche Aspekte wie Kundenwünsche, Ressourcenschonung und Wachstum mit einbezogen werden. Dies ermöglicht die strategische Ausrichtung in unterschiedliche Bereiche, wie etwa Nachhaltigkeit, und bietet eine Möglichkeit zur Erfolgskontrolle der ergriffenen Maßnahmen.²⁵

Durch das Aufkommen der Nachhaltigkeitskonzepte im Bereich des Rechnungswesens, wurden ökonomische, ökologische und soziale Aspekte in die Berichterstattung und Bilanzierung integriert. Diese beinhaltet unter anderem die Anfertigung von Nachhaltigkeitsberichten und in die Einführung der „Tripple Bottom Line“, die die erweiterte Nachhaltigkeitsperformance darstellt und sich in der Balanced Scorecard widerspiegelt. Diese wird dadurch zur „Sustainability Balanced Scorecard“

²⁴ Quellen: Gladen, W. (2003), S.93

²⁵ Haubach, C. (2013), S.14 ff.

weiterentwickelt. Bereits in den 1970er-Jahren wurde die Umweltperformance, in Form von betrieblichen Umweltbilanzierungssystemen oder durch Bewertung von Inputs und Outputs in gemischten Einheiten der Emissionsbilanzierung, in das betriebliche Rechnungswesen integriert. Dies beinhaltete bereits die Grundzüge des später entwickelten ökologischen Rechnungswesens, welches physische Informationen über Energie-, Wasser-, Material-, oder Produktflüsse enthält, aber auch monetäre Informationen zu Umweltkosten oder Umweltschutzprojekte mit einbezieht. Eine wichtige Rolle spielte dabei, die bereits zuvor erwähnte, UN-Konferenz in Rio de Janeiro aus deren Anlass die Normserie ISO 14.000 entwickelt wurde. Der erste Standard dieser Reihe beinhaltete die Normung der Umweltmanagementsysteme, wobei diese, wider der Erwartungen, nicht so erfolgreich umgesetzt und akzeptiert wurden, wie die zuvor eingeführten Qualitätsmanagementsysteme. Dennoch stellen sie die Grundlage zur Umweltberichterstattung und zur Messung der Umwelleistung dar.²⁶

2.3 Methoden der Umwelleistungsbewertung

Die Auswahl und Anwendung von Umweltkennzahlen hängt wesentlich von dem vorgesehenen Zweck ab, dieser kann neben Dokumentation und Berichterstattung, auch Einbindung der Stakeholder beinhalten. Je nach Branche können unterschiedliche Kennzahlen relevant sein, weswegen eine Festlegung auf einheitliche Indikatoren schwierig ist. Die wichtigsten Kennzahlen im Bereich der Umweltwirkungen werden unter dem Begriff der „Key-Performance Indicators“ zusammengefasst. Eine Möglichkeit zur Erfassung der betrieblichen Ökoeffizienz ist es die externen Effekte, wie Emissionen, des ökologischen Aufwandes als Schadschöpfung zu bezeichnen. Unter diesem Begriff werden alle während des Produktlebens verursachten Umweltbelastungen zusammengefasst. Die Ökoeffizienz lässt sich dann wie folgt errechnen:

$$\text{Ökoeffizienz} = \frac{\text{Wertschöpfung}}{\text{Schadschöpfung}}$$

Dieser Zusammenhang zeigt, dass sowohl eine Steigerung der Produktivität als auch eine Steigerung der ökologischen Effizienz den gleichen Effekt haben. Dies ist besonders für die Kreislaufwirtschaft eine entscheidende Feststellung, denn durch Schließen der Stoffkreisläufe kann sowohl die Wertschöpfung gesteigert, als auch die Schadschöpfung gemindert werden. Dieser Sachverhalt wird auch als doppelte Dividende bezeichnet. Durch passende politische Rahmenbedingungen ist es so möglich durch das Implementieren der Kreislaufwirtschaft die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen zu steigern.²⁷

²⁶ Haubach, C. (2013), S.19 ff.

²⁷ Haubach, C. (2013), S.31 ff.

2.4 Systemgrenzen

Beinahe jegliche wirtschaftliche Aktivität ist mit Umweltbeanspruchungen und Belastungen verbunden, die je nach Schadstoff auf verschiedene Wirkungskategorien, wie Klimawandel oder Bodenversauerung, Einfluss haben. Diese Schadstoffe fallen in unterschiedlichen Produktionsstufen an und werden nicht immer kumulativ entlang der gesamten Wertschöpfungskette betrachtet. Sowohl die indirekten, als auch die direkten Emissionen fallen jedoch in allen Produktionsstufen an und sollten daher entlang des gesamten Lebensweges betrachtet werden. Auch in diesem Fall muss nach Bezugspunkt unterschieden werden, so verlangt der Vergleich verschiedener Produktalternativen, wie beispielsweise unterschiedliche Verpackungsmaterialoptionen, eine andere Herangehensweise und Systemgrenzen-Definition als der Vergleich zweier unterschiedlicher Produktionsschritte.²⁸

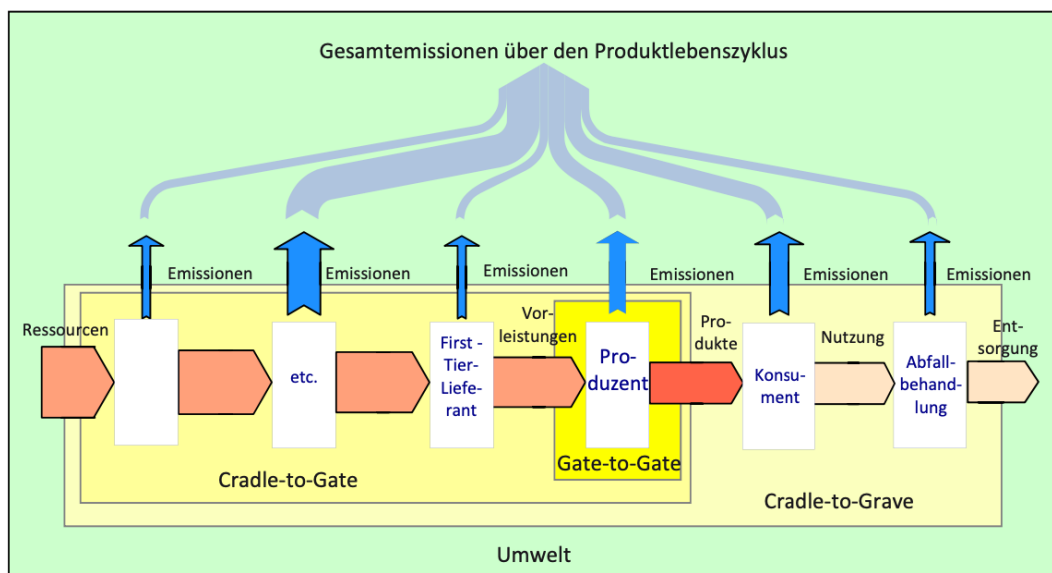


Abbildung 2-3 Emissionen entlang der Lieferkette und mögliche Bilanzgrenzen²⁹

Da jedoch oftmals ein nicht unbedeutender Anteil der Emissionen außerhalb des Betrachtungsrahmens der Produzenten anfällt und viele der Umweltauswirkungen auf die Entsorgungsphase entfallen ist die vollständige Bewertung eines Produktes oder einer Dienstleistung nur durch Lebenszyklusanalysen gewährleistet.³⁰

Die Festlegung der Systemgrenzen ist nicht unbedingt eine Banalität, da einerseits eine ausreichende Tiefe der Analyse von Nöten ist und andererseits keine unnötige Ausweitung der Grenzen vorgenommen werden sollte, da diese oftmals die Komplexität des Modells erhöhen, ohne einen entscheidenden Beitrag zu den Umwelteinflüssen zu leisten. Auch die Unsicherheiten nehmen bei einer Vergrößerung des Modells weiter zu,

²⁸ Haubach, C. (2013), S.43

²⁹ Quelle: Vgl. Schmidt (2009) S.20, entnommen nach Haubach, C. (2013), S.43

³⁰ BMVIT (2003), S.6

weil automatisch mehr Annahmen und Input-Daten nötig sind, wodurch unter Umständen engere Systemgrenzen weit ausgedehnten vorzuziehen sind.³¹

2.5 Lebenszyklusbezogene Umweltleistungsbewertung

Die lebenszyklusbezogenen Emissionserfassungen sind ein Teil der Umweltleistungsbewertung, auf dem im nachfolgenden Abschnitt genauer eingegangen werden soll, weil sie, wie bereits erwähnt, vor allem für die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von unterschiedlichen Produktalternativen attraktiv sind.

Unter dem Begriff der „Produktbezogenen Umweltinformationssysteme“ wird die Zusammenfassung von Gestaltungs- und Informationsinstrumenten, die für die Betrachtung der Umweltauswirkungen von Produkten von der „Wiege bis zur Bahre“ („Cradle to grave“) genützt werden können, verstanden.³² Tabelle 2-1 gibt eine Zusammenfassung der wichtigsten produktbezogenen Umweltinformationssysteme (PUIS).

Tabelle 2-1 Produktbezogene Umweltinformationssysteme³³

PUIS-Kategorie	PUIS
Umweltbezogene Entscheidungs- und Informationsinstrumente	Umweltkennzahlen, Benchmarking
	Checkliste, Spinnendiagramme, Matrizen
	Stoffausschlusslisten
	Input-Output-Analyse
	Materialflussanalyse, Stoffflussanalyse
	Umwelt-Risiko-Analyse
	Risiko Analyse
Allgemeine Entscheidungs- und Informationsinstrumente	ABC- Analyse
	Kosten-Nutzen-Analyse
	Nutzwertanalyse
	Mulit-Kriterien-Analyse
	Nachhaltigkeitskompass
Betriebswirtschaftliche Methoden	Umweltkostenrechnung
	Life Cycle Costing, Full Cost Accounting

³¹ Pennington, D. W. et al. (2004), S.727

³² BMVIT (2003), S.16

³³ Quelle: angelehnt an BMVIT (2003), S.16 f.

	Flusskostenrechnung
Ökologische Produktbewertung – Lebenszyklusbasierte Methoden	Life Cycle Inventory
	Life Cycle Impact Assessment
	Methode der ökologischen Knappheit, Umweltbelastungspunkte
	Kritische Volumina
	Environmental Priority Strategies
	Eco Indicator
Ökologische Produktbewertung – Eindimensionale Methoden	Kumulierter Energieaufwand
	Materialinput pro Service
	Sustainable Process Index
	Ökologischer Fußabdruck

Viele der Methoden, die auf dem Lebenszyklusmodell basieren, gründen im Wesentlichen auf der Basis der Stoffstromanalysen und unterscheiden sich unter anderem durch ihren Bezugspunkt. Der Bezugspunkt ist auf der Makroebene auf einen Wirtschaftszweig ausgerichtet, auf der Mesoebene auf Unternehmen und auf der Mikroebene auf Produkte. Einer Stoffstromanalyse liegt im Wesentlichen das Prinzip physikalischen Bilanzierung zugrunde. Es handelt sich um eine systematische Bestandsaufnahme des Weges eines chemischen Elementes, einer Verbindung oder eines Materials in der Natur und/oder in einem Wirtschaftskreislauf. Dieses Vorgehen kann auch auf Emission ausgeweitet werden und alle relevanten Vorleistungen, wie den Erzabbau oder die Granulatherstellung bei Kunststoffen, miteinbeziehen.³⁴

2.5.1 Ökobilanz

Auf die Ökobilanz wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels genauer eingegangen, weil sie die Grundlage der hier verwendeten Methodik und daher für diese Arbeit von besonderer Bedeutung ist. Die anderen hier erwähnten Methoden werden nicht weiter erläutert und es sei dabei auf die, in diesem Kapitel angeführte, Literatur verwiesen.

Laut der definierenden DIN EN ISO 14040 ist die Ökobilanz folgendermaßen definiert: „Die Ökobilanz bezieht sich auf die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen [...] im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung [...]“.³⁵ Während eine ständige Weiterentwicklung in Bezug auf Ökobilanzen und deren Durchführung stattfindet, so gelten die in den DIN EN ISO 14000 Serie festgelegten

³⁴ Haubach, C. (2013), S.46 f.

³⁵ DIN EN ISO 14040 , S.8

Normen als generelle Rahmenbedingungen für diese und werden dahin gehend auch weitestgehend akzeptiert.³⁶ Die Ökobilanz, auch oft als „Life-Cycle-Assessment“ (LCA) bezeichnet, ist ein dynamischer vernetzter Prozess und kann in vier Phasen aufgeteilt werden, diese umfassen:³⁷

- Phase der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Sachbilanz – Phase
- Phase der Wirkungsabschätzung
- Phase der Auswertung

Der Untersuchungsrahmen, insbesondere die Systemgrenzen, sowie der Detailgrad, welche in der ersten Phase festgesetzt werden, hängen von dem Verwendungszweck der Studie ab. Wobei einige wichtige Aspekte der Festlegung der Systemgrenzen bereits in Abschnitt 2.4 angeführt wurden. Die zweite Phase der LCA, die Sachbilanz, beschäftigt sich mit den Prozessen und den mit ihnen verbundenen Stoff- und Energieflüssen, innerhalb der zuvor festgelegten Systemgrenzen. Hierfür werden Prozessdaten gesammelt, recherchiert und Allokationsregeln für Kuppelprozesse festgelegt. Die Aggregation der Daten der Sachbilanz wird in einem Lebenszyklusinventar verwirklicht. Die zuvor gesammelten Daten zu den Stoff- und Energieströmen werden dabei auf die funktionelle Einheit des jeweiligen Produktes oder der jeweiligen Dienstleistung skaliert.³⁸

Eines der größten Probleme einer LCA ist das Thema der Datenakquise und -nutzung. Es kann dabei grundsätzlich zwischen spezifischen Daten, prozessbezogenen beziehungsweise individuellen Daten und generischen Daten unterschieden werden. Generische Daten stellen dabei eine Aggregation verschiedener Prozesse durch Mittelwertbildung dar. Generische Daten beinhalten Datensätze aus komplexen Wertschöpfungsketten und deren direkte sowie indirekte Emissionen. Diese Daten können aus Datenbanken, wie etwa der für diese Studie genutzten Ecoinvent³⁹ Datenbank, entnommen werden. Ist die Verwendung von Datenbanken möglich, so ist die Datensammlung und Beschaffung erleichtert, jedoch geht damit auch eine gewisse Ungewissheit, bezogen auf die Datenqualität, einher. Die generierten und hinterlegten Daten hängen oft stark von der Setzung der Systemgrenzen, den unterstellten Nutzungsszenarien, wie beispielsweise die Recycling Option im Vergleich zur Abfallverbrennung, sowie der angewandten Allokationsmethode ab.⁴⁰

Obwohl die Normierung durch DIN EN ISO 14040⁴¹ und 14044⁴² Rahmenbedingungen für Ökobilanzen sowie die dazugehörige Datenakquise geschaffen haben, können die zuvor genannten Faktoren immer noch zu Unterschieden in den Ergebnissen führen.⁴³

³⁶ Rebitzer, G. et al. (2004), S.703

³⁷ DIN EN ISO 14040 , S.8 f.

³⁸ Haubach, C. (2013), S.48 ff.

³⁹ Ecoinvent, <https://www.ecoinvent.org/database/database.html> (Zugriff: 28.03.2021)

⁴⁰ Rebitzer, G. et al. (2004), S.707

⁴¹ DIN EN ISO 14040

⁴² Zentrum Ressourcen Effizienz

⁴³ Haubach, C. (2013), S.50 f.

Die dritte Phase der LCA, die Wirkungsabschätzung beziehungsweise Wirkungsbilanz, klassifiziert und bestimmt die Umwelteinträge nach ihrer Auswirkung. Für eine Ökobilanz ist charakteristisch, dass verschiedene Aspekte wie Rohstoffverbrauch, Ozonabbau, Versauerung, Treibhauseffekt und Humantoxizität untersucht werden. Die Wirkungsbilanz für den Treibhauseffekt wird hierbei oftmals über CO_2 -Äquivalente dargestellt. Auch hier haben die Zielsetzung der Ökobilanz, sowie die Interessengruppen einen entscheidenden Einfluss auf die untersuchten Bereiche.⁴⁴

Eine LCA stellt eine hinreichende Möglichkeit dar die Umwelteinwirkungen von Produkten zu beschreiben, jedoch ist ein anderer Bezugsrahmen, wie etwa Standort- oder Investitionsentscheidungen betreffend, oft problematisch. Um die LCA auf diese Anforderungen anzupassen wurde eine Unterscheidung zwischen „Attributional“ und „Consequential“ LCA vorgenommen. Die Attributional-LCA versucht alle auftretenden Umwelteinwirkungen der zuvor definierten funktionellen Einheit zuzuweisen. Die Consequential-LCA hingegen betrachtet die Wirkungen von Entscheidungen bezogen auf die Produktion der funktionellen Einheit. Deswegen ist es bei dieser Vorgehensweise nicht immer nötig die volle Tiefe der Wertschöpfungskette darzustellen. Es wird das Hauptaugenmerk darauf gelegt, die wichtigsten Umwelteinwirkungen zu untersuchen, die durch die jeweiligen Entscheidungen ausgelöst werden.^{45, 46}

2.5.2 Umweltbelastungspunkte

Die Methode der ökologischen Knappheit, auch Umweltbelastungspunkte, Stoffflussmethode, Ökopunkte oder aus dem Englischen entlehnt Ecological Scarcity genannt, bezeichnet eine Bewertungsmethode, die in den 80er Jahren in der Schweiz entwickelt wurde. Dabei wird das Verhältnis zwischen den gegenwärtigen Umweltbelastungen und jenen, die als kritisch eingestuft werden, betrachtet. Die Emissionen werden dabei zu Umweltbelastungspunkten in Luft, Wasser und Boden, sowie für den Verbrauch von Energie-Ressourcen zusammengefasst. Der gegenwärtige Stofffluss dividiert durch den kritischen Fluss, welcher die maximale Belastungsgrenze des Ökosystems darstellt, ergibt die ökologische Knappheit dieser Belastung. Die Definition der kritischen Flüsse ist der Kernpunkt dieser Vorgehensweise und hängt in der Praxis oft von umweltpolitischen Vorgaben ab.⁴⁷

2.5.3 Intergovernmental Panel for Climate Change

Der relative Beitrag verschiedener Schadstoffe zum Klimawandel wird innerhalb von LCAs mittels des „Global Warming Potentials“ (GWP) berechnet. Diese GWPs werden auf eine Masseneinheit Kohlendioxid bezogen. Hat ein Material das Global Warming Potential von 100 bezogen auf 500 Jahre, so bedeutet das, dass ein Kilogramm dieses

⁴⁴ Haubach, C. (2013), S.51 f.

⁴⁵ Haubach, C. (2013), S.51

⁴⁶ Rebitzer, G. et al. (2004), S.705

⁴⁷ BMVIT (2003), S.61

Stoffes die gleiche Wirkung auf den Klimawandel hat wie 100kg Kohlendioxid für den gleichen Zeithorizont. Das Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) rät zu einem Zeithorizont von 100 Jahren (GWP 100a), wobei auch Werte für andere Zeithorizonte zur Verfügung gestellt werden.⁴⁸

⁴⁸ Pennington, D. W. et al. (2004), S.728

3 Einblicke in das Verpackungswesen

Der Begriff Verpackung bezieht sich laut der österreichischen Rechtsvorschrift für Verpackungsverordnungen auf: „[...] aus verschiedenen Packstoffen hergestellte Packmittel, Packhilfsmittel oder Paletten zur Aufnahme, zum Schutz, zur Handhabung, zur Lieferung und zur Darbietung von Waren“.⁴⁹

Die Menge an Materialien, die für Verpackungen verwendet wird, steigt kontinuierlich und hat im Jahr 2017 bereits einen Wert von 173kg pro Einwohner in der EU erreicht.⁵⁰ In dem folgenden Kapitel wird genauer auf das Verpackungsaufkommen und die Materialien, die damit im Zusammenhang stehen und in dieser Arbeit genauer untersucht werden, eingegangen. Es ist von besonderer Bedeutung die Komplexität der Materie zu beleuchten, die mit den neuen EU-Vorgaben zur Kreislaufwirtschaft und Einsparung von CO₂ einhergehen. Daher soll im Folgenden genauer darauf eingegangen werden, welche Materialien am häufigsten als Verpackungsmaterialien eingesetzt werden und warum.

Die gegenwärtigen Abfallsammelsysteme haben einen großen Einfluss auf die Kreislaufwirtschaft und sollen im Weiteren kurz unterschieden beziehungsweise erläutert werden. Die Möglichkeiten, die sich durch Veränderungen und neue Herausforderungen am Verpackungsmarkt für die EU ergeben können, sollen hervorheben, wie wichtig es ist bereits zum jetzigen Zeitpunkt eine Vorreiterrolle einzunehmen, um nicht nur mit gutem Beispiel voran zu gehen, sondern auch um die Position am Weltmarkt sicherzustellen.

3.1 Kreislaufwirtschaft

Es wird erwartet, dass der weltweite Verbrauch an Biomasse, fossilen Energieträgern, Metallen und seltenen Erden sich innerhalb der nächsten 40 Jahre verdoppelt, während die Entstehung von Abfällen, bis ins Jahr 2050, um 70% zunimmt.⁵¹ Dies ergibt sich daraus, dass viele Produkte eine größere Lebensspanne aufweisen und daher erst zu einem späteren Zeitpunkt wieder als Abfall in der Statistik auftauchen. Mit der Schaffung einer stärker kreislauforientierten Wirtschaft soll der Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen so lange wie möglich innerhalb der Wirtschaft gehalten werden und dadurch gleichzeitig möglichst wenig Abfall erzeugen.⁵² Die Kreislaufwirtschaft soll durch die Wieder- und Weiterverwertung von Ressourcen Unternehmen in der EU wettbewerbsfähiger machen, weil diese nicht mehr mit Ressourcenknappheit und Preisschwankungen konfrontiert werden und sich dadurch gleichzeitig neue Geschäftsmöglichkeiten entwickeln können, sowie dauerhafte Wettbewerbsvorteile für

⁴⁹ Verpackungsverordnung, §3, 1. (2014)

⁵⁰ European Commission (2020), S.11

⁵¹ European Commission (2020), S.4

⁵² European Commission (2015), S.2

Europa geschaffen werden.⁵³ Eine Möglichkeit, wie eine verstärkte Kreislaufwirtschaft die Wertschöpfung erhöht, wurde bereits in Abschnitt 2.3 kurz angesprochen.

Rund 80% des Umwelteinflusses eines Produkts wird bereits in der Designphase festgelegt. Unternehmer haben zum gegenwärtigen Zeitpunkt zu wenig Anreize und Zwang ihre Produkte kreislauffähig zu entwerfen was dazu führt, dass Produkte nur für die einmalige Verwendung gestaltet werden und daher entweder schnell kaputt gehen, beziehungsweise kaum oder nur schwer repariert werden können und in vielen Fällen nach ihrer Nutzungsphase auch schwer zu recyceln sind.⁵⁴

Dieser Sachverhalt führt zum gegenwärtigen Zeitpunkt dazu, dass oftmals gar nicht mehr versucht wird Gegenstände zu reparieren, weil diese einerseits zu relativ niedrigen Preisen einfach ersetzt werden können und andererseits eine Reparatur oft gleich viel, wenn nicht sogar mehr kostet als eine Neuanschaffung. Ziel des Konzeptes der Kreislaufwirtschaft der EU ist es, deutliche Signale an die Wirtschaft und die Gesellschaft zu senden, um mit langfristigen Abfallbewirtschaftungszielen und einem Paket konkreter Maßnahmen einen Schritt in Richtung klimaschonender Zukunft zu machen.⁵⁵ Die Gesetzesvorschläge, welche in Zusammenhang mit dem Aktionsplan stehen, umfassen langfristige Ziele zur Verringerung von Abfällen auf Deponien, um eine verbesserte Wiederverwendung und auch eine leichtere Vorbereitung zum Recycling für wichtige Abfallströme, wie Siedlungs- und Verpackungsabfälle, zu ermöglichen.⁵⁶

Der Hauptpunkt dieser legislativen Aktion soll darin bestehen, die „Eco-Design-Direktive“ weiter auszubauen, um so die Rahmenbedingungen für Eco-Designs für eine breite Masse an Produkten zu ermöglichen und so eine Kreislaufführung sicherzustellen. Ein Teil dieser Maßnahmen könnte es sein, dass die EU beispielsweise Nachhaltigkeitsprinzipien einführt, welche unter anderem die folgenden Aspekte regulieren sollen:⁵⁷

- Verbesserung der Langlebigkeit, der Wiederverwendbarkeit, der Aufwertungsmöglichkeit und der Reparaturmöglichkeit der Produkte, sowie erhöhte Aufmerksamkeit für gesundheitsschädliche Chemikalien in Produkten und für deren Energie- und Ressourceneffizienz
- Erhöhung des Rezyklatanteils in Produkten
- Ermöglichen einer Wiederverwertung und einer hohen Recycling-Qualität
- Reduktion des CO₂-Fußabdruckes sowie des gesamten Umwelteinflusses
- Restriktion von Einwegverwendungen
- Einführung eines Verbotes zur Vernichtung von unverkauften, haltbaren Produkten
- Implementierung eines Modells bei dem Hersteller in Besitz des Produktes bleiben beziehungsweise Verantwortung für dessen Beiträge während des Lebenszyklus besitzen
- Förderung von digitalen Lösungen zur Produktinformation, wie beispielsweise Wasserzeichen

⁵³ European Commission (2015), S.2

⁵⁴ European Commission (2020), S.6

⁵⁵ European Commission (2015), S.2

⁵⁶ European Commission (2015), S.3

⁵⁷ European Commission (2020), S.6 f.

- Preisgestaltung beziehungsweise Förderung von Produkten basierend auf deren Nachhaltigkeitsperformance

Kunststoffe stellen in diesem Zusammenhang eine der fünf priorisierten Gebiete im EU-Aktionsplan zur Kreislaufwirtschaft dar.⁵⁸ Es setzt beispielsweise die EU-Einwegkunststoff-Richtlinie 2019 fest, dass konkrete Maßnahmen zur Reduktion von Einwegkunststoffartikeln getroffen werden sollen und, wo es möglich ist, Mehrwegverpackungen zu verwenden sind, so müssen beispielsweise PET-Flaschen bis zum Jahr 2015 zu 25% und bis zum Jahr 2020 zu 30% aus recyceltem Kunststoff bestehen.⁵⁹ Darüber hinaus wurde unter anderem festgelegt, dass Einweggetränkeflaschen aus Kunststoff bis zum Jahr 2025 zu 77% und bis zum Jahr 2029 zu 90% einer getrennten Sammlung zuzuführen sind.⁶⁰ In der EU-Verpackungsrichtlinie wurden mit der Novelle 2018 neue Ziele für die Recyclingraten gesteckt, wodurch im Jahr 2030 70% aller Verpackungen recycelt werden soll und bei Kunststoffverpackungen ein Mindestwert bis 2025 von 50% beziehungsweise 2030 von 55% recycelt werden soll.⁶¹

Möglichkeiten wie diese ehrgeizigen Ziele umgesetzt werden können und worin einige der Probleme bestehen, werden in Kapitel 8 angesprochen. Eine anschauliche Darstellung der beschriebenen Ziele und der momentanen Situation der Länder, bezogen auf die Verwertungswege für Kunststoffe, Deponierung, stoffliches und thermisches Recycling, auf die im Abschnitt 5.4 genauer eingegangen wird, ist in Abbildung 3-1 abgebildet.

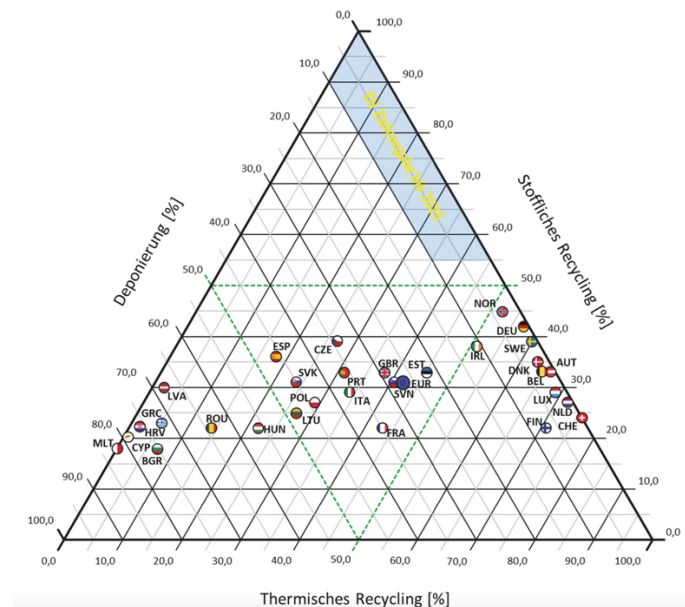


Abbildung 3-1 Verwertungswege für Kunststoffe in den Ländern Europas 2018⁶²

⁵⁸ Van Eygen, E. et al. (2018), S.1

⁵⁹ Schaffernak, M. A. et al. (2020), S.14

⁶⁰ Schaffernak, M. A. et al. (2020), S.14

⁶¹ European Commission (2015), S.6 ff.

⁶² Quelle: Lechleitner, A. et al. (2020), S.49

Die antizipierten Ziele sind vielseitig und erfordern eine Umsetzung durch langfristiges Engagement und Vorausdenken auf allen Ebenen, den Mitgliedstaaten der EU, den Regionen, Städten, Unternehmen und der Bürger.⁶³ Wie kompliziert sich dieser Sachverhalt mit der momentan vorherrschenden Konzeption darstellt, soll im folgenden Abschnitt anhand der Thematik der gegenwärtig Anwendung findenden Abfallsammelkonzepte innerhalb Österreichs dargestellt werden, bevor in späteren Abschnitten dieser Arbeit auf Probleme, technischer, ökologischer, sowie ökonomischer und sozialer Sicht eingegangen wird.

3.2 Abfallsammelkonzepte

Der folgende Abschnitt soll in aller Kürze das Thema Abfallsammelkonzepte in Österreich aufgreifen und im Zuge dessen einerseits die Möglichkeiten zur Umsetzung der neuen EU-Richtlinie aufzuzeigen und andererseits auch gleichzeitig eine der größten Schwachstellen unseres Systems offenlegen.

Wenn es um Abfalltrennung geht, gehen die Meinungen der Bürger teils drastisch auseinander. Manchmal wird die Ansicht vertreten, dass das Trennen sinnlos ist, es würde hinterher sowieso alles wieder zusammengeworfen. Dass diese Aussage weit gefehlt ist zeigt die jährliche Sammlung und Verwertung von 350.000 Tonnen Altstoffen, wie Plastikflaschen, Dosen, biogener Abfall und Glas der Stadt Wien.⁶⁴

Während bei der Altglassammlung österreichweit Einigkeit herrscht, sieht es bei den anderen Verpackungsmöglichkeiten anders aus, denn „das Sammeln und Verwerten von Verpackungen ist Sache von Gemeinden, der Müll wird ganz unterschiedlich entsorgt“.⁶⁵ Gerade im Bereich der Kunststoffverpackungen kommt es immer wieder zu Unklarheiten, verständlicherweise, denn während in Wien beispielsweise PET-Flaschen, Getränkekartons und Aluminiumdosen in einem öffentlichen Behälter, ähnlich jenen zur Glassammlung gesammelt werden, gehört in den gelben Sack der in vielen Gemeinden zur Entsorgung von Verpackungsabfällen genutzt wird jegliche Form der restentleerten Becher, beschichtete Papierverpackungen, wie Fleisch- und Wurstfolien, Blisterverpackungen von Wurstaufschnitten oder Medikamenten, Fleisch- und Gemüsetassen aus Kunststoff, PET-Flaschen und noch einiges mehr.⁶⁶ Eine Auflistung der unterschiedlichen gewünschten Inhalte wird in der nachfolgenden Tabelle 3-1 gegeben.

⁶³ European Commission (2015), S.3

⁶⁴ Stadt Wien -MA 48 -Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark, <https://www.wien.gv.at/umwelt/ma48/beratung/muelltrennung/mythen-muellentsorgung.html> (Zugriff: 15.03.2021)

⁶⁵ Ruzicka, J. (2016), S.1

⁶⁶ Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2019), S.10 f.; Stadt Wien -MA 48 - Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark (2019), S.9 f.

Tabelle 3-1 Unterschied zwischen „Gelbem Sack“ und „Gelbe Froschaugen Tonne“⁶⁷

Gelbe „Froschaugen“ Tonne



- Plastikflaschen für
 - PET- Getränkeflaschen
 - Flaschen für Wasch- und Putzmittel (PP und HDPE-Flaschen)
 - Behälter für Körperpflegemittel (Duschgel, Shampoo)
 - Plastikflaschen für Lebensmittel (Essig, Speiseöl)
 - Andere Plastikflaschen (Kühlmittel, destilliertes Wasser)

Dosen, Metallverpackungen

- Getränkedosen
- Konservendosen für Lebensmittel oder Tiernahrung
- Menüschilder aus Metall (Fertiggerichte)
- Andere Metallverpackungen (Alufolie)
- Kleinteilige Metall (<20cm)

Gelber Sack oder Gelbe Tonne



- Restentleerte Becher (Joghurt, Kaffee, Margarinebecker)
- Beschichtete Papierverpackungen wie Fleisch- und Wurstfolien
- Blisterverpackungen (Aufschnittwurst oder Medikamente)
- Einweggeschirr und -besteck aus Kunststoff
- Fleischtassen
- Gemüse und Obsttassen (aus Kunststoff)
- Getränkeverbundkartons (Tetrapacks)
- Kosmetikflaschen aus Keramik
- Schaumstoffverpackungen
- Sortiereinlegetassen (Kekse, Konfekt)
- Trinkbecher aus Kunststoff oder kunststoffbeschichtet
- Kunststoffkanister
- Kunststoffnetze (Zwiebel, Kartoffeln)
- PET-Getränkeflaschen (auch mit Biokunststoffanteil)
- Pflanzentöpfe und Foliencontainer
- Plastikflaschen für Getränke
- Plastikflaschen für Wasch- und Reinigungsmittel

⁶⁷ Quelle: in Anlehnung an Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2019), S.10 f.; Quelle: in Anlehnung an Stadt Wien -MA 48 -Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark (2019), S.9 f.

- Plastikflaschen für Körperpflegemittel
- Plastikflaschen auch mit Biokunststoffanteil
- Plastiksackerl
- Styropoverpackungen
- Verpackungsfolien
- Tiefkühlverpackungen mit Beschichtungen
- Zellopan

Nach einem Blick auf Tabelle 3-1 ist ersichtlich, dass es sich bei Abfalltrennung keineswegs um eine Banalität handelt und die unterschiedlichen Regulierungen nicht nur die Sortierung in den Haushalten beeinflussen, sondern auch alle danach folgenden Schritte, um die Stoffe in der Kreislaufwirtschaft zu halten oder nachzubehandeln.

Selbst das zuständige Ministerium gibt die Information aus, dass „Aufgrund der großen regionalen Unterschiede in der Sammlung und Weiterverarbeitung von Abfällen (besonders bei Kunststoffverpackungen und Metallen) die folgenden [...] Auflistungen nur grobe Richtlinien zur Abfalltrennung [...]“ sind.⁶⁸

Nicht zuletzt deswegen stellt die Ziele des EU-Kreislaufwirtschaftspakets zu erfüllen eine große Herausforderung dar und betrifft vor allem Kunststoffverpackungen. Nicht nur, weil deren Sammlungen teils verschieden sind, sondern auch, weil das Recycling von Kunststoffverpackungen in Österreich innerhalb der nächsten fünf Jahre verdoppelt werden muss, um die EU-Ziele bis 2025 zu erfüllen.⁶⁹

Während, wie bereits angesprochen, bei der Sammlung von Verpackungsabfällen auf Kunststoffbasis oftmals Uneinigkeit darüber herrscht, wie die Sammlung von statten geht, so wird Glasabfall in Österreich nach einem einheitlichen Model gesammelt.

Das liegt auch daran, dass es seit Jahren Praxis ist aus Altglas wieder Glasverpackungen herzustellen weswegen die Recyclingquote für Glasverpackungen bei über 80% liegt. Dieser Ersatz der Primärrohstoffe ermöglicht eine Reduktion des CO_2 -Ausstoßes um 7% pro 10% Altglas und eine gleichzeitige Verringerung des Energieverbrauchs um 3%. Um aus Altglas neue Glasverpackungen ohne Qualitätsverluste herzustellen ist es wichtig, dass zur Verwertung in der Glashütte nur Verpackungsglas, also Konservengläser, Flaschen und ähnliches, zum Einsatz kommen. Alle anderen anfallenden Glasabfälle wie etwa Spiegelglas, Vasen oder Porzellan gehören nicht in die Altglas Reststoffsammlung. Einen Überblick über diese ist in Tabelle 3-2 gegeben. Eine allseits bekannte Unterscheidung bei der Glassammlung

⁶⁸ Österreichs digitales Amt, https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/abfall/Seite.3790051.html (Zugriff: 15.03.2021)

⁶⁹ ARA, <https://www.ara.at/> (Zugriff: 15.03.2021)

ist die Trennung zwischen Weiß- und Buntglas, wobei im Zweifelsfall der Buntglasbehälter immer die richtige Wahl darstellt.⁷⁰

Tabelle 3-2 Altglassammel System⁷¹



Weißglas

Buntglas

- Arzneimittel- und Medikamentenfläschchen (leer)
- Bügelverschlussgläser/-flaschen
- Einwegflaschen
- Parfüm beziehungsweise Kosmetikflacons
- Konservengläser
- Kondensmilchflaschen
- Limonadenflaschen (Einweg)
- Wein- und Spirituosenflaschen (Einweg)

Was nicht dazu darf

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Arzneimittel- und Medikamentenfläschchen (mit Restinhalt) • Bierkapseln • Bleikristallglas (Karaffen, Vasen, Trinkgläser etc.) • Cerankochfelder • Deckeln • Drahtglas • Energiesparlampen • Rexglas • Leuchtstoffröhren/LED-Lampen • Porzellan | <ul style="list-style-type: none"> • Vasen • Verschlüsse • Windschutzscheiben • Fensterglas • Flachglas • Glasgeschirr • Glühbirnen • Kapseln • Keramik • Korken • Kronkorken • Kunststoffflaschen • Laborglas |
|--|---|

⁷⁰ Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2019), S.8 f.

⁷¹ Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2019), S.8 f.

- Spiegelglas
- Steingut Flaschen

Obwohl die Sammlung von Verpackungsglas gleich gehandhabt wird und die regionalen Unterschiede entfallen, ist die Frage welche Glasmaterialien erlaubt sind bei genauerer Betrachtung nicht so banal wie vielleicht vermutet wird. Ein Beispiel für eine Steingutflasche ist beispielsweise die Glasflasche des alkoholischen Getränkes Jägermeister⁷², sie gehört nicht in die Altglassammlung für Verpackungsglas, da sie die Glasschmelze beeinträchtigen, wie in Kapitel 6 genauer erläutert wird.⁷³

3.3 Kunststoffe

Kunststoffe sind aus unserer modernen Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Sie sind in ihren verschiedenen Erscheinungsformen beinahe omnipräsent.⁷⁴ Wir wollen nicht nur in vielen Aspekten unseres Lebens nicht mehr auf Kunststoff verzichten, sondern es ist auch in vielen Anwendungsgruppen entweder nicht möglich oder nur wenig sinnvoll. Inwiefern diese Aussage auf den Verpackungssektor zutrifft und wie wichtig Kunststoff für diesen ist, soll im Weiteren erläutert werden.

Die industrielle Großproduktion von Kunststoffen entwickelte sich ab dem Ende der 1930er Jahre und steigerte sich stetig, bis zur heutigen Zeit, in der sie eine Masse von über 300 Millionen Tonnen pro Jahr erreichte.⁷⁵ Bei diesen Mengen ist die Relevanz für den Menschen, die Umwelt und den Planeten als Gesamtes nicht zu leugnen. Besonders die Verwertung von Kunststoffabfällen, nachdem diese das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben, gewinnt immer mehr an Aufmerksamkeit und Bedeutung, nachdem sie zu den meistgenutzten Materialien weltweit avancierten.⁷⁶ Weltweit werden etwa 4% des geförderten Erdöls zur Kunststoffherstellung verwendet.⁷⁷ Die Menge an anthropogenen Treibhausgasen gilt als der Hauptfaktor in Bezug auf die globale Erwärmung und die Verwendung von Kunststoffen als Verpackungsmaterial, die im Schnitt in etwa 39% des Kunststoffverbrauches in Europa ausmachen, ist ein nicht unbedeutender Faktor in dieser Gleichung.⁷⁸

Der durchschnittliche Europäer erzeugte im Jahr 2009 im Schnitt 29kg Kunststoffabfall in Bezug auf Verpackungen und diese Tendenz ist gerade in der jetzigen Zeit stark steigend, weswegen es auch besonders wichtig ist die Produktion, den Verbrauch und die Entsorgung effizient und nachhaltig zu gestalten.⁷⁹

⁷² Jägermeister, <https://www.jagermeister.com/en/home> (Zugriff: 29.03.2021)

⁷³ Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2019), S.8 f.

⁷⁴ Kaiser, W. (2011), S.6 ff.

⁷⁵ Wöhrle, D. (2019), S.1

⁷⁶ Van Eygen, E. et al. (2018), S.1

⁷⁷ Eyerer, P. et al. (2008), S.12

⁷⁸ Dormer, A. et al. (2013), S.133 f.

⁷⁹ Dormer, A. et al. (2013), S.134

Eine Studie zum Abfallaufkommen hat gezeigt, dass bereits im Jahr 2013 eine deutliche Steigerung im Abfallaufkommen, bezogen auf Kunststoffverpackungen, zu verzeichnen war, in diesem Jahr erzeugte der durchschnittliche Österreicher 35kg Kunststoffabfälle aus Verpackungsmaterial, zum Großteil bestehend aus kleinen und großen Folien, sowie kleinen Hohlkörpern wie PET-Flaschen, die in etwa 19%/±4% ausmachten.⁸⁰

Im Jahr 2019 erreichte die Kunststoffproduktion bereits einen Wert von 370 Millionen Tonnen, wobei in Europa in etwa 58 Millionen davon hergestellt wurden.⁸¹ Das entspricht einer Steigerung von beinahe 10 Millionen Tonnen weltweit vom Jahr 2018 auf das Jahr 2019, wobei in Europa eine Reduktion von 61,8 Millionen Tonnen auf 57,9 Millionen Tonnen verzeichnet wurde.⁸² Die Aufteilung der weltweiten Kunststoffproduktion nach Ländern kann aus Abbildung 3-2 entnommen werden und zeigt, wie auch in vielen anderen Sektoren, den großen Einfluss Chinas auf die gesamte Entwicklung.

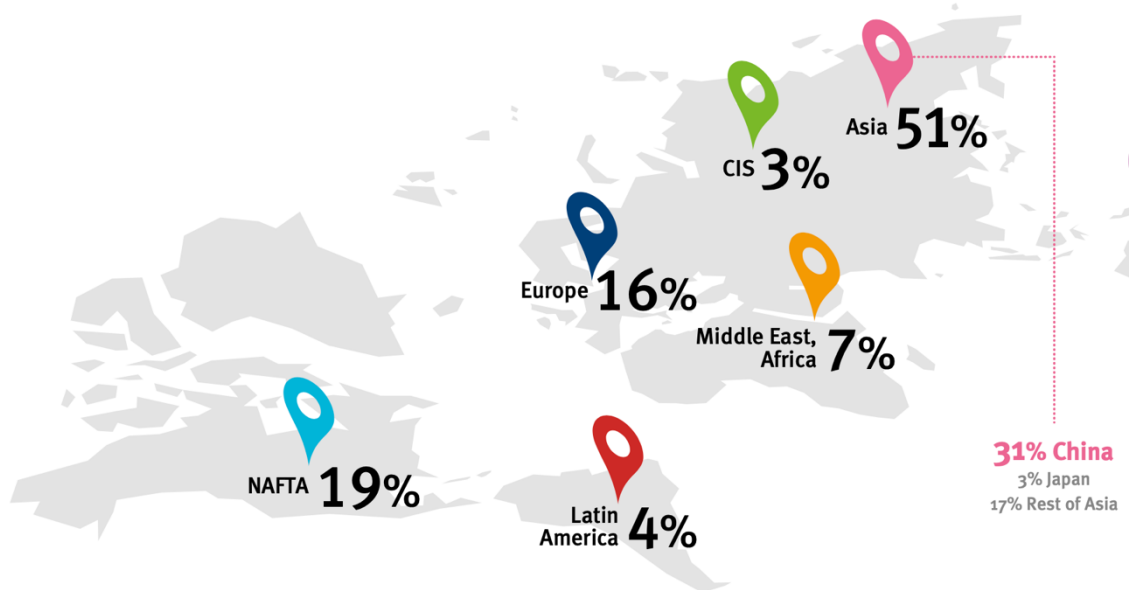


Abbildung 3-2 Verteilung der globalen Kunststoffproduktion von 368 Millionen Tonnen⁸³

Bei Kunststoffen handelt es sich um organische, hochmolekulare Verbindungen, welche entweder durch das Abwandeln hochmolekularer Naturstoffe oder durch das Aneinanderreihen niedermolekularer Grundbausteine, auch Monomere genannt, erzeugt werden können.⁸⁴ Sie entstehen durch eine chemische Reaktion, die sogenannte Polymerisation, bei der Monomere zu einem Polymer werden. Polymere sind ein relativ junger Werkstoff der, aufgrund seiner maßgeschneiderten Eigenschaften, jedoch sehr schnell einen Siegeszug begann und somit die Lücke zwischen den

⁸⁰ Van Eygen, E. et al. (2018), S.1

⁸¹ Plastics Europe (2020), S.16

⁸² Plastics Europe (2020), S.16

⁸³ Quelle: Plastics Europe (2020), S.17

⁸⁴ Eyerer, P. et al. (2008), S.1

natürlichen Werkstoffen wie Holz oder Keramik und den hochfesten, metallischen Werkstoffen zu füllen begann.⁸⁵

Durch das Einnehmen dieser Lücke haben sich Kunststoffe längst zu einer eigenen Werkstoffgruppe etabliert. Darüber hinaus zeigt sich eine eindeutige Korrelation zwischen der Produktion von Kunststoffen und der wirtschaftlichen, sowie technologischen, Leistungsfähigkeit einer Region, weswegen wir im 21. Jahrhundert im „Kunststoffzeitalter“ leben.⁸⁶ Aufgrund ihrer vielfältigen und variablen Eigenschaften bereichern Kunststoffe unser alltägliches Leben in vielen verschiedenen Bereichen, von denen einige in Abbildung 3-3 dargestellt sind.

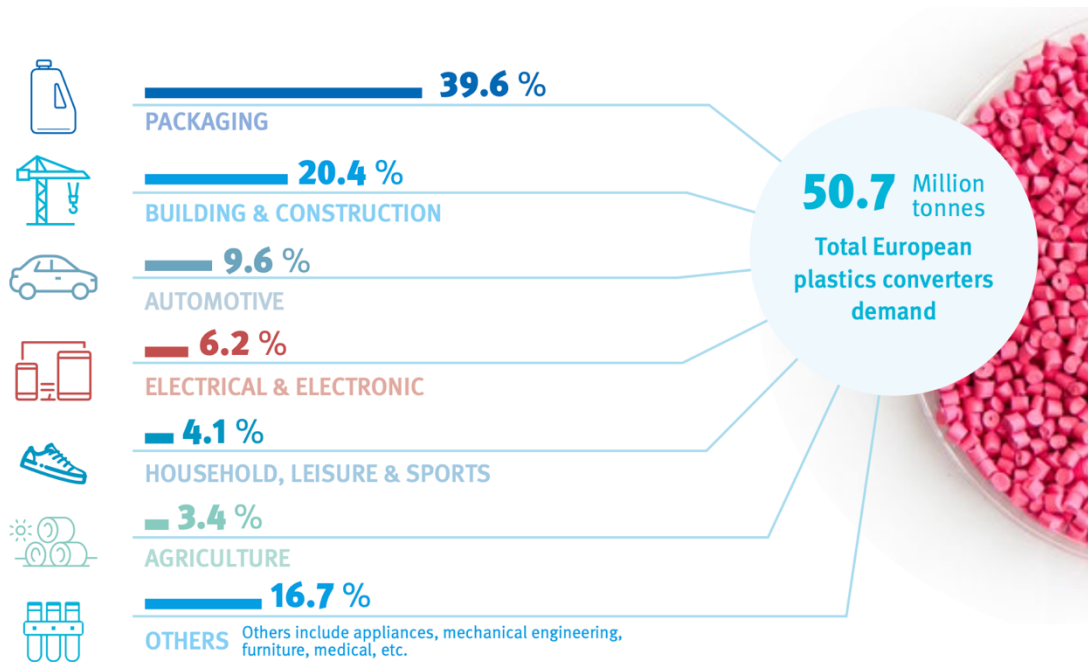


Abbildung 3-3 Kunststoffnachfrage im Jahr 2019 aufgeteilt nach Einsatzsegmenten⁸⁷

Doch neben der Vielzahl ihrer Einsatzbereiche, gegeben durch ihre vielfältigen Eigenschaften, ist vor allem die Verarbeitung ein entscheidender Faktor. Durch das Spritzgießverfahren, auf das im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch genauer eingegangen werden soll, ist die Fertigung komplexer Bauteile in einer minimalen Taktzeit möglich, weswegen selbst aufwendige Produktionsanlagen durch die große Stückzahl profitabel werden.⁸⁸ Doch auch ihre Leichtbaufähigkeit, mit einer mittleren Dichte von $1,2\text{kg}/\text{dm}^3$, im Vergleich zu Eisenwerkstoffen beispielsweise mit einer Dichte von ungefähr $7,8\text{kg}/\text{dm}^3$, verschafft Kunststoffen einen kostenreduzierenden Vorteil, da beispielsweise beim Transport von Joghurt mit einem Lastkraftwagen der

⁸⁵ Abts, G. (2010), S.6

⁸⁶ Brinkmann et al. (2007), S.3

⁸⁷ Quelle: Plastics Europe (2020), S.24

⁸⁸ Brinkmann et al. (2007), S.4 f.

Verpackungsanteil an der Gesamtmasse von Glas bei 36% liegt, während er beim Einsatz von Kunststoffbechern lediglich 4% des Transportgewichts ausmacht.⁸⁹

Neben den in Abbildung 3-3 dargestellten Einsatzgebieten, kommen darüber hinaus noch in jedem dieser Gebiete, wie beispielsweise im Verpackungssektor, andere Kunststoffe zum Einsatz. Wie viele unterschiedliche Kunststoffe im Verpackungssektor Anwendung finden ist in Abbildung 3-4 abgebildet.

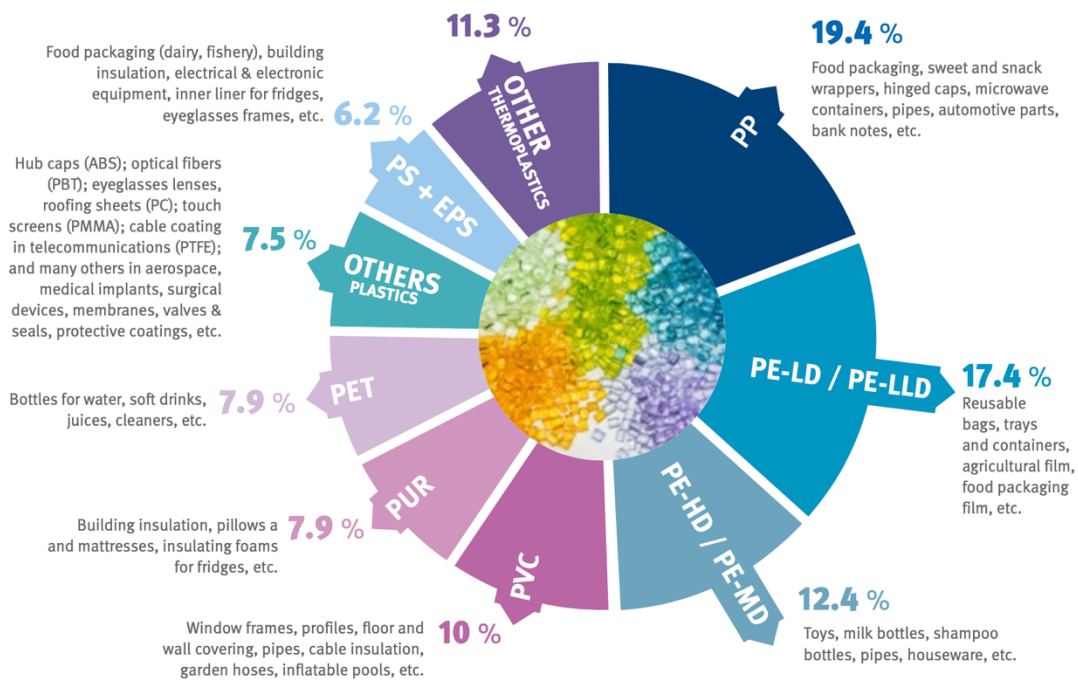


Abbildung 3-4 Anteile der Kunststoffsorten am Markt und deren Verwendungszweck⁹⁰

Neben PET, für die Verpackung von Softdrinks sowie Reinigungsmitteln und vielem mehr, nimmt auch Polypropylen (PP), Polyethylen (PE) in verschiedenen Formen, sowie Polystyrol eine wichtige Rolle in der Verpackungsindustrie von Lebensmitteln ein. In vielen Bereichen der Verpackungsindustrie, im speziellen im Lebensmittelsektor, werden verschiedene Kunststoffe eingesetzt, je nachdem welche Eigenschaften für die gewünschte Anwendung besonders relevant sind.

PET-Flaschen machen dabei, wie bereits zuvor erwähnt, einen nicht unbedeutenden Anteil von etwa 19% des Verpackungsaufkommens aus. Da diese Studie ein Hauptaugenmerk auf die verschiedenen Verpackungsmöglichkeiten von antialkoholischen Getränken legt, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit ein Schwerpunkt auf PET gelegt. Wie die verschiedenen Kunststoffe von diesem getrennt werden können, um PET sortenrein zu rezyklieren soll in Kapitel 5.4 noch genauer erläutert werden.

Um genauer auf das Recycling und die damit verbundene Aufbereitung einzugehen wird zuerst ein Grundwissen über die verschiedenen technischen Aufbereitungslösungen

⁸⁹ Kaiser, W. (2011), S.4

⁹⁰ Quelle: Plastics Europe (2020), S.26

eingebraucht. Bevor die Herstellung und Verarbeitung von PET, bis hin zur vollständigen Flasche, erläutert wird um die Lebenszyklusanalyse, die im praktischen Teil dieser Arbeit erarbeitet wurde und in Kapitel 7 wiedergegeben wird, genauer zu beleuchten.

3.4 Glas

Alleine in Deutschland wurden 2019 rund 7,378 Millionen Tonnen Glas hergestellt, wovon 4,130 Millionen Tonnen auf Behälterglas entfielen. Im Jahr 2016 wurde eine Behälterglasverwertung von 83,6% erzielt, wobei Altglas als wichtiger Sekundärrohstoff in der Glasherstellung verwendet wird.⁹¹

Eine grafische Darstellung zur Produktion der verschiedenen Gläser in Deutschland kann aus Abbildung 3-5 entnommen werden.

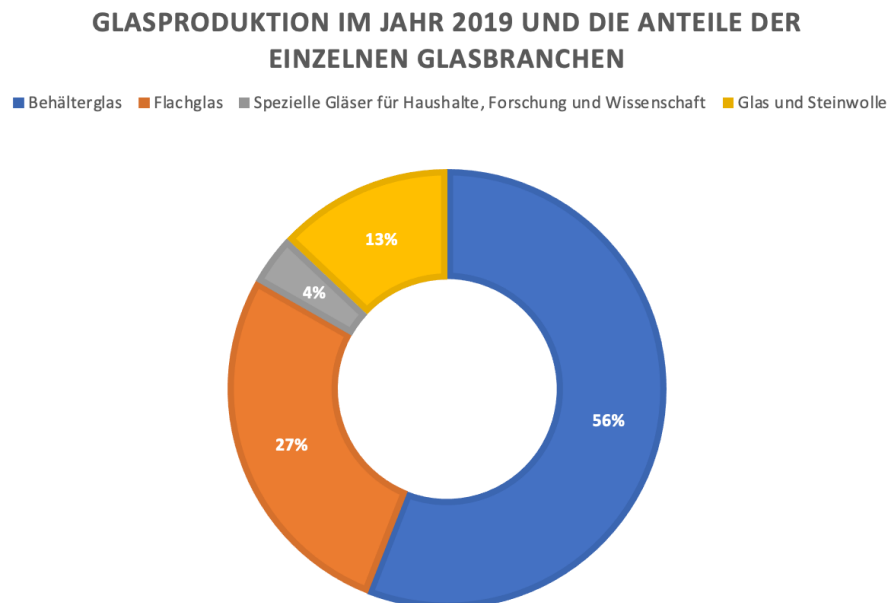


Abbildung 3-5 Glasproduktion im Jahr 2019 und die Anteile der einzelnen Glasbranchen⁹²

Ein Exzerpt des Altglasaufkommens, der grenzüberschreitenden Verbringung nach beziehungsweise aus Österreich, sowie die recycelten Mengen an Altglas im Jahr 2014 sind in Tabelle 3-3 gegeben.

⁹¹ Wilke, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/glas-altglas> (Zugriff: 30.03.2021)

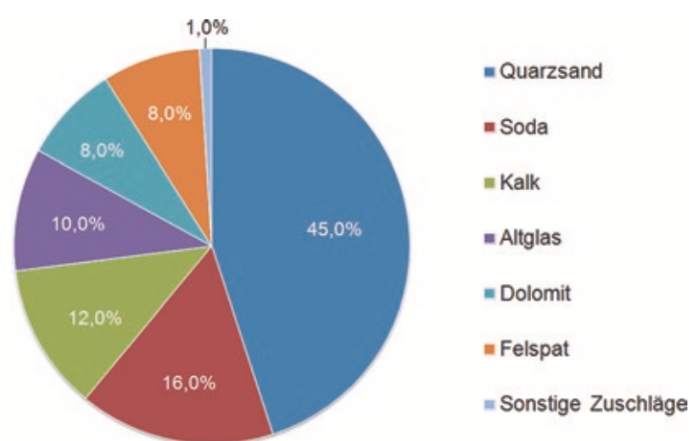
⁹² Quelle: Wilke, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/glas-altglas> (Zugriff: 30.03.2021) (leicht modifiziert)

Tabelle 3-3 Altglasaufkommen in Österreich im Jahr 2014⁹³

Abfallart	Aufkommen aus Haushalten [t]	Industrie und Gewerbe [t]	Gesamt [t]
Weißglas Verpackungsglas	77.056	16.400	93.456
Buntglas Verpackungsglas	143.751	30.300	174.051
	Exporte [t]	Importe [t]	
Weißglas Verpackungsglas	18.162	34.493	
Buntglas Verpackungsglas	28.062	33.969	
	Recycelte Mengen Altglas [t]		
Weißglas Verpackungsglas	87.000		
Buntglas Verpackungsglas	129.000		

Die österreichische Glasindustrie konnte dabei einen Produktionswert von 1,244 Milliarden Euro erwirtschaften, wobei vor allem im Sektor des Verpackungsglases wieder ein Zuwachs zu verbuchen war. Die Verwendung von Altglas als Rezyklat macht damit etwa 50% der österreichischen Glasproduktion aus, was einer Einsparung von 257.000 Tonnen an Primärrohstoffen, sowie 225 Millionen kWh an Energie entspricht.⁹⁴

Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7 zeigen den Rohstoffeinsatz zur Herstellung von Grünglas der Jahre 1972 und der Gegenwart im Vergleich.

Abbildung 3-6 Rohstoffe für die Herstellung von Grünglas im Jahre 1972⁹⁵

⁹³ Quelle: in Anlehnung an Meyer, I. et al. (2016), S.76 f.

⁹⁴ Meyer, I. et al. (2016), S.79

⁹⁵ Quelle: Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.154

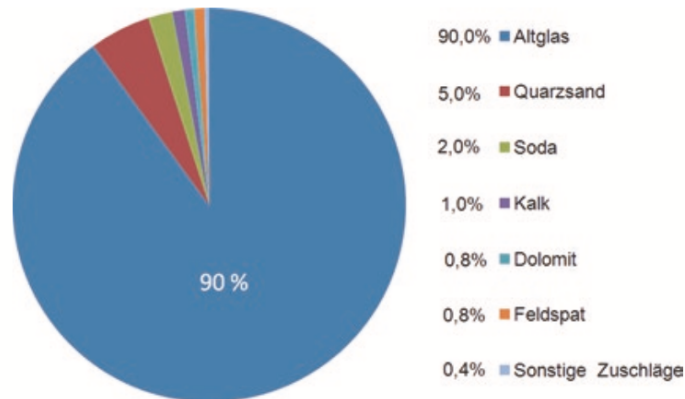


Abbildung 3-7 Rohstoffe für die Herstellung von Grünglas mit Recycling-Scherben⁹⁶

Dies ist möglich, weil Glas zu den rezyklierfähigsten Materialien gehört. Dennoch wird oft das Gewicht der Glasflaschen im Vergleich zu PET-Flaschen als Argument angeführt, um diese beim Kauf vorzuziehen. Dieses Argument hat jedoch in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung verloren, weil dank neuer Technologien das Gewicht der Flaschen reduziert werden konnte. So brachte vor vierzig Jahren die durchschnittliche ein Liter Glasflasche noch ein Gewicht von 600g auf die Waage, während dieser Wert heute bei 345g liegt.⁹⁷

Natürlich ist dies immer noch beträchtlich mehr als eine PET-Flasche wiegt, weswegen im praktischen Teil dieser Arbeit in Kapitel 7 genauer auf dessen Bedeutung für die Transportlogistik eingegangen wird.

Dieser Trend hin zu Kunststoffen als praktische und alltagstaugliche Verpackungslösung ist auch im Glasverbrauch im Verpackungssektor zu sehen der zwischen 1991 und 2005 um 1,56 Millionen Tonnen gesunken ist. Der zuvor erwähnte Trend hin zu leichteren Flaschen, um einerseits den Konsumenten anzusprechen und andererseits Gewicht für Transportzwecke zu sparen, wurde jedoch durch einen Trend zur Form- und Individualflasche überkompensiert. In letzter Zeit wurden vor allem Zunahmen des Glasverbrauchs für den Verpackungssektor im Bereich der Mehrwegflaschen bemerkt, während sie in den von Pflichtpfand auf Einweggetränkeverpackungen betroffenen Sektor in Deutschland weitestgehend an Bedeutung verloren hat. Darüber hinaus konnte ein besonderer Zuwachs bei der Rubrik der veganen Nahrungsaufbewahrung festgestellt werden.⁹⁸

⁹⁶ Quelle: Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.154

⁹⁷ Siegele, C. (2018), S.23

⁹⁸ Umweltbundesamt (2017), S.52

4 Grundlagen der Aufbereitungstechnik

Die Sortierung des Rohstoffes Abfall findet in Anlagen statt, die eine Kombination aus Aggregaten und Förderanlagen sind. Diese Anlagen bestehen demnach aus Aggregaten, die eine Folge von Stoffaufbereitungsschritten vornehmen, um den Reststoff in der Kreislaufführung zu behalten.

Das folgende Kapitel soll einen Überblick über einige Grundlagen und Apparate der Aufbereitungstechnik geben, um in diesem Zusammenhang die im späteren Abschnitt 5.4 und 6.5 erläuterten Prozesse genauer zu beleuchten und um das nötige Verständnis zu etablieren, um im Kapitel 8 die Option der Dezentralisierung der Abfallaufbereitung anzusprechen. Das Thema der Aufbereitungsprozesse und der dazugehörigen Aggregate ist komplex und sehr weitläufig, es soll jedoch in dieser Arbeit nur zum besseren Verständnis angeführt werden und stellt damit keinen Anspruch auch Vollständigkeit. Für weitere Informationen sei an dieser Stelle auf die in diesem Kapitel angeführte Literatur verwiesen.

4.1 Zerkleinerung

Der Begriff der Zerkleinerung beschreibt einen Vorgang, bei dem das Aufgabegut in eine feinere Körnung überführt wird und dient zur Vergrößerung der spezifischen Oberfläche, um beispielsweise eine größere Angriffsfläche für einwirkende Reagenzien zu schaffen, wie im nachfolgenden Abschnitt 5.4.3 angesprochen wird. Darüber hinaus ist die Zerkleinerung auch dazu gedacht einen Stoffaufschluss zu erzielen und das Gesamtvolumen zu reduzieren um Lager- und Transportplatz sowie damit einhergehende Kosten zu sparen. Um die richtige Zerkleinerungsmaschine zu wählen müssen einige Informationen über die aufgegebenen Stoffe, wie die Ausgangskörnung, den Aufbau, die Härte, die Sprödigkeit oder die Spaltbarkeit, bekannt sein.⁹⁹

Die Prinzipien, die hinter den verschiedenen Zerkleinerungsmaschinen stehen, sind in Abbildung 4-1 dargestellt.

⁹⁹ Schubert, H. (1989), S.70 ff.

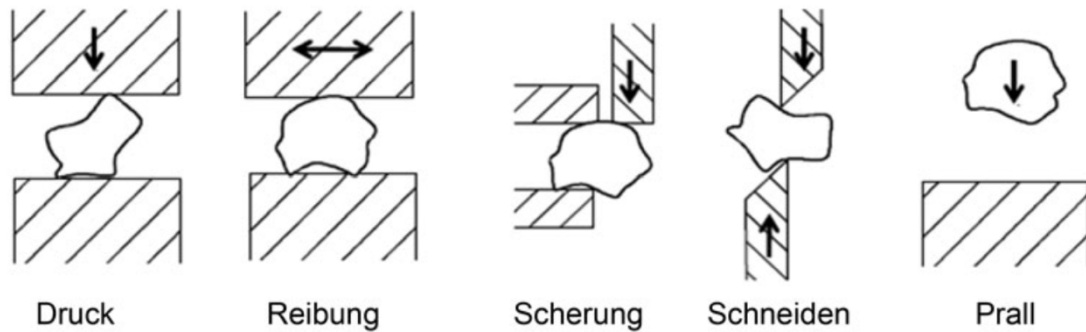


Abbildung 4-1 Prinzipien der Zerkleinerung¹⁰⁰

Welche Vorgehensweise zur Zerkleinerung gewählt wird hängt von der Zusammensetzung der Aufgabe und dem darin enthaltenen Feststoffen ab. Ausführungen solcher Zerkleinerungsmaschinen wären unter anderem die Hammermühle, für die Zerkleinerung von Autos, sowie Haus oder Papierabfällen verwendet wird oder der Prallbrecher, für mittelharte bis spröde Materialien, die durch die Schlag- beziehungsweise Prallwirkung des Werkzeugs zerkleinert werden. Auch Schneidmühlen und Rotorscheren, welche für weiche oder elastische Materialien, wie Kunststoffe oder holziger Grünschnitt verwendet werden, kommen in unterschiedlichen Ausführungen zum Einsatz.¹⁰¹

4.2 Klassierung

Klassierung bezeichnet das Vorgehen, bei dem die Aufgabe in Klassen unterschiedlicher Korngröße aufgeteilt wird. Eine Möglichkeit zur Klassierung stellt dabei die Siebung dar. Bei der technischen Siebung handelt es sich um einen unvollkommenen Trennprozess, da ein gewisser Anteil des Unterkorns, welches eine kleinere Korngröße als die Siebmaschenweite hat, in das Überkornprodukt, bestehend aus jenen Körnern, die zum Grobkorn gehören, die größer sind als die Maschenweite des Siebes, gelangt. Jene Körner, die ungefähr dieselbe Größe aufweisen, wie die Sieböffnung, sind hierbei besonders problematisch, da sie als sogenanntes Klemmkorn den Siebboden verlegen können. Des Weiteren führen vor allem sehr feine Körnungen, sowie feuchte, faserige und klebrige Haufwerke zu einem Verstopfen der Siebe. Einige Siebe, die vor allem in der Abfallaufbereitung Anwendung finden sind, zum Beispiel, das Trommelsieb oder das Spannwellensieb.¹⁰²

Eine weitere Möglichkeit zur Klassierung stellt die Sichtung dar. Ein Sichter trennt die Aufgabekörner nach ihrer Sinkgeschwindigkeit, wobei diese von der Kornform und vom spezifischen Gewicht der enthaltenen Stoffe abhängt. Für die Abfallaufbereitung werden hierbei vor allem Sichter auf Luftstrombasis verwendet, wie zum Beispiel der Zick-Zack-

¹⁰⁰ Quelle: Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.487

¹⁰¹ Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.487 ff.

¹⁰² Schubert, H. (1967), S.195 ff.

Windsichter oder der Rotationswindsichter. Bei dem Zick-Zack-Windsichter strömt Luft im aufrecht-stehenden zickzackförmigen Sichtrohr nach von unten nach oben und damit entgegen der Fallrichtung des Aufgabegutes. Das Feingut wird so nach oben ausgetragen, während das Grobgut, oder kleine Körner sehr hoher Dichte, nach unten ausgetragen werden, da diese dieselbe Endfallgeschwindigkeit aufweisen.¹⁰³

Eine Darstellung des Trommelsiebes und des Zick-Zack-Windsichters ist in Abbildung 4-2 gegeben.

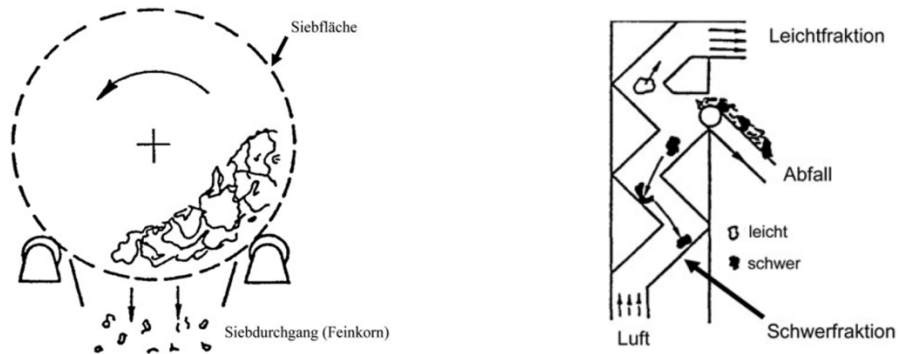


Abbildung 4-2 Trommelsieb (links) und Zick-Zack-Windsichter (rechts)¹⁰⁴

4.3 Sortierung

Beim Sortieren werden die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der zu trennenden Feststoffe ausgenutzt, wobei dabei zwischen Dichtesortieren, Flotieren, optischem Sortieren, Elektro- und Magnetsortieren und so weiter unterschieden wird. Im Bereich der Abfallaufbereitung haben bisher Setzherde, Magnet- und Wirbelstromscheider, Dichtesortierer, Hydrozyklone, Schwimm-Sink-Scheider und optische Sortiergeräte ihre Anwendungsgebiete gefunden.¹⁰⁵

4.3.1 Magnetsortierung

Die Magnetsortierung erfolgt oftmals mit Überbandmagneten, die die magnetischen Bestandteile des Aufgabestromes herausziehen und über ein separates Förderband austragen. Es wirkt dabei ein Kraftfeld quer zu Förderrichtung des Aufgabegutes, wobei die Kräfte des Magnetfeldes, welche auf die abzutrennenden Partikel wirken größer sein müssen, als die Summe der entgegengesetzt wirkenden Kräfte wie die Schwerkraft.¹⁰⁶

¹⁰³ Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.502 ff.

¹⁰⁴ Quelle: Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013) S.498; S.502,

¹⁰⁵ Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.505 f.

¹⁰⁶ Schubert, H. (2003), S.652 f.

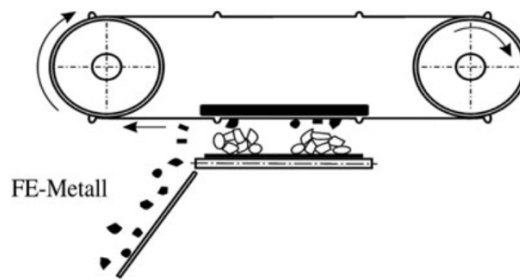


Abbildung 4-3 Überband Magnet¹⁰⁷

Auch für dieses Verfahren ist eine entsprechende Vorzerkleinerung essenziell, um ein gutes Trennergebnis zu erzielen. Die Darstellung einer möglichen Anordnung eines solchen Trennapparates ist in Abbildung 4-3 gegeben.

4.3.2 Wirbelstromsortierung

Für Produkte aus Nicht-Eisen-Metallen (NE-Metalle), die im Abfallstrom enthalten sind, gibt es die Möglichkeit der Wirbelstromsortierung. Bei dieser Methode wird die elektrische Leitfähigkeit unterschiedlicher Materialien als Sortierkriterium eingesetzt. Das Trennverfahren funktioniert so, dass in einem Korn mit elektrischer Leitfähigkeit, das sich in einem zeitlich oder räumlich veränderlichen Magnetfeld befindet oder darin bewegt wird, Wirbelströme entstehen. Diese Wirbelströme bilden nach der Lenz'schen Regel ihrerseits ein Magnetfeld aus, welches dem erzeugenden Magnetfeld entgegen gerichtet ist. Dadurch entsteht eine Kraftwirkung auf das Korn, welches es aus dem ursprünglichen Magnetfeld heraus befördert wird. Diese Technik wurde vor allem in den USA bereits in den siebziger Jahren vermehrt zum Einsatz gebracht, da sich dort Aluminiumdosen im Hausmüll befinden und diese so kostengünstig und effizient ausgebracht werden konnten.

¹⁰⁷ Quelle: Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.507

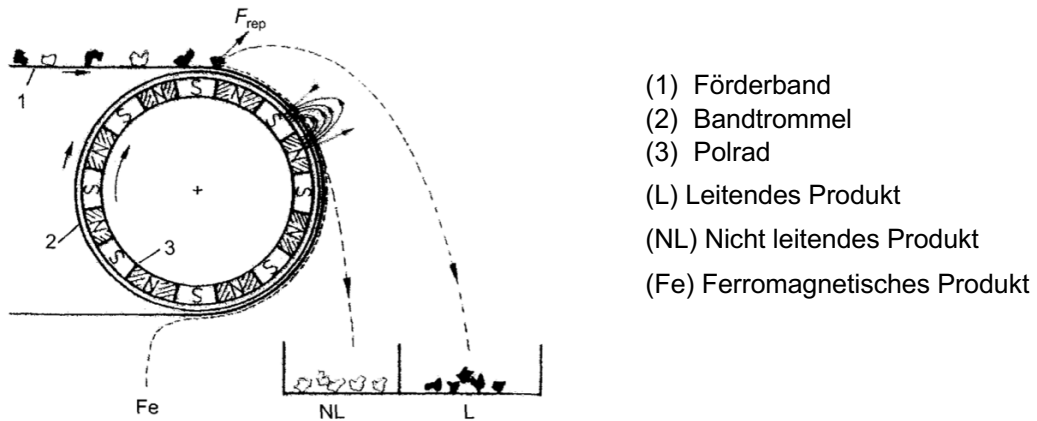


Abbildung 4-4 Prinzip Schaubild Wirbelstromscheider¹⁰⁸

Abbildung 4-4 gibt ein Prinzip Schaubild eines Wirbelstromscheiders wieder, wobei zu erkennen ist, dass eine Auftrennung in ein ferromagnetisches Produkt, ein nicht-leitendes Produkt, sowie ein leitendes Produkt stattfindet, wodurch beispielsweise Aluminiumdosen oder Anteile, sowie eisenhaltige Verunreinigungen aus einem Glas oder Kunststoffaufgabestrom abgetrennt werden können.

4.3.3 Automatisierte Sortierung

Das automatische Sortieren gehört zur Übergruppe der Klaube-Trenntechnologie und ist ein trockener Aufbereitungsprozess.¹⁰⁹ Bei der Klaubentrennung wird jeder Partikel einzeln auf Sortierkriterien geprüft, wobei dies entweder durch Menschen vorgenommen wird, in Form von Hand-Klaubung oder durch Apparate, in Form einer automatisierten Sortierung.¹¹⁰

Seit dem ausreichenden Vorhandensein von Rechenleistung und dem großen Fortschritt in der Elektronik setzt sich in der Abfallwirtschaft, wie auch in anderen Bereichen der Aufbereitung, immer mehr der Trend in Richtung automatisierter Erkennung durch. Diese Anlagen bestehen im Wesentlichen aus einem Vereinzelungsband, welches sicher stellt, dass keine Überlappung von Körnern entsteht und alle separat erfasst werden können, einer Strahlen-Emissionsquelle, einer Detektor- beziehungsweise Auswerteeinheit und einer Ausbringvorrichtung. Bei der automatisierten Sortierung kann zwischen mehreren Optionen unterschieden werden.¹¹¹

Die Detektion wird mittels Sensoren vorgenommen, die verschiedene Trennmerkmale erfassen und diese elektronisch auswerten. Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über die genutzten Sensoren und Trennmerkmale für die automatische Klaubung.

¹⁰⁸ Quelle: Schubert, H. (2003), S.688

¹⁰⁹ Lechleitner, A. et al. (2020), S.48

¹¹⁰ Schubert, H. (2003), S.739

¹¹¹ Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.508 ff.

Tabelle 4-1 Sensoren und Trennmerkmale der automatischen Sortierung¹¹²

Art der Beleuchtung bzw Anregung	Trennmerkmale	Sensor beziehungsweise Sensorsystem
<i>Optische Strahlung</i>		
- Sichtbares Licht	Reflexion <ul style="list-style-type: none"> • Allgemein • Spezifisch • Polarisiert 	Photometrische Detektoren Schwarz-Weiß und Farbkameras
	Transmission	
	Form	Bildanalysatoren
- UV-Strahlung	Fluoreszenz	Photometrische Detektoren
- IR-Strahlung	Reflexion	Infrarotspektrometer
<i>Röntgenstrahlung</i>		
	Transmission	Röntgenstrahldetektoren
	Fluoreszenz	Photometrische Detektoren
	Röntgenfluoreszenz	Röntgenstrahldetektoren

Die selektive Ejektion erfolgt in der Regel über Druckluft gesteuerte Ventile, die die abzutrennenden Partikel aus den Wurfbahnen am Ende der Förderbänder oder Rutschen ablenken.¹¹³

Ein Beispiel für die optische Sortierung ist das in Deutschland getrennt erfasste Altglas, dieses setzt sich zu 50% aus Weißglas, zu 40% aus Grün Glas und zu 10% aus Braunglas zusammen. Um die Recyclingrate für Altglas zu erhöhen ist es nötig dieses nach Farbe zu sortieren, weil auch bei farbigem Grün Glas der Zusatz an Fremdfarbbestandteil limitiert ist. Aus dieser Situation heraus wurden Anlagen entwickelt, welche die Scherben aufgrund ihrer Opazität unterscheiden und mittels Druckluft aussortieren. Die Scherbe durchläuft dabei die optische Erkennungseinheit, während sie mit einem Lichtstrahl durchdrungen wird und dieses von einem Sensor erfasst wird. Dieses Lichtsignal wird in die Farben Rot, Grün und Blau zerlegt und an die Auswerteeinheit weitergegeben. Diese entscheidet, aufgrund eines zuvor hinterlegten Programmes, das auf Maschinen-Lern-Basis etabliert wurde, über die Zuordnung der Messwerte zu einer bestimmten Glasfarbe und aktiviert den Steuermechanismus für das Ausblasen der Scherbe mittels Druckluft. Durch diese Form der Sortierung kann für Weißglas die benötigte Reinheit von 99,5% für den Einsatz von Rezyklat eingehalten werden.¹¹⁴

¹¹² Quelle: Schubert, H. (2003), S.743 (leicht modifiziert)

¹¹³ Schubert, H. (2003), S.743

¹¹⁴ Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.509 f.

Nahinfrarot-Sortierung findet vor allem in der Kunststoffsortierung breite Anwendung. Diese basiert auf dem Prinzip, dass Kunststoffe bestimmte Wellenlängen, abhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung, absorbieren. Dieses Prinzip ist besonders in der Sortierung von PET-Flaschen bereits vielfach verwendet, wobei dieses Vorgehen nicht für dunkel gefärbte Kunststoffe, Klebstoffe oder Kunststoffe mit hohem Additivgehalt in Frage kommt.¹¹⁵

4.3.4 Dichte Sortierung

Die Dichtesortierung zur Trennung von Abfallkomponenten wurde besonders für Kunststoffabfälle eines der am meisten angewandten Verfahren. Dabei handelt es sich um die Trennung nach der Dichte in flüssigen Medien, wobei zwischen dem Schwimm-Sink-Verfahren und dem Hydrozyklon-Verfahren unterschieden wird. Das Schwimm-Sink-Verfahren basiert auf der Trennung nach dem Kriterium der unterschiedlichen Dichten der verschiedenen Kunststoffsorten, welche in Tabelle 5-5 gegeben sind. Es wird eine Trennflüssigkeit verwendet, deren Dichte zwischen jener der zu trennenden Materialien liegt, um zu gewährleisten, dass die Leichtfraktion auftreibt, während die enthaltene Schwerfraktion absinkt. Bei einer Verwendung von Wasser, mit einer Dichte von 1g/cm^3 , als Trennflüssigkeiten konnte in Studie zur Trennung von Kunststoffgranulaten ohne Verunreinigung eine 98%-ige Trennung der Polyolefinfraktion, überwiegend Polyethylen und Polypropylen, aus einer hausmüllähnlichen Kunststofffraktion erzielt werden. Wobei der Fehlastrag aus Feinanteil bestand, welcher durch vorhergehende Windsichtung entfernt werden kann. Eine darauffolgende Schwimm-Sink-Sortierung mit einer CaCl_2 -Trennlösung führte zu einer 98%-igen Anreicherung von Polystyrol und Polyvinylchlorid. Dieses Verfahren weist jedoch Nachteile auf, wenn es um die Durchsatzleistung geht, da Turbulenzen in der Trennzone den Trennerfolg maßgeblich verschlechtern.¹¹⁶

Hydrozyklone verwenden zur Trennung verschiedener Fraktionen ein Zentrifugalfeld. Die Zyklongeometrie erzeugt dabei einen aufwärtsgerichteten Innenwirbel, der zum Austragen der Leichtfraktion dient, während im abwärtsgerichteten Außenwirbel die Schwerfraktion ausgetragen wird.¹¹⁷

Abbildung 4-5 zeigt eine schematische Darstellung eines Hydrozyklons, wobei der Überlauf den Austrag der Feinfraktion kennzeichnet, während die Schwerfraktion über den Unterlauf ausgetragen wird. Hydrozyklone bieten, gegenüber dem Schwimm-Sink-Verfahren, den Vorteil, dass sie eine höhere Durchsatzleistung haben, sowie einen einfacheren Aufbau. Wie bereits bei einigen anderen Prozessschritten erwähnt, ist auch beim Hydrozyklon die vorgeschaltete Zerkleinerungsstufe ausschlaggebend für das Trennergebnis. Die Anwendung eines Hydrozyklons ist vor allem bei der Aufbereitung von Altpapier weit verbreitet, da Verunreinigungen wie Heft- und Büroklammern aufgrund des deutlichen Dichteunterschiedes zu Fasern sehr gut abgetrennt werden

¹¹⁵ Rudolph, N. et al. (2020), S.29

¹¹⁶ Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.518

¹¹⁷ Schubert, H. (2003), S. 548 ff.

können, wodurch nachfolgende Maschinen vor zusätzlichem Verschleiß geschützt werden.¹¹⁸

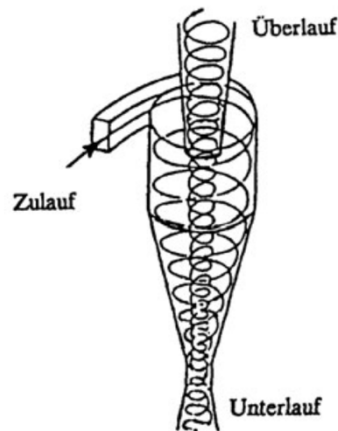


Abbildung 4-5 Schematische Darstellung eines Hydrozyklons¹¹⁹

Beide hier erwähnten Verfahren der Dichtesortierung bieten den Vorteil einer schnellen und kostengünstigen Trennung, die gleichzeitig als erste Stufe des Waschprozesses angesehen werden können. Allerdings sind die benötigten Mengen an Wasser und der damit einhergehende Prozessaufwand, im Sinne der Wassernachbehandlung und Aufbereitung, nicht unwesentlich. Auch die Trennung einiger Materialien mit ähnlicher Dichte ist hier nicht möglich, dies kann vor allem bei einigen Kunststoffsorten zu einem Problem führen.¹²⁰

4.3.5 Elektrosortierung¹²¹

Bei der Elektrosortierung werden bei den zu trennenden Partikeln Ladungen mit unterschiedlichen Vorzeichen, oder zumindest unterschiedlicher Größe der Ladung, erzeugt um diese im Anschluss in einem elektrischen Feld, aufgrund des Wirkprinzips der Ablensortierung, zu trennen. Diese Aufladungen können entweder durch Kontaktpolarisation im elektrischen Feld, durch Aufladung im Koronafeld oder durch Triboaufladung verursacht werden. Die Triboaufladung basiert dabei auf den Unterschieden in den Dielektrizitätskonstanten der Partikel, während die anderen auf die Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit aufbauen. Unabhängig davon, wie die Ladung zustande kommt ist es wichtig zu beachten, dass diese von den Eigenschaften der Oberflächenschichten abhängt und durch äußere Einflüsse, bewusst oder unbewusst, verändert werden kann. Bei der Triboaufladung entstehen die Ladungen der Partikeln durch einen ausreichenden Unterschied in der Austrittsarbeit ihrer Elektronen,

¹¹⁸ Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.519

¹¹⁹ Quelle: Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.519

¹²⁰ Rudolph, N. et al. (2020), S.28

¹²¹ Schubert, H. (2003), S.703 ff.

insofern dass diese sich soweit unterscheiden müssen, dass es bei Kontakt zu einem Elektronenübergang kommt. Durch die Reibung der Partikeln untereinander werden diese Kontaktstellen vermehrt, einerseits durch die Kontakte zu den zu trennenden Partikeln und andererseits auch durch den Kontakt mit der Apparatauskleidung. Für den eigentlichen Trennprozess werden anschließend Sortierungen auf dem Prinzip der Ablenksortierung, meist der Querstromtrennung, vorgenommen. Zwei wichtige Bauarten sind dabei der Walzenscheider und der Kammerscheider, schematische Darstellungen beider sind in Abbildung 4-6 gegeben.¹²²

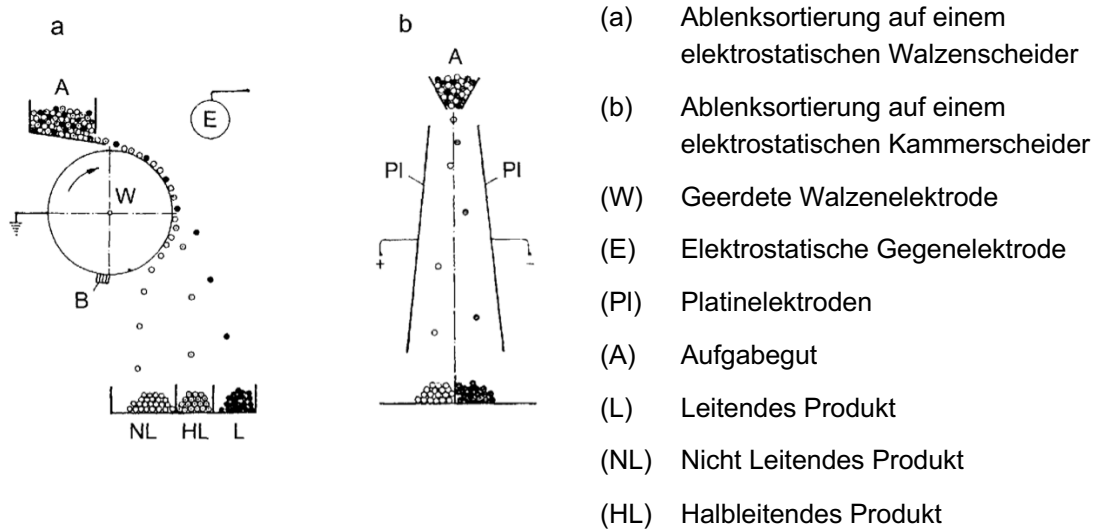


Abbildung 4-6 Schematische Darstellung Walzenscheider und Kammerscheider¹²³

¹²² Schubert, H. (2003), S.703 ff.

¹²³ Quelle: Schubert, H. (2003), S.709

5 Technische Grundlagen zu Kunststoffen

Für viele Menschen bezieht sich der Begriff Kunststoff auf einen künstlich hergestellten Werkstoff der prägend für das 21. Jahrhundert ist. Diese Annahme ist natürlich berechtigt, bedenkt man die Entwicklung der Kunststoffherzeugung aus dem einleitenden Abschnitt zum Thema Kunststoffe. Doch auch Naturstoffe wie Bernstein, Schildplatt, Horn oder Kopalharz zeigen kunststoffähnliches Verhalten und sind sowohl in ihrer Anwendung als auch durch ihre Struktur, als natürliche Polymere, die Vorgänger der heutigen Kunststoffe.¹²⁴ Was diese gemein haben, worin sie sich unterscheiden, wie sie hergestellt und recycelt werden, soll im weiteren Verlauf dieses Kapitels genauer erklärt werden.

5.1 Einteilung der Kunststoffe

In Südamerika nutzten die Einwohner die weiße, klebrige Flüssigkeit eines Baumes den sie als „caao-chu“, für weinender Baum, bezeichneten, dazu Gegenstände wasserdicht zu machen. Diese Flüssigkeit wurde aufgrund ihrer optischen Ähnlichkeit zu Milch, lateinisch lac, auch als Latex bezeichnet und enthielt bis zu 40% Kautschuk.¹²⁵

Bei der Grenze zwischen synthetischen und natürlichen Werkstoffen handelt es sich demnach um einen fließenden Übergang.¹²⁶ Die Bezeichnung Kunststoff stammt aus den 1940er Jahren, in denen damit ein Ersatz für immer teurer und knapper werdende Naturrohstoffe, betitelt wurde welche für die gleichen Anwendungsgebiete wie die Naturstoffe, wie beispielsweise Kautschuk, verwendet wurde.¹²⁷ Der Aufbau und die Struktur der Polymere wurde erstmals 1920 durch den organischen Chemiker und Nobelpreisträger Hermann Staudinger festgehalten.¹²⁸ Erst nach dem 2. Weltkrieg teilten sich die Polymere, von griechisch „poly“, Viele und „meros“, Teil, in die Untergruppen Kunststoffe, diese umfassen Thermoplaste und Duroplaste, sowie Elastomere, beziehungsweise Gummi, auf.¹²⁹ Oft werden jedoch alle drei Begriffe unter dem Überbegriff der Kunststoffe zusammengefasst was auch in dieser Arbeit im weiteren Verlauf so gehandhabt wird. Kunststoffe sind polymerisierte Kohlenwasserstoffe und bestehen daher zum Großteil aus Wasserstoff und Kohlenstoff, deren Moleküle, aufgrund ihrer Größe und ihrer hohen Molmasse, als Makromoleküle bezeichnet werden. Diese liegen nebeneinander, mehr oder weniger verknäult, und mit unterschiedlichem Vernetzungsgrad vor.¹³⁰ Die verknäulte Struktur kann dabei mit dem nach unten Fallen

¹²⁴ Kaiser, W. (2011), S.8

¹²⁵ Abts, G. (2010), S.6 f.

¹²⁶ Abts, G. (2010), S.3

¹²⁷ Abts, G. (2010), S.6

¹²⁸ Keim, W. (2006), S.1

¹²⁹ Eyerer, P. et al. (2008), S.3

¹³⁰ Abts, G. (2010), S.25

eines langen Seiles verglichen werden, das ohne Einflussnahme von außen, auch geknüllt am Boden zum Liegen kommt.¹³¹

Der Begriff der Vernetzung bezieht sich dabei auf die Form der Moleküle, insofern, dass das einfachste Modell als Faden aus Kohlenstoffatomen abgebildet werden kann, wobei es neben diesem linearen Modell auch noch die Möglichkeit gibt, dass von sogenannten Verzweigungspunkten drei oder mehr Molekülketten ausgehen, die je nach ihrer Anordnung unterschieden werden können.¹³² Eine Darstellung der verschiedenen Molekülformen kann aus Abbildung 5-1 entnommen werden.

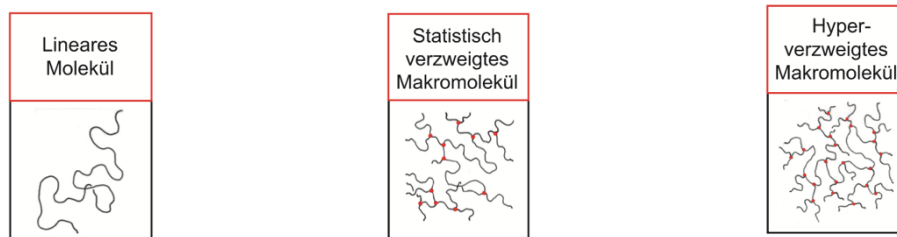


Abbildung 5-1 Verknäuelte, lineare und verzweigte Makromoleküle¹³³

Je nach Vernetzung der Makromoleküle der Kunststoffe handelt es sich entweder um Thermoplaste, nicht vernetzte Moleküle, Elastomere, schwach vernetzte oder um Duroplaste, stark vernetzte Moleküle.¹³⁴ Diese sehr gängige Unterteilung in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere erfolgt gleichzeitig auch durch das Hauptkriterium für Kunststoffe, dass sie unter Wärme und/oder Druck problemlos plastisch verformbar sind.¹³⁵ Bei Thermoplasten unterscheidet man des Weiteren zwischen jenen mit vollkommen ungeordneter Struktur, amorphe Thermoplaste, und jenen mit teilweise geordneter Struktur, teilkristalline Thermoplaste.¹³⁶

Durch andere Wechselwirkungen innerhalb des Materials von teilkristallinen Thermoplasten schmelzen diese nicht, wie amorphe Polymere, bereits bei Erreichen der Glasübergangstemperatur sondern erst nach Erreichen der Kristallschmelztemperatur, bei welcher die viskose Flüssigkeit verarbeitet werden kann.¹³⁷ Kunststoffe zeigen unterschiedliches Verhalten bei dem Erwärmungsvorgang, denn bei unvernetzten Materialien ist durch erneute Erwärmung auch eine neuerliche Formgebung möglich, während dies bei Vernetzten, nach einmaligem Durchlaufen ihres plastischen Übergangszustandes, während der Formgebung, nicht mehr möglich ist, da diese irreversibel aushärten.¹³⁸

¹³¹ Kaiser, W. (2011), S.36

¹³² Kaiser, W. (2011), S.36

¹³³ Quelle: Kaiser, W. (2011), S.37

¹³⁴ Abts, G. (2010), S.25

¹³⁵ Kaiser, W. (2011), S.35

¹³⁶ Abts, G. (2010), S.25

¹³⁷ Eyerer, P. et al. (2008), S.4

¹³⁸ Kaiser, W. (2011), S.35

Duroplaste zählen zu jenen Kunststoffen, die chemisch engmaschig vernetzt sind und daher nach dem Aushärten, dem Vernetzungsvorgang, nicht wieder schmelzbar sind und daher keine Verarbeitung, beispielsweise durch Recycling, mehr ermöglichen.¹³⁹ Ein Baum, der die angesprochenen einzelnen Untergruppen darstellt, ist in Abbildung 5-2 gegeben.

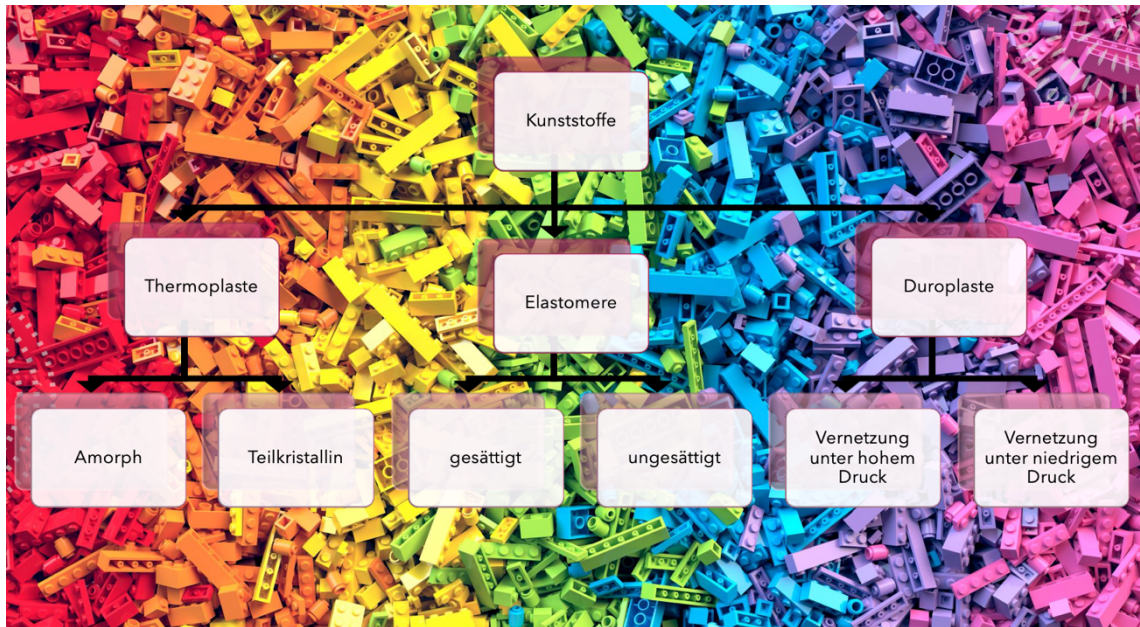


Abbildung 5-2 Einteilung der Kunststoffe¹⁴⁰

Um eine bessere Übersicht über die Unterschiede zwischen Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren zu geben wird in der folgenden Tabelle 5-1 jeweils eine Darstellung der Molekülstruktur, einige wichtige Eigenschaften der jeweiligen Kunststoffsorte, sowie einige deren wichtigsten Vertreter angegeben.

Tabelle 5-1 Übersicht Thermoplaste¹⁴¹

Thermoplaste

Zusammenhalt	Verschlaufung bei hoher Molmasse, sekundäre Bindungen zwischen den unvernetzten Makromolekülen
Eigenschaften (auszugsweise)	<ul style="list-style-type: none"> • Beliebig oft erweich- und schmelzbar • Geringe - mittlere Zugfestigkeit • Geringe – mittlere Steifigkeit • Geringe – mittlere Reißdehnung

¹³⁹ Eyerer, P. et al. (2008), S.5

¹⁴⁰ Eigene Darstellung

¹⁴¹ Quelle: in Anlehnung an Eyerer, P. et al. (2008), S.6


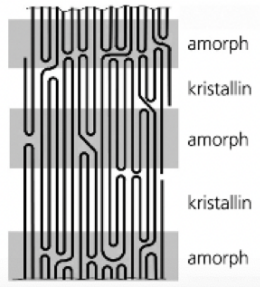
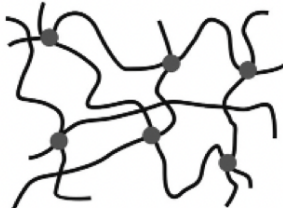
Struktur	 <p style="text-align: center;">Amorph</p>	 <p style="text-align: center;">Teilkristallin</p>
Vertreter (auszugsweise)	<ul style="list-style-type: none"> • PVC • PC • PET 	<ul style="list-style-type: none"> • PE • PP • PET

Tabelle 5-2 Übersicht Elastomere¹⁴²

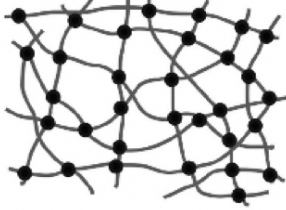
Elastomere

Zusammenhalt	Verschlaufung, sekundäre Bindungen und primäre Bindungen (=Vernetzung), weitmaschig (=Vulkanisation)	
Eigenschaften (auszugsweise)	<ul style="list-style-type: none"> • Nach dem Vernetzen nicht mehr schmelzbar • Geringe Zugfestigkeit • Geringe Steifigkeit • „Gummielastizität“ 	
Struktur		
Zustand	Gesättigt Ungesättigt	
Doppelbindung	Ohne Doppelbindung	Mit Doppelbindung
Vertreter (auszugsweise)	<ul style="list-style-type: none"> • Acrylat-Elastomer (ACM) • Ethylen-Propylen-Elastomer (EPDM) 	<ul style="list-style-type: none"> • Naturgummi (NR) • Styrol-Butadien-Gummi (SBR)

¹⁴² Quelle: in Anlehnung an Eyerer, P. et al. (2008), S.6

Tabelle 5-3 Übersicht Duroplaste¹⁴³

Duroplaste

Zusammenhalt	Verschlaufung, sekundäre Bindungen und primäre Bindungen (=Vernetzung), engmaschig (=Härtung)	
Eigenschaften (auszugsweise)	<ul style="list-style-type: none"> • Nach dem Vernetzen nicht mehr schmelzbar • Hohe Zugfestigkeit • Hohe Steifigkeit • Geringe Reißdehnung 	
Struktur		
Druckbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Vernetzen unter hohem Druck (in geschlossenem Werkzeug) 	<ul style="list-style-type: none"> • Vernetzung unter geringem Druck (meist in offener Form)
Vertreter (auszugsweise)	<ul style="list-style-type: none"> • PE • Epoxidharze • Polyurethane (PU) 	

5.1.1 Polymerisation

Wie bereits zuvor kurz angesprochen, handelt es sich bei Kunststoffen um Werkstoffe, welche aus langkettigen Molekülen, mit einer hohen Molmasse, bestehen. Diese Makromoleküle setzen sich aus sehr vielen, gleich aufgebauten Teilen, den Monomeren, zusammen und werden daher auch als Polymere bezeichnet. Das Verfahren zur Herstellung dieser Polymere wird daher auch als Polymerisation bezeichnet. Als Polymerisation wird demnach eine chemische Reaktion bezeichnet, bei der monomere Verbindungen, welche reaktionsfähige Mehrfachbindungen oder ebensolche Ringe besitzen, durch eine fortlaufende Reaktion in Makromoleküle übergehen.¹⁴⁴ Die verwendeten Monomere sind dabei ausschlaggebend für die Eigenschaften der entstehenden Polymere und je nach Monomer und Reaktionsbedingungen entstehen bei der Polymerisationsreaktion, bei gleicher Summenformel, verschiedene räumliche Strukturen.¹⁴⁵ Der Begriff Polymerisation wird dabei als generischer Term für alle Synthesereaktionen verwendet, wobei je nach Art der chemischen Reaktion in drei weitere Klassen, die Kettenpolymerisation (Polymerisation), die

¹⁴³ Quelle: in Anlehnung an Eyerer, P. et al. (2008), S.6

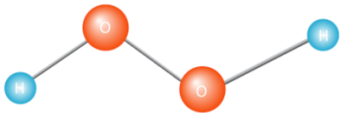
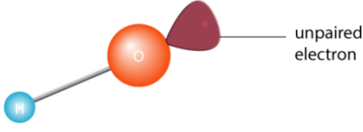
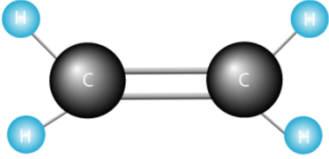
¹⁴⁴ Keim, W. (2006), S.4

¹⁴⁵ Abts, G. (2010), S.59

Kondensationspolymerisation (Polykondensation) und die Additionspolymerisation (Polyaddition), unterteilt werden kann.¹⁴⁶

Es kann eine weiterführende Differenzierung, je nach Mechanismus der ablaufenden Polyreaktion, in Kettenwachstumsreaktion und Stufenwachstumsreaktion erfolgen.¹⁴⁷ Je nach Monomer und gewünschtem Polymer sind demnach unterschiedliche Polymerisationsverfahren in Gebrauch.¹⁴⁸ So kann die Kettenpolymerisation, abhängig von der Start- beziehungsweise der Wachstumsreaktion, weiter unterteilt werden in eine radikalische, kationische, anionische und koordinative Polymerisation, die sich in die Teilabschnitte Kettenstart, Kettenwachstum und Kettenabbruch unterteilen lässt.¹⁴⁹ Für die meisten dieser chemischen Reaktionen ist ein Katalysator für den Reaktionsablauf notwendig.¹⁵⁰ Der Ablauf, dargestellt in folgender Tabelle 5-4, soll die Funktionsweise der Additionspolymerisation, bei der wie bereits erwähnt, die Monomere in sich wiederholender Reihenfolge aneinander addiert werden, veranschaulichen.

Tabelle 5-4 Ablauf der Additionspolymerisation¹⁵¹

	<p>Für den Ablauf wird ein Molekül wie Hydrogenperoxid erhitzt, um es zu spalten, und so ein Radikal mit einem freien Elektron zu schaffen.</p>
	<p>Dieses freie Elektron ist überaus reaktiv und instabil, weswegen es nach einem anderen, freien Elektron, sucht.</p>
	<p>Das Ethylenmolekül besteht aus zwei Kohlenstoffatomen, die durch eine Doppelbindung verbunden sind und vier Wasserstoffatomen.</p>

¹⁴⁶ Kaiser, W. (2011), S.39

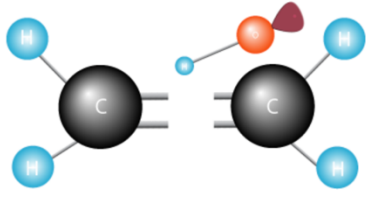
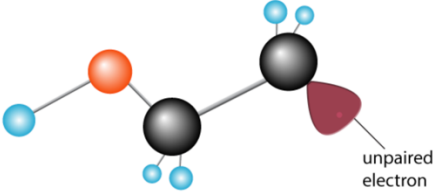
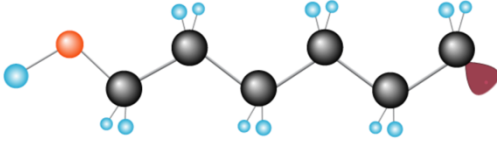

¹⁴⁷ Kaiser, W. (2011), S.39

¹⁴⁸ Abts, G. (2010), S.61

¹⁴⁹ Keim, W. (2006), S.4

¹⁵⁰ Abts, G. (2010), S.61

¹⁵¹ Quelle: in Anlehnung an Evans, D.; Watkins, S., <https://www.science.org.au/curious/everything-else/polymers> (Zugriff: 11.03.2021)

	<p>Das Radikal spaltet die Doppelbindung und bildet mit dem freigewordenen Elektron des Kohlenstoffes ein Elektronenpaar.</p>
	<p>Das andere Kohlenstoffatom hat aufgrund der fehlenden Doppelbindung nun selbst ein freies Elektron.</p>
	<p>Dieses freie Elektron spaltet nun die Doppelbindung bei einem weiteren Ethylen-Monomer und verlängert somit die Kette.</p>
	<p>Dieser Vorgang läuft weiter, bis ein freies Radikal einem anderen begegnet und somit die Polymerkette vervollständigt.</p>

Bei der Additionspolymerisation entsteht, im Gegensatz zur Kondensationspolymerisation, kein zusätzliches Molekül als Nebenprodukt der Reaktion, wie beispielsweise Wasser, jedoch benötigt sie zum Ablaufen ein Monomer mit einer Doppelbindung zwischen den Kohlenstoffatomen.¹⁵² Abbildung 5-3 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Polymerisationsreaktionen, die oftmals unter dem Begriff der Polymerisation, zusammengefasst werden.

¹⁵² Evans, D.; Watkins, S., <https://www.science.org.au/curious/everything-else/polymers> (Zugriff: 11.03.2021)



Abbildung 5-3 Aufteilung der Polymerisationsreaktionen¹⁵³

Darüber hinaus soll, im Zuge dieser Arbeit, nicht genauer auf die chemischen Abläufe und die Funktionsweise der unterschiedlichen Reaktionen eingegangen werden und es wird hierfür auf weiterführende Literatur verwiesen.¹⁵⁴

Um Eigenschaften von verschiedenen Kunststoffen miteinander zu kombinieren besteht die Möglichkeit unterschiedliche Monomere zusammen zu polymerisieren, doch das ist nicht immer technisch und allen voran ökonomisch sinnvoll realisierbar, weswegen in der Praxis oft zur Verwendung von „Blends“ gegriffen wird. Hierbei werden verschiedene Thermoplaste in Mischaggregaten nach dem Aufschmelzen miteinander vermengt, diese liegen dann homogen, aber chemisch nicht verbunden, in der Mischung vor und bieten so die Möglichkeit verschiedene Polymereigenschaften miteinander zu kombinieren.¹⁵⁵

5.1.2 Thermoplaste

Da es sich bei PET-Flaschen, die in dieser Studie eingehend behandelt werden, um Thermoplaste handelt soll auf diese im folgenden Kapitel genauer eingegangen werden, bevor der PET-Herstellungsprozess als solcher beschrieben wird. Darüber hinaus stellen Thermoplaste mit über 90% der technischen Kunststoffprodukte oder Konsumgüter den wichtigsten synthetischen Werkstoff dar.¹⁵⁶ Wie bereits zuvor festgehalten, haben Thermoplaste die entscheidende Eigenschaft, die sie von anderen Kunststoffen unterscheidet, nämlich, dass sie wieder aufschmelzbar sind. Dies bringt

¹⁵³ Eigene Darstellung

¹⁵⁴ Abts, G. (2010); Brinkmann et al. (2007); Kaiser, W. (2011), Keim, W. (2006)

¹⁵⁵ Abts, G. (2010), S.61 f.

¹⁵⁶ Abts, G. (2010), S.83

sowohl Vorteile, wie beispielsweise die Recyclingfähigkeit, als auch Nachteile, wie den begrenzten Einsatzbereich bei höheren Temperaturen, mit sich.¹⁵⁷ Thermoplaste setzen sich aus linearen oder schwach verzweigten Molekülketten zusammen und können reversibel verformt werden.¹⁵⁸ Die Monomere, aus denen die meisten Kunststoffe bestehen, abgesehen von biobasierten Kunststoffen, werden aus fossilen Rohstoffen, wie Erdöl, gewonnen, da diese bereits die durch synthetische Prozesse nur sehr schwer erzeugbaren Aromaten enthalten, welche für Thermoplaste wie etwa PET unverzichtbar sind.¹⁵⁹

Thermoplaste können durch mehrere Kriterien, wie die bereits angesprochene Unterscheidung von amorphen Thermoplasten, welche eine vollkommen ungeordnete Struktur aufweisen, und teilkristallinen Thermoplasten, bei denen einige Bereiche des Werkstoffes aus parallel ausgerichteten Makromolekülen bestehen, aufgeteilt werden. Doch auch aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit und den daraus resultierenden, multiplen Anwendungsmöglichkeiten können sie weiter unterschieden werden. So ist eine häufige Unterteilung, bei der die Grenzen sehr fließend sind, jene in Standardthermoplaste wie PE, PP und PVC, in technische Thermoplaste, welche eine höhere mechanische und thermische Beanspruchung erlauben, wie beispielsweise PA und PET, sowie Hochleistungs- beziehungsweise Hochtemperaturthermoplaste, welche für spezielle Anwendungen maßgeschneidert werden.¹⁶⁰ Hierzu ist anzumerken, dass PET-Blasformen, die zur Herstellung von Getränkeflaschen verwendet werden, aufgrund ihrer häufigen Verwendung zu den Standardthermoplasten zählen, die etwa 2/3 des gesamten Kunststoffbedarfs ausmachen.¹⁶¹

5.2 Polyethylenterephthalat

Polyethylenterephthalat (PET) ist durch zwei seiner Einsatzgebiete, auch bei nicht Fachleuten, bekannt geworden, eine davon ist die, in dieser Studie genauer untersuchte, Verwendung als Flasche für alkoholfreie Erfrischungsgetränke. Die andere ist die Verwendung in Textilien mit hoher Knitterfestigkeit.¹⁶² Die meisten, der in Deutschland produzierten PET-Flaschen, werden nach China exportiert und dort zu PET-Fasern für die Kleidungsindustrie verarbeitet.¹⁶³ Das Recycling, die Wiederverwendung, sowie der Export und die damit einhergehenden Probleme sollen noch ausführlicher in den folgenden Kapiteln angesprochen werden.

PET ist mit einem Anteil von 8% der Gesamtmenge an produziertem Kunststoff, wie bereits zuvor in Abbildung 3-4 dargestellt, einer der bedeutendsten Thermoplaste. Die Hauptkette der Moleküle besteht aus Kohlenstoff und Sauerstoffatomen, sowie großen

¹⁵⁷ Kaiser, W. (2011), S.109

¹⁵⁸ Wöhrle, D. (2019), S.52

¹⁵⁹ Abts, G. (2010), S.83

¹⁶⁰ Arnold, B. (2013), S.231

¹⁶¹ Abts, G. (2010), S.84

¹⁶² Eyerer, P. et al. (2008), S.30

¹⁶³ Abts, G. (2010), S.100

Benzolringen.¹⁶⁴ Es handelt sich bei PET um einen thermoplastischen Polyester, wobei Polyester einen Stoff bezeichnet, der aus einer Vielzahl von Estern besteht und aus der Reaktion aus Säure und Alkohol entsteht.¹⁶⁵ Eine Darstellung des Aufbaus von Polyethylenterephthalat ist in Abbildung 5-4 gegeben. Das nachgestellte „n“, in dieser Abbildung in der Farbe Rot gehalten, gibt an wie oft sich diese innerhalb der Klammern befindliche Einheit wiederholt. Dieser Wert beläuft sich bei PET für die Flaschenherstellung auf 100 bis 200, wobei das molekulare Gewicht des Polymers einen entscheidenden Einfluss auf die Verwendung hat und für gewöhnlich als intrinsische Viskosität angegeben wird, welche sich für PET Granulat in Flaschenqualität auf circa $0,7$ bis $0,85 \frac{dL}{g}$ beläuft.¹⁶⁶

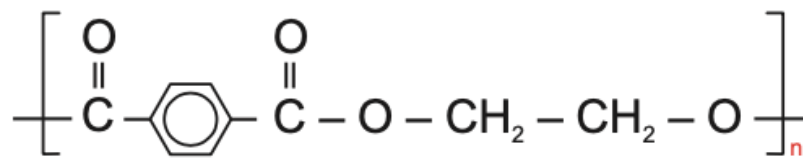


Abbildung 5-4 Chemische Struktur Polyethylenterephthalat¹⁶⁷

PET kristallisiert sehr langsam, wobei seine Eigenschaften stark von der Kristallinität abhängen und daher der Werkstoff, je nach Verarbeitungsbedingungen und Werkstoffzusammensetzung, im amorph-transparenten (PET-A) oder im kristallin-opaken Zustand (PET-C), vorliegen kann.¹⁶⁸ PET findet aufgrund seiner amorph-transparenten Erscheinungsform, die durch rasches Abkühlen erzielt werden kann, breite Verwendung als Glasersatzstoff, in Form von blasgeformten Kunststoffgetränkeflaschen.¹⁶⁹ Die Einsatzgrenzen von PET-A, der amorphen Erscheinungsform, liegen bei etwa -40°C bis 60°C Dauertemperatur, unter atmosphärischen Bedingungen und bei etwa 100°C unter Luftausschluss, wobei es oberhalb dieser Temperaturgrenze beginnt zu kristallisieren und trübe zu werden.¹⁷⁰

Durch seine gute Lichtundurchlässigkeit, in Kombination mit hoher Zähigkeit, guter Verarbeitbarkeit und Undurchlässigkeit gegenüber polaren Gasen wie O_2 und CO_2 , ist PET-A zu einem der beliebtesten Materialien für Getränkeverpackungen geworden.¹⁷¹

¹⁶⁴ Arnold, B. (2013), S.243

¹⁶⁵ Kauertz, B.; Detzel, A. (2017), S.6

¹⁶⁶ Plastics Europe (2016), S.6

¹⁶⁷ Quelle: Kaiser, W. (2011), S.326

¹⁶⁸ Abts, G. (2010), S.100

¹⁶⁹ Keim, W. (2006), S.208

¹⁷⁰ Kaiser, W. (2011), S.237

¹⁷¹ Arnold, B. (2013), S.243

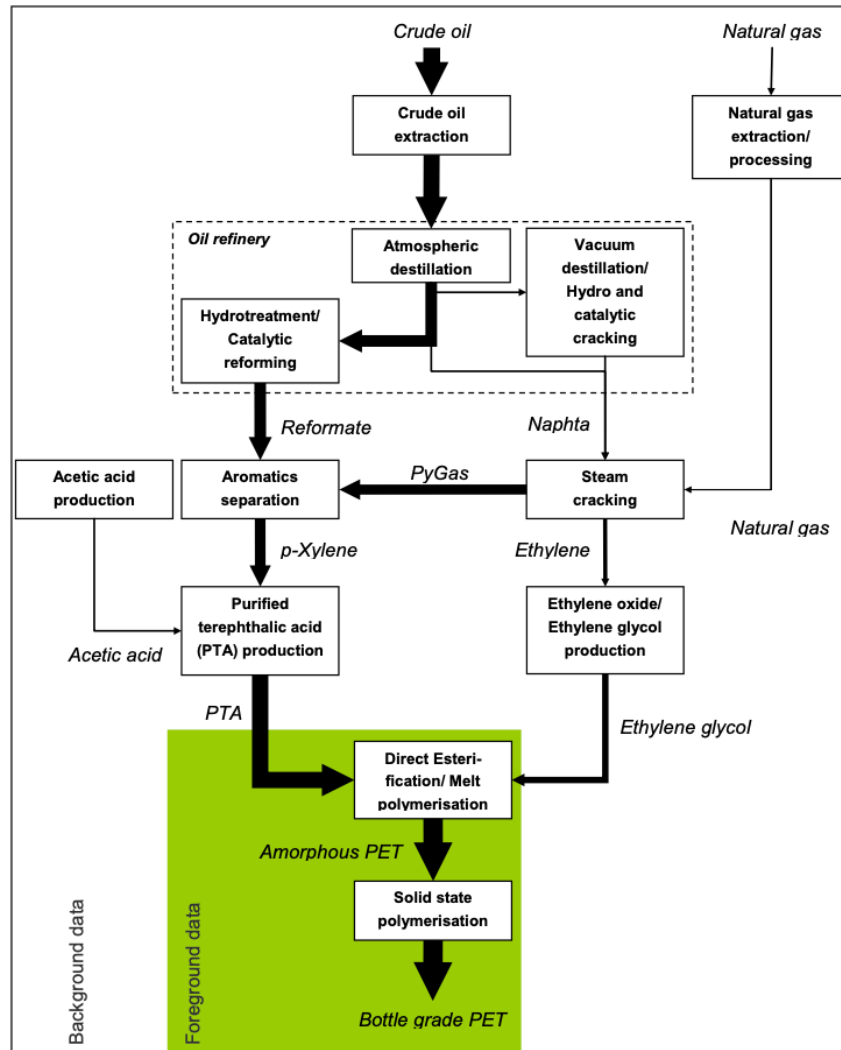
Im folgenden Abschnitt soll genauer auf die Herstellung von PET als Verpackungsmaterial für Getränkeflaschen eingegangen werden. Alle Informationen dafür wurden aus dem „Eco-Profile and Environmental Product Declaration of the PET Manufacturers in Europe“ entnommen und sind dort, bei Bedarf, genauer nachzulesen.¹⁷²

Die Monomere, aus denen PET hergestellt wird, namentlich Terephthalatsäure (PTA für purified terephthalic acid) und Monoethylenglycol (MEG), werden in der flüssigen Phase polymerisiert, um amorphes PET zu erzeugen. Das so entstandene Polymer wird jedoch meist eher für die Folienproduktion eingesetzt, während PET für die Flaschenerzeugung heutzutage als ein Copolyester hergestellt wird, der durch die Zugabe von 1-2% Benzene-1,3-dicarboxylsäure, um ein mögliches Beispiel zu nennen, leicht verändert wird. Zunächst wird in einem ersten Schritt der Veresterung PTA und MEG zu Bishydroxyethylterephthalat (BHET) umgewandelt, wobei Wasser als Nebenprodukt anfällt und ein Katalysator, wie zum Beispiel Antimon, von Nöten ist. Das entstandene Produkt BHET wird dann, in einem zweiten Schritt, in die Polykondensation geschickt, bevor es der nachfolgenden Schmelzpolykondensation zugeführt wird. Um das Reaktionsgleichgewicht in Richtung der Polymerbildung zu verschieben wird dabei ein Vakuum bei hohen Temperaturen gehalten, unter welchem das Wasser und andere Störstoffe abgeschieden werden. Da durch die Schmelzpolymerisation Makromoleküle mit zu geringem Molekulgewicht entstehen folgt eine Solid State Polymerisation, um PET in ausreichender Qualität für die Flaschenherstellung zu erzeugen. Die so generierten Granulate entstehen unter hohen Temperaturen und Druckverhältnissen und können im Anschluss direkt für das Spritzgieß und Streckblasverfahren eingesetzt werden. Upstreamseitig wird PTA aus der Oxidation von P-Xylene, mittels Cobaltmanganbromidkatalysator, bei Temperaturen zwischen 175°C und 225°C und erhöhten Drucken von etwa 15-30bar, durch Kristallisation erzeugt und nachfolgend in einem weiteren Schritt nachgereinigt, um reine Säure zu erhalten. Am Ende des ganzen Prozesses liegt PTA schließlich in Form von weißem Pulver vor. P-Xylene selbst wird, zum größten Teil, durch das katalytische Reforming von Naphtha, also Rohbenzin, gewonnen. Hierbei wird mehreren Destillationskolonnen das Ausgangsmaterial zugeführt und die entstandenen Produkte abgezogen. Ethylenglycol entsteht durch eine Hydrolysereaktion von Ethylenoxid, zusammen mit Wasser bei erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen. Eine verbreitete Methode, um Ethylenoxid herzustellen, ist es gasförmiges Ethylen und Sauerstoff über einen Katalysator reagieren zu lassen. Das Ausgangsprodukt Ethylen wird dabei, typischerweise, über Pipelines aus bezogen, die aus dem Steamcrackingprozess der Petrochemie stammen, bei dem durch thermisches Cracken langkettige Kohlenwasserstoffe, in der simultanen Gegenwart von Wasserdampf in kurzkettigere Kohlenwasserstoffe aufgeteilt wird.¹⁷³

Abbildung 5-5 zeigt eine Übersicht über eine solche PET-Granulatherstellung.

¹⁷² Plastics Europe (2016), S.7 ff.

¹⁷³ Plastics Europe (2016), S.7 ff.


 Abbildung 5-5 Fließbild PET-Produktion¹⁷⁴

5.3 Spritzgieß-, Extrusionsverfahren und Blasformen

Thermoplaste werden häufig als Granulate angeboten, da sie sich in diesem Zustand problemlos fördern lassen. Bevor sie aufgeschmolzen und in die gewünschte Form gebracht werden, die nach dem Abkühlvorgang bestehen bleibt.¹⁷⁵ Der erste Formgebungsprozess wird dabei als „Urformen“ bezeichnet, während alle weiteren Formgebungen, bei denen gegebenenfalls eine Zwischenerwärmung nötig ist, als „Umformen“ bezeichnet werden.¹⁷⁶ Da die Makromoleküle selbst im geschmolzenen Zustand der Verformung einen gewissen Widerstand entgegensetzen, weil sie teilweise viskoelastisches Verhalten zeigen, werden sie beim sogenannten Spritzgießverfahren,

¹⁷⁴ Quelle: Plastics Europe (2016), S.13

¹⁷⁵ Abts, G. (2010), S.71

¹⁷⁶ Keim, W. (2006), S.273

unter hohen Drucke, von bis zu 2000bar, verarbeitet.¹⁷⁷ Dieses Verfahren erlaubt es auch große, aufwendige Werkstücke herzustellen, jedoch sind nicht zuletzt aufgrund der hohen Arbeitsdrucke die Kosten für diese Anlagen im fünf- bis sechsstelligen Euro-Bereich, weswegen sich das Spritzgussverfahren für geringe Stückzahlen nicht rentiert.¹⁷⁸ Abbildung 5-6 zeigt eine schematische Darstellung einer Spritzgießmaschine, bei der über einen Antrieb das Granulat über die Schnecke in den beheizten Bereich getrieben wird, in dem das Granulat aufgeschmolzen und schließlich in die Werkzeugform eingespritzt wird.

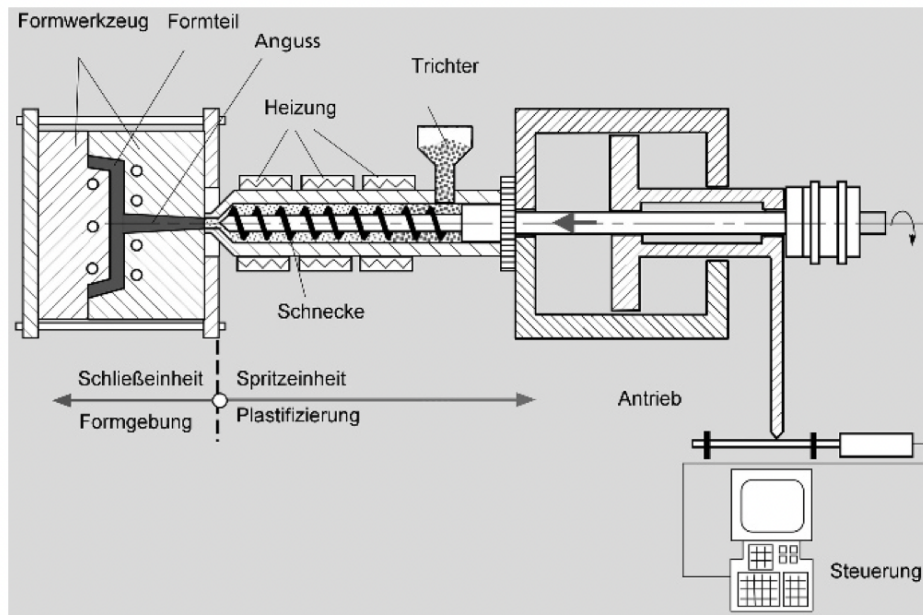


Abbildung 5-6 Schematische Darstellung einer Spritzgießmaschine¹⁷⁹

Neben dem Spritzgießverfahren gibt es auch das sogenannte Extrusionsverfahren, das bei Hohlkörpern, wie Rohren und ähnlichen, zum Einsatz kommt.¹⁸⁰ Beim Extrusionsverfahren werden die Polymergranulate ebenfalls über eine Förderschnecke in einen beheizten Zylinder eingebracht und aufgeschmolzen, danach wird die Schmelze durch eine Düse gepresst und anschließend direkt in ein nachgeschaltetes Werkzeug zur Formgebung eingebracht.¹⁸¹

Vorformlinge aus einigen Kunststoffen, wie beispielsweise PVC, können nur schlecht im Spritzgießverfahren hergestellt werden, jedoch haben spritzgegossene Vorformlinge den entscheidenden Vorteil, dass sie einerseits einen sehr präzisen Hals aufweisen und andererseits eine sehr genaue Wandstärkenverteilung haben.¹⁸² Darüber hinaus weisen spritzgegossene Bauteile keine Quetschnähte an den Seiten oder dem Boden, sondern

¹⁷⁷ Eyerer, P. et al. (2008), S.227

¹⁷⁸ Abts, G. (2010), S.71 f.

¹⁷⁹ Quelle: Eyerer, P. et al. (2008), S.227

¹⁸⁰ Abts, G. (2010), S.71

¹⁸¹ Abts, G. (2010), S.136

¹⁸² Maschinenbau-Wissen, <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/420-streckblasen> (Zugriff: 12.03.2021)

lediglich Angusspunktmarkierungen auf.¹⁸³ Dieser Sachverhalt ist im Weiteren anschaulich in der Abbildung 5-7 und Abbildung 5-8 dargestellt, zum Vergleich zwischen Streckblasen und Extrusionsblasformen, dargestellt.

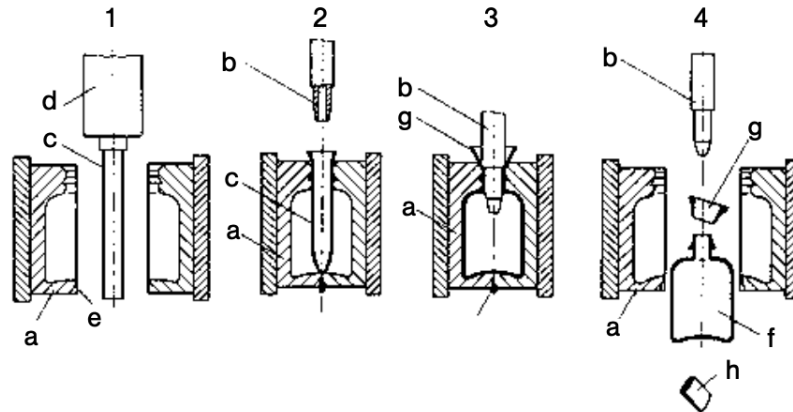


Abbildung 5-7 Verfahrensschritte des Extrusionsblasverfahrens¹⁸⁴

Hierbei stellt der mit (a) beschriftete Teil das Blaswerkzeug, (b) den Kalibrierblasdorn, (c) den Vorformling, (d) den Schlauchkopf, (e) die Quetschkante, (f) das Blasteil, (g) den Halsbutzen, (h) den Bodenbutzen dar, sowie die Zahl (1) die Extrusion des Vorformlings beziffert, (2) das Schließen des Blaswerkzeugs, wobei das untere Ende des Vorformlings durch die Quetschkanten, welche später sichtbar bleiben verschlossen und verschweißt wird, (3) das Einpressen des Kalibrierdorns, sowie Aufblasen des Vorformlings zum Blasteil und Kühlen, sowie abschließend (4) das Entformen des Bauteils, das Abtrennen des Halsbutzens und des Bodenbutzens darstellt.¹⁸⁵

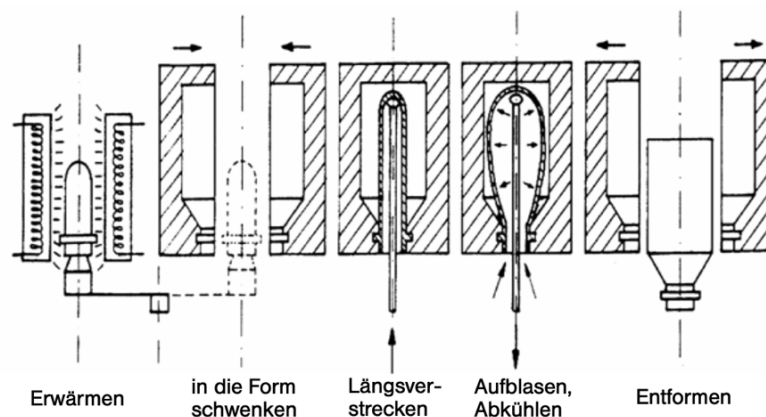


Abbildung 5-8 Prinzip des Streckblasens¹⁸⁶

¹⁸³ Abts, G. (2010), S.139

¹⁸⁴ Quelle: Abts, G. (2010), S.138

¹⁸⁵ Abts, G. (2010), S. 138

¹⁸⁶ Quelle: Abts, G. (2010), S.139

Beim Blasformen können eprouvettenförmige Vorprodukte, die aus einem Extrusions- oder Spritzgießprozess stammen, bei erhöhten Temperaturbedingungen mittels Blasluft, und je nach Vorgaben auch mittels mechanischer Streckhilfen, zu Hohlkörpern geformt beziehungsweise „aufgeblasen“ werden.¹⁸⁷ Beim Herstellen von Hohlkörpern handelt es sich, beim Blasverfahren, um einen diskontinuierlicher Prozess, der entweder als Extrusionsblasformen oder als Spritzstreckblasformen geführt werden kann.¹⁸⁸

Zur Flaschenherstellung wird beim Extrusionsblasformen der vorgeformte Schlauch aus dem Extrusionsprozess einseitig verschlossen und anschließend die Flasche aufgeblasen wodurch eine sichtbare Bodennaht an der Unterseite der Flasche entsteht.¹⁸⁹ Beim Streckblasen werden die Rohlinge aus teilkristallinem PET vor dem Aufblasen zusätzlich in Längsrichtung gestreckt, dies führt zu besseren mechanischen Eigenschaften, sowie zu einem besseren Erscheinungsbild, besserer Oberflächenqualität und leichterem Einhaltung von konstanten Wanddicken.¹⁹⁰

5.4 Aufbereitung und Recycling

In den siebziger Jahren wurden weltweit die ersten Versuche unternommen das extrem heterogene Material des Haushaltsabfalls mit Hilfe von Recyclinganlagen zu sortieren. Diese Anlagen wurden dafür, aus anderen Bereichen der Verfahrenstechnik, wie zum Beispiel dem Bergbau, entliehen und unter enormen technischen und finanziellen Aufwand adaptiert.¹⁹¹

Im Jahr 2014 wurden in der EU knapp 39,5% der insgesamt 25,5 Millionen Tonnen anfallender Kunststoffabfälle oder Altkunststoffe einer thermischen Verwertung zugeführt, circa 30,8% werden deponiert und 29,7% mechanisch recycelt.¹⁹² Um die von der EU angestrebte Recyclingquote für Verpackungen erhöhen zu können, bedarf es einer Steigerung des Anteils an rezyklierten Altkunststoffen. Nimmt man die Richtlinie für Einwegprodukte als Beispiel, die für PET-Einweggetränkeflaschen einen Rezyklatanteil von 25% bis 2025 und 30% bis 2030 vorschreibt, so kann Österreich dieses Ziel nur erreichen, indem Post-Consumer-PET importiert wird. Denn für in Österreich gesammeltes Post-Consumer-PET liegt der Rezyklateinsatz bei konsumierten PET-Flaschen bei gerade einmal 14%.¹⁹³

Auf erster Ebene haben sich drei Behandlungsstrategien für Kunststoffabfälle etabliert:¹⁹⁴

- Die Deponierung stellt eine einfache und schnelle Form der Beseitigung dar, jedoch ohne Verwertungspotenzial aufzuweisen. Diese Form der Abfallbeseitigung ist in einigen Ländern Europas, wie beispielsweise

¹⁸⁷ Eyerer, P. et al. (2008), S.274 f.

¹⁸⁸ Abts, G. (2010), S.138

¹⁸⁹ Eyerer, P. et al. (2008), S.275 f.

¹⁹⁰ Abts, G. (2010), S.139

¹⁹¹ Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.483

¹⁹² Bauer, M. et al. (2017), S.447

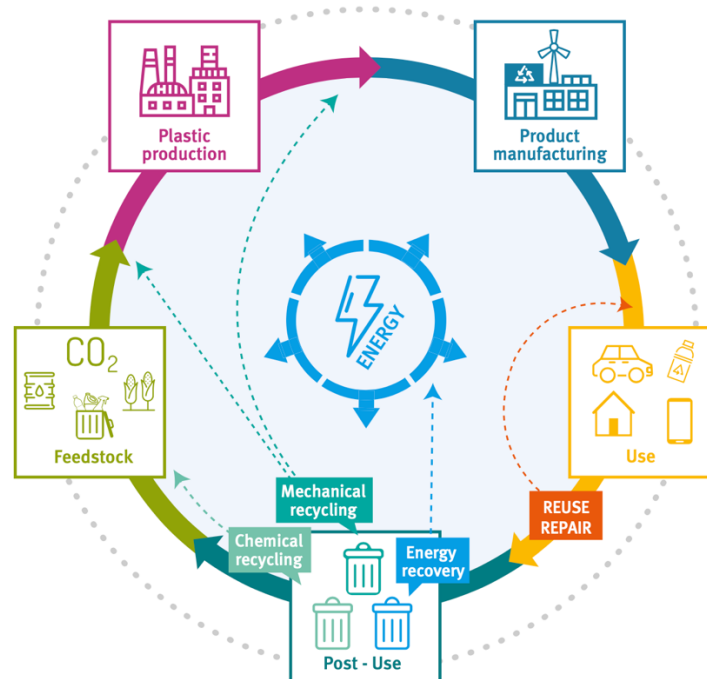
¹⁹³ Pomberger, R. (2021), S.3

¹⁹⁴ Lechleitner, A. et al. (2020), S.48

- Österreich und Deutschland, aufgrund des hohen Anteils an organischem Kohlenstoff und den damit einhergehenden guten Brennwerten, verboten.
- Die thermische, oder auch als energetisches Recycling bezeichnete, Verwertung ist eine Methode der Abfallverwertung, bei der der energetische Inhalt von Abfällen genutzt wird. Dadurch können primäre Energieträger zur Energiegewinnung eingespart werden und stattdessen Kunststoffabfälle verwendet werden, die ähnlichen Heizwert aufweisen.
 - Das Recycling bezeichnet grob ein Vorgehen, bei dem Werkstoffe oder deren chemische Bausteine, aus den Abfallströmen rückgewonnen werden. So wird im österreichischen Gesetz stoffliches Recycling als jene Verwertungsmaßnahme beschrieben, bei der es zu einer Substitution von primären Rohstoffen kommt und welche explizit nicht unter den zuvor genannten Bereich der thermischen Verwertung fällt.

Das Recycling selbst kann weiter unterteilt werden in mechanisches, oder auch als werkstoffliches Recycling bezeichnetes Recycling, bei dem die Polymerstruktur weitestgehend beibehalten wird und der Kunststoff lediglich aufgeschmolzen und danach in eine neue Form gebracht wird. Sowie in rohstoffliches, beziehungsweise chemisches Recycling, bei dem lediglich die chemischen Bausteine der Kunststoffe zurückgewonnen werden.¹⁹⁵ Abbildung 5-9 stellt einen Kunststoffkreislauf mit den verschiedenen Optionen in der Post-Konsumentenphase, thermische Verwertung, chemisches oder mechanisches Recycling dar.

¹⁹⁵ Lechleitner, A. et al. (2020), S.48

Abbildung 5-9 Kunststoffkreislauf¹⁹⁶

Es gilt darüber hinaus zwischen der späteren Verwendung des wieder aufbereiteten Kunststoffes zu unterscheiden. Recyceltes PET (R-PET) kann für die Anwendung auf dem Gebiet der Nicht-Lebensmittelkontakt Anwendungen, oder für Lebensmittelkontaktanwendungen eingesetzt werden.¹⁹⁷ Je nachdem, welcher der beiden Anwendungsbereiche als Einsatzbereich definiert wird, gelten unterschiedliche Qualitätsanforderungen, vor allem bezogen auf maximale Restkonzentrationen an Schadstoffen. Um ein Rezyklat als Ersatz für den Primärrohstoff einsetzen zu können, muss die Reinheit des Recyclingkunststoffes im Bereich jenseits der 99% liegen.¹⁹⁸ Eine besondere Verunreinigung, die bei der ursprünglichen Produktion jedoch beabsichtigt in Kauf genommen wird, ist der Zusatz von Farbstoffen. Zwar ist das wiederholte Aufschmelzen von eingefärbtem Material an sich kein Problem oder ein Schadstoff per se, jedoch verbleibt die Farbe im Material. Deswegen darf es nicht mit klarem Kunststoff, oder anderen Farben vermischt werden, um ein möglichst hochwertiges und universell einsetzbares Granulat zu erzeugen.¹⁹⁹

Inwiefern die unterschiedlichen Recyclingmethoden eine Reduktion der Restkonzentration ermöglichen, soll in einem späteren Abschnitt dieses Kapitels diskutiert werden. Zuvor wird ein kurzer Überblick über die für das Kunststoffrecycling wichtigen Aufbereitungsmaschinen, deren Funktionsweise und mögliche

¹⁹⁶ Quelle: Plastics Europe (2018), S.8

¹⁹⁷ Kauertz, B.; Detzel, A. (2017), S.30

¹⁹⁸ Lechleitner, A. et al. (2020), S.48

¹⁹⁹ Kauertz, B.; Detzel, A. (2017), S.31

Vorgehensweisen gegeben, bevor anhand eines realen Beispiels ein Verfahrensablauf einer Kunststoffsortieranlage angeführt wird.

5.4.1 Mechanische Aufbereitung

Besonders im Bereich der Kunststoffverpackungen ist es von besonderer Wichtigkeit die Zusammensetzung des Abfallstromes und die darin enthaltenen unterschiedlichen Polymere zu kennen, um diese effizient und möglichst sortenrein zu recyceln.²⁰⁰ Denn um eine gute Wiederverwendbarkeit der entstehenden Rezyklate sicherzustellen, ist, wie bereits erwähnt, eine hohe Reinheit von Nöten. Dies bezieht sich jedoch nicht nur auf Verunreinigungen wie Lebensmittelreste oder Farbstoffzusätze, sondern auch auf andere Kunststoffsorten. Dies ist einer der Hauptfaktoren weswegen zum momentanen Zeitpunkt hauptsächlich getrennt erfasste Altstoffe dem Recycling zugeführt werden.²⁰¹ Betrachtet man beispielsweise die Kunststoffsammlung über den „gelben Sack“ und alle darin vorkommenden Stoffe, inklusive denen, die fälschlicherweise dieser Fraktion zugeteilt wurden, so ist klar, dass es sich hierbei um keine getrennt erfasste Sammlung handelt und die enthaltenen Produkte Absatzschwierigkeiten aufweisen und daher als Rezyklat schwer zu vermarkten sind.²⁰² Eine sortenreine Sammlung kann in diesem Sinne nur durch eine separate Sammlung, wie beispielsweise die „Froschaugen-Container“ oder durch das Einführen eines Pfandsystems erfolgen. Bei einer gemischten Sammlung, wie es in Österreich weit verbreitet Anwendung findet, kommen zu viele verschiedene Kunststoffe zusammen.

Dies stellt Aufbereiter vor die Aufgabe heterogene Inputströme möglichst exakt aufzuteilen, um bei der Verarbeitung der entstandenen Kunststoffgruppen im Recycling Prozess keine Schwierigkeiten zu haben, denn schon eine geringe Verunreinigung kann aufgrund der grundsätzlich unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Kunststoffe, wie sie bereits in Kapitel 5.1 erläutert wurden, zu Problemen bei der weiteren Prozessführung beitragen. Die unterschiedlichen Schmelzpunkte und Schmelzverhalten können zu Einschlüssen im Material führen welche später eine deutliche Anfälligkeit für Risse oder Brüche zeigen. Darüber hinaus können diese auch zu Problemen und Verstopfungen der Extruder führen.²⁰³

Um möglichst reine Stoffströme zu erzeugen haben sich verschiedene mechanische Aufbereitungsmöglichkeiten durchgesetzt. Zunächst werden Störstoffe wie metallische Verunreinigungen oder Glasfragmente durch Windsichtung, Magnet- oder Wirbelstromscheidung entfernt, wodurch die eigentliche Trennaufgabe darin besteht verschiedene Kunststoffsorten aufzuteilen. Abhängig davon, zwischen welchen Kunststoffen im speziellen getrennt werden soll, können beispielsweise die zuvor beschriebenen Schwimm-Sink-Tanks, Sortierzentrifugen oder Hydrozyklone zum Einsatz kommen. Diese basieren alle auf dem Prinzip der Dichtentrennung, welche bei

²⁰⁰ Van Eygen, E. et al. (2018), S.2

²⁰¹ Pomberger, R. (2021), S.4

²⁰² Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.629

²⁰³ Lechleitner, A. et al. (2020), S.48

Kunststoffen, aufgrund der unterschiedlichen Dichten wie sie Tabelle 5-5 zu entnehmen sind, eine weitverbreitete Option zur Aufbereitung darstellt.²⁰⁴

Tabelle 5-5 Übliche Dichten verschiedener Kunststoffe²⁰⁵

Kunststoff	Übliche Dichte
Polyamid (PA)	1,14
Polyethylenterephthalat (PET)	1,38
Polyethylen (PE-HD) hoher Dichte	0,95
Polyethylen (PE-LD) niedriger Dichte	0,92
Polypropylen (PP)	0,90
Polyvinylchlorid (PVC)	1,40
Polystyrol (PS)	1,05

Die zweite, weitverbreitete Technologie ist die optische Sortierung, bei der es sich um einen trockenen Aufbereitungsprozess handelt, bei dem die einzelnen Partikel durch Sensoren erfasst werden. Diese Sensoren können anhand unterschiedlicher Eigenschaften, wie Farbe, Form, Materialzusammensetzung oder enthaltener Feuchtigkeit, der Partikel diese, aufgrund der spektralen Eigenschaften, unterscheiden und deren Position erfassen. Je nachdem, ob die Partikel die gewünschten Eigenschaften aufweisen, können diese im Anschluss durch die zuvor festgestellte Position zielgenau über Luftdüsen oder Klappen ausgetragen werden. Diese Methode hat vor allem in den letzten Jahren einen deutlichen Aufschwung erlebt da, wie bereits erwähnt, Rechenleistungen für die Erkennung nun einfacher zur Verfügung gestellt werden können.

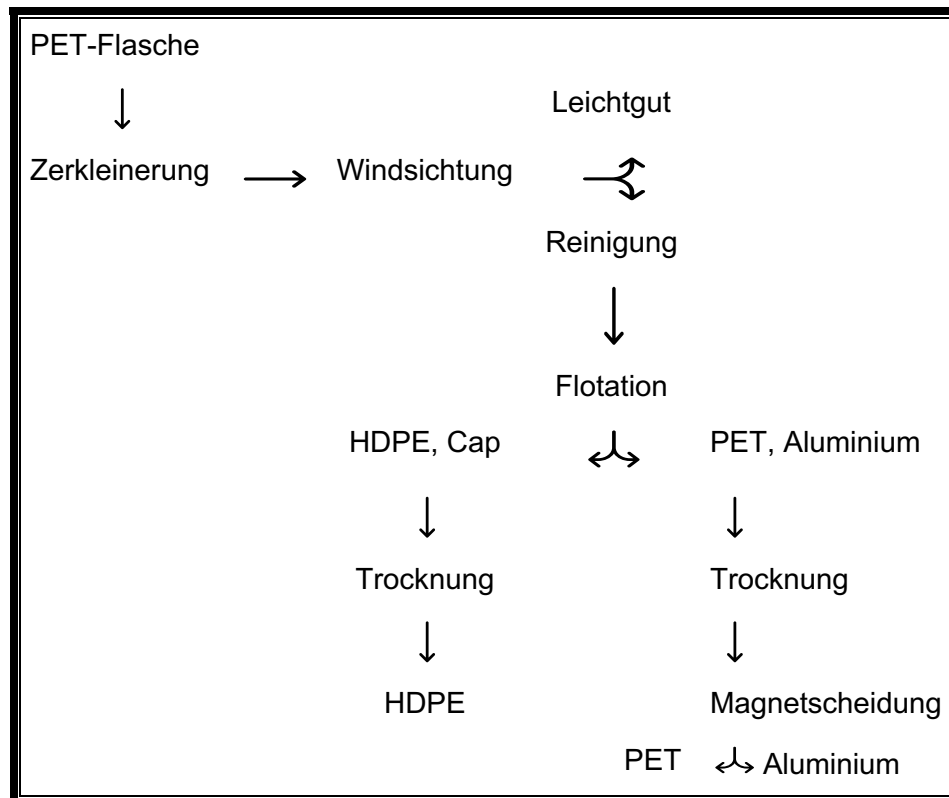
Eine dritte Möglichkeit stellt die elektrostatische Trennung durch triboelektrische Freifallscheidung dar. Diese Methode nutzt die unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen der Kunststoffe aus, indem die Partikel durch intensiven Kontakt untereinander und mit der Gerätewandung elektrisch aufgeladen werden und in einem nachgeschalteten elektrischen Feld eines Freifallscheiders dadurch abgeschieden werden. Abhängig von der Zusammensetzung des Aufgabestromes und des gewünschten Produktes, sowie der vorgeschriebenen Reinheit, sind teilweise sehr aufwendige Anlagen mit vielen Prozessschritten nötig, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen, wobei das entstehende Granulat, auch Regranulat genannt, diese Kosten tragen muss.²⁰⁶

Ein mögliches Fließbild einer Kunststoffsortierung kann aus Abbildung 5-10 entnommen werden, bevor das nachfolgende Kapitel ein reelles Beispiel einer österreichischen Sortiereinrichtung für Leichtverpackungen gibt.

²⁰⁴ Lechleitner, A. et al. (2020), S.48

²⁰⁵ Quelle: in Anlehnung an Eyerer, P. et al. (2008), S.77, S.161

²⁰⁶ Lechleitner, A. et al. (2020), S.48 f.

Abbildung 5-10 Beispielhaftes Fließbild einer Kunststoffsortierung²⁰⁷

5.4.2 Beispiel einer Kunststoffsortieranlage²⁰⁸

Die hier verwendete Information, zur beschriebenen Anlage der Saubermacher Dienstleistungs AG in Graz, entspringt der „IMKREIST“ Studie zur Implementierung der europäischen Kreislaufwirtschaftsziele durch kooperative Strategien in der Steiermark.²⁰⁹ Bei dieser, in der Steiermark situierten Kunststoffsortieranlage, handelt es sich um die größte Sortiereinrichtung für Kunststoffe in Österreich, die Verpackungsabfälle aus Haushalten, aus der gelben Tonne beziehungsweise dem gelben Sack, sowie Gewerbebetrieben bekommt. Die Anlagenkapazität beträgt 32.000t/a Kunststoffverpackungen, wovon etwa 40% der Outputmaterialien für die stoffliche Verwertung vorkonzentriert werden und der verbleibende Teil als Ersatzbrennstoff für die Zementindustrie eingesetzt wird. Der Verfahrensablauf beginnt mit einem Sacköffner und einer Weiterleitung in ein Trommelsieb mit 50mm und 250mm Lochweite. Der Siebdurchgang <50mm wird direkt für die Zementindustrie als Ersatzbrennstoff verwendet, während die Fraktion 50-250mm auf ein Kreisschwingsieb mit einer Maschenweite von 50mm aufgegeben wird, wodurch es zu einer neuerlichen Trennung zwischen der Fraktion >50mm und <50mm kommt. Die größte Fraktion mit >250mm wird direkt auf eine Sortierbühne gebracht, wo Stör- und Wertstoffe manuell aussortiert werden. Die Fraktion <50mm wird wieder dem Reststoffstrom für die

²⁰⁷ Quelle: Angelehnt an Lin, C. C. (1998), S.131

²⁰⁸ Schaffernak, M. A. et al. (2020), S.26 ff.

²⁰⁹ Schaffernak, M. A. et al. (2020), S.26 ff.

Ersatzbrennstoffbehandlung zugeführt, während die verbliebene Fraktion, 50-250mm, in den nachgeschalteten Windsichter weiter befördert wird, wodurch die Leichtfraktion, Folienstoffe und ähnliches, abgeschieden wird. Die abgezogene Leichtfraktion wird anschließend der manuellen Sortierung zugeführt und die enthaltenen Nutzfraktionen werden zu Ballen gepresst. Der verbliebene Stoffstrom wird mittels Überbandmagneten von eventuell enthaltenen Eisenmetallfraktionen befreit und zu einer ballistischen Trennung mit erneuter Siebung bei 50mm befördert. Anschließend wird die verbliebene Fraktion >50mm einer sensorgestützten Sortierung unterzogen, bei der mittels NIR-Technologie PET, HDPE, PP, und PS sortiert wird. Bevor die so entstandenen Produkte zu Ballen gepresst werden, wird die PET-Fraktion noch nach Farben getrennt. Das Ausgangsmaterial einer solchen Sortieranlage ist das Inputmaterial für die eigentliche Wiederverwendung, auf welche nachfolgend genauer eingegangen werden soll.²¹⁰

5.4.3 Chemische Aufbereitung²¹¹

Es ist, aufgrund der nötigen Prozessschritte und der dadurch entstehenden Kosten, oftmals nicht wirtschaftlich sinnvoll Kunststoffe mechanisch aufzubereiten. Eine Alternative dazu bietet das rohstoffliche oder chemische Recycling, bei dem es um eine Rückgewinnung der chemischen Bausteine der Werkstoffe geht. Hierbei werden mithilfe eines chemischen Prozesses, unter Einwirkung von Wärme, Katalysatoren, Wasserstoff und Lösungsmitteln, die langkettigen Makromoleküle der Polymere in kürzere Kohlenwasserstoffketten zerlegt. Bei dieser Zerlegung in Monomere spielen die Verunreinigungen der Aufgabeströme eine untergeordnete Rolle. Diese lassen sich, ähnlich wie die Polymerisationsreaktionen, weiter unterteilen, abhängig von der wirkenden Triebkraft der Kettenspaltung. Es wird unterschieden zwischen Hydrocracking, thermokatalytischer Konversion, thermischer Konversion, chemischer Depolymerisation und Vergasung, welche absteigende Ansprüche an den Reinheitsgrad stellen.²¹²

Die chemische Depolymerisation, oder auch Chemo- oder Solvolyse genannt, ist eine Reaktion bei der chemisch gesehen die Umkehrreaktion, beziehungsweise eine sehr ähnliche Reaktion, der Polykondensation, welche genauer in Kapitel 5.1.1 erklärt wurde, abläuft. Dies ist allerdings sogleich einer der Nachteile dieses Prozesses, weil sie ausschließlich für Polykondensationskunststoffe, wie Polyester oder Polyamide, angewandt werden kann, die durch Abspaltung von Wasser oder anderen Verbindungen entstehen. Dennoch soll auf dieses Verfahren hier genauer eingegangen werden, weil es bereits in der Aufbereitung von PET weitverbreitete Anwendung findet. Bei der Chemolyse können unterschiedliche Reagenzien als Lösungsmittel zum Einsatz kommen, weswegen dieser Prozess weiter unterteilt werden kann in die Glykolyse, Methanolyse, Hydrolyse sowie die Ammonolyse und Aminolyse.

²¹⁰ Schaffernak, M. A. et al. (2020), S.26 ff.

²¹¹ Lechleitner, A. et al. (2020), S.50 ff.

²¹² Lechleitner, A. et al. (2020), S.50

Je nach Prozess fallen demnach auch andere Produkte an, so liefert die Glykolyse von PET, die in diesem Bereich die älteste und einfachste Anwendung ist, unterschiedliche Glykole ein, die bei Temperaturen von 180°C bis 204°C in die Struktur des Polymers diffundieren. Dieses quillt dadurch auf und ermöglicht die Reaktion der Esterbindung des PET Moleküls mit dem Glykol. Dieser Ablauf wird durch verschiedene Faktoren verbessert, wie beispielsweise die Anwesenheit eines Katalysators, wie Zeolith, eine Kombination mehrerer Lösungsmittel und eine große spezifische Oberfläche der Kunststoffe, die durch eine starke Zerkleinerung des Einsatzmaterials erreicht wird. Hierbei entstehen Verbindungen, wie zum Beispiel Bishydroxyethylterephthalat (BHET) und PET-Glykolyse, die, nach dem Durchlaufen einer nachgeschalteten Reinigung, unter anderem wieder für die Herstellung für PET-Flaschen eingesetzt werden können.

Die Methanolyse unterscheidet sich dahingehend, dass Methanol zur Aufspaltung der Polyesterstruktur verwendet wird und höhere Druckbedingungen zum Prozessablauf nötig sind, wodurch in weiterer Folge andere Katalysatoren zum Einsatz kommen und andere Endprodukte entstehen, wobei diese ebenso zur erneuten PET-Synthese verwendet werden können und eine höhere Reinheit aufweisen.

Bei der Hydrolyse, der dritten Form der Solvolyse, wird PET bei neutralen, sauren oder basischen Bedingungen, durch Zugabe von Säuren oder Natriumhydroxid, zu Wasser in Terephthalat Säure und Ethylenglykol aufgespalten. Diese Form findet trotz des energetisch geringen Aufwandes kaum Anwendung, weil die Produkte in geringer Reinheit vorliegen und nachbehandelt werden müssen und die Reaktion vergleichsweise langsam abläuft. Bei der letzten Verfahrensform der Ammonolyse mit Ammoniak und Aminolyse in gleichzeitiger Anwesenheit von primären Aminen, kommt es zur Umsetzung durch beispielsweise Methylamin zu Diamiden der Terephthalat Säure, welche vielseitige Anwendung, unter anderem in der Pharma- und Textilindustrie findet. Diese Möglichkeit findet jedoch derzeit wenig Aufmerksamkeit.²¹³

Durch den geringen Reinheitsanspruch von chemischem Recycling im Vergleich zu werkstofflichem Recycling bietet dieser alternative Aufbereitungsweg eine Möglichkeit das Recycling auszubauen und vor allem Verpackungen auf Kunststoffbasis im Wertstoffkreislauf zu halten.

5.4.4 Ökonomische Analyse

Um eine möglichst sortenreine Trennung der Kunststoffe zu erzielen bedarf es oft vieler aneinander gereihter Prozessschritte. Bei diesen ist auch immer zu entscheiden, ob eine möglichst vollständige Trennung der Verunreinigungen gewünscht ist, wodurch es zwangsweise zu einem Verlust an Wertstoffen kommt, oder ob eine möglichst vollständige Rückgewinnung als Ziel gesetzt wird, wodurch weniger Verluste anfallen jedoch Verunreinigungen zu erwarten sind.²¹⁴ Wie bereits erwähnt sind momentan nur Wertstoffe aus einer getrennten Sammlung wirtschaftlich gewinnbringend als Rezyklat zu verkaufen, denn nur diese Fraktion kann eine ausreichende Reinheit durch relativ

²¹³ Lechleitner, A. et al. (2020), S.51 f.

²¹⁴ Lechleitner, A. et al. (2020), S.49

moderaten Aufbereitungsaufwand erzielen, um in Frage zu kommen. Denn mit steigenden Verunreinigungen und Inhomogenität des Stoffstromes wächst der Aufwand an Prozessschritten und mit ihnen die entstehenden Aufbereitungskosten. Sortierung von Leichtverpackungen, dementsprechend Fraktionen, die über den „gelben Sack“ oder die „gelbe Tonne“ entsorgt wurden, kann, unter anderem in Anlagenkonfigurationen, die in Tabelle 5-6 dargestellt sind, erfolgen.

**Tabelle 5-6 Investitionen verschiedener Sortieranlagen von Leichtverpackungen
(Preisbasis 2018)²¹⁵**

Anlagentyp ^a	Spanne der Investitionen (Euro)
Grundkonfiguration ^b	50.000 – 150.000
<ul style="list-style-type: none"> • Absieben der Feinfraktion • Manuelle Sortierung der verschiedenen Materialien 	
Erweiterte Konfiguration	150.000 – 2.500.000
<ul style="list-style-type: none"> • Wie Grundkonfiguration erweitert um: • Sichtung • Automatische Sortierung (mittels Sensoren und Detektoren) • Manuelle Nachsortierung 	
Fortgeschrittene Konfiguration	k.A.
<ul style="list-style-type: none"> • Sortec-Technologie • Trockenmechanische Aufbereitung • Nassmechanische Aufbereitung • Kunststoffveredlung 	

^a mögliche Konfigurationen; Kostenblöcke variieren je nach Anlagentyp

^b für durchschnittliche Prozesslinie

Der Markt für den Anlagenoutput bestimmt die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Verfahren, wobei auch die Aufbereitung der Fraktionen für die thermische Verwertung in Zementwerken eine Rolle spielt.²¹⁶

Darüber hinaus hängen die Preise für Kunststoffprodukte in hohem Maße vom gegenwärtigen Erdölpreis und damit vom Weltmarkt und einer Vielzahl anderer Faktoren ab. Da beim Einsatz von Regranulat mit einer Abweichung der Eigenschaften von jenen der Neuware zu rechnen ist, erwerben nur Verarbeitungsbetriebe, die auf solche Schwankungen eingestellt und dafür ausgestattet sind solche Produkte. Diese Betriebe

²¹⁵ Quelle: Angelehnt an Billitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.819

²¹⁶ Billitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.819

verarbeiten jedoch oftmals den Kunststoff zu Verpackungsfolien für den Gütertransport, zu Rohren oder ähnlichem. PE-Regranulat muss daher am Markt um 0,13Euro/kg günstiger angeboten werden als die Neuware, um überhaupt in Betracht gezogen zu werden. Noch drastischer verhält es sich mit bereits eingefärbten oder schwarzem Regranulat welches 0,50Euro/kg günstiger angeboten werden muss als Neuware.²¹⁷

Der hier dargelegte Sachverhalt bezogen auf die Erlöse, stellt zwei Probleme der angestrebten Kreislaufwirtschaft dar. Einerseits ist eine Verwendung von Kunststoffen, die aus dem Lebensmittelkontaktbereich als Abfall hervorgehen, und später zu Folien oder ähnlichem verarbeitet werden, nicht im vollen Sinne als Recycling zu bezeichnen. Da es sich bei einer solchen Wiederverwendung eher um ein Downcycling der Produkte handelt. Andererseits stellt es die Problematik der Färbung von Kunststoffen, insbesondere PET-Flaschen, sehr gut dar, denn ein Produkt, dass einerseits die erhöhten Aufbereitungskosten aufgrund von Qualitätsanforderungen tragen muss aber andererseits um 0,50Euro/kg weniger erzielt am Markt bietet wenig Anreize in eine Investition in Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft.

²¹⁷ Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013), S.631

6 Technische Grundlagen zu Glas

Das deutsche Wort „Glas“ stammt von dem germanischen Begriff „Glasa“, das Glänzende oder das Schimmernde, ab. Das am häufigsten in der Natur vorkommende Glas ist der Obsidian, eine Form von vulkanischem Gestein. Obsidiane sind bereits in der Steinzeit als Werkzeuge verwendet worden, wobei die Anfänge der künstlichen Glasherstellung bereits um die Zeit 5000 v.Chr. geschätzt werden. Diese Vermutungen werden aufgrund von Glasfunden in Form von Schmuckperlen in Grabstätten aus dieser Zeit getroffen. Mit der Ausdehnung des römischen Reiches verbreitete sich die Glasherstellung auch in die nördlichen Provinzen, wobei der Untergang des Imperiums dem Vormarsch des Glases Einhalt gebot und dessen Herstellung in das neu entstandene, byzantinische oströmische Reich verlagerte. Erst über die Handelsbeziehungen mit Byzanz kam diese vergessene Kunst wieder zurück nach Venedig, wo sich im 14. und 15. Jahrhundert der große Aufschwung ereignete. Den Venezianern gelang es als erste farbloses Kristallglas „Cristallo“ herzustellen. Dieses wurde für die Stadt zur Haupteinnahmequelle und ermöglichte einen wirtschaftlichen Aufschwung. Die Stadt hütete fortan das Geheimnis des farblosen Kristallglases, indem sie die Glasproduktion auf eine Nebeninsel, Murano, angeblich aus Brandschutzgründen, auslagerten.²¹⁸

Glas war, bis ins späte Mittelalter, aufgrund seiner äußerst aufwendigen Herstellung, nur den Wohlhabenden und Privilegierten vorbehalten. Erst als die Glasbläserei fortschrittlicher und effizienter wurde, wurden auch immer öfter Getränke in Glasbehältnisse abgefüllt. Im Zuge der Industrialisierung im 18. und 19. Jahrhundert war der Siegeszug der Glasbehälter endgültig und wird durch ständige Optimierungen auch heute noch fortgesetzt.²¹⁹

Thomas Alva Edison (1847-1931) bescherte dem Glas seinen ersten großen Siegeszug in der Massenherstellung, indem er 1880 die Glashütte von Corning in New York mit der Herstellung seiner Glaskolben beauftragte. Die Automatisierung und kostengünstige Herstellung wurde, nicht zuletzt, auch durch die Erfindung der künstlichen Soda im Jahr 1865 ermöglicht. Die Entwicklung des Wannnofens, der einen kontinuierlichen Schmelzprozess sicherstellte, ebnete diesen Weg weiter, bis hin zu der kostengünstigen Herstellung von Hohlglas, die im Jahre 1903 von Michael J. Owens (1859-1923) entwickelt wurde. Er ermöglichte die erste vollautomatische Flaschenglasmaschine, durch die später die „Individual Section“ (IS) Maschinen im Jahr 1925 entwickelt wurden, die heute noch in Verwendung sind und eine Stückzahl von bis zu 600 Flaschen pro Minute herstellen.²²⁰

Auf diese Flaschen, beziehungsweise Hohlkörperherstellung und die zugrunde liegenden Prozesse, sowie das Thema des Recyclings und die damit einhergehenden Thematiken, sollen im weiteren Verlauf dieses Kapitels eingegangen werden.

²¹⁸ Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.2 ff.

²¹⁹ Siegele, C. (2018), S.22

²²⁰ Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.12 f.

6.1 Glasstruktur

Glas bezeichnet, entgegen dem häufigen Irrglauben, streng genommen einen Zustand und kein Material. Der Glaszustand zeichnet sich dabei dadurch aus, dass während des Abkühlvorganges keine Kristallisation auftritt, wodurch der feste Zustand des Glases, dem einer eingefrorenen Flüssigkeit entspricht. Der feste kristalline Zustand ist sowohl der energetisch niedrigste als auch der stabilste. Wie in der Natur üblich strebt das Glas danach den energetisch niedrigsten Zustand einzunehmen, dieser ist jedoch nicht erreichbar, weil beim Abkühlen die Zähigkeit der Glasschmelze extrem zunimmt und damit die Bewegungsmöglichkeit der Moleküle stark einschränkt beziehungsweise unmöglich macht. Glas befindet sich somit im erstarrten nichtkristallinen Zustand nicht im thermodynamischen Gleichgewicht und kann daher als „eingefrorene“, unterkühlte Flüssigkeit angesehen werden. Abbildung 6-1 zeigt wie sich das Volumen der Glasschmelze beim Abkühlvorgang sprunghaft ändert, wenn es zur Ausbildung eines Kristalles bei der Schmelztemperatur T_S kommt. Bei einem Unterkühlen der Schmelze ohne Umwandlung in den kristallinen Zustand ist bei einer bestimmten Temperatur T_G eine Änderung der Steigung zu bemerken, die beinahe parallel zur Eigenschaftskurve des Kristalles verläuft. Diese Temperatur T_G wird als Glastemperatur oder auch Einfrier- oder Transformationstemperatur bezeichnet. Unterhalb dieser Temperatur gilt Glas als fest und die dazu gehörige Viskosität weist hohe Werte auf. Bei Temperaturen oberhalb von T_G weist Glas eine Zähigkeit ähnlich der von Honig auf, wobei sich die Viskosität stark temperaturabhängig ist. Darunter verhält sich Glas wie ein spröde-elastischer Festkörper, charakterisiert durch das Elastizitätsmodul. Abhängig von der Zusammensetzung des Gemenges, das in den Glaszustand übergeht, unterscheidet sich auch die Glastemperatur.²²¹

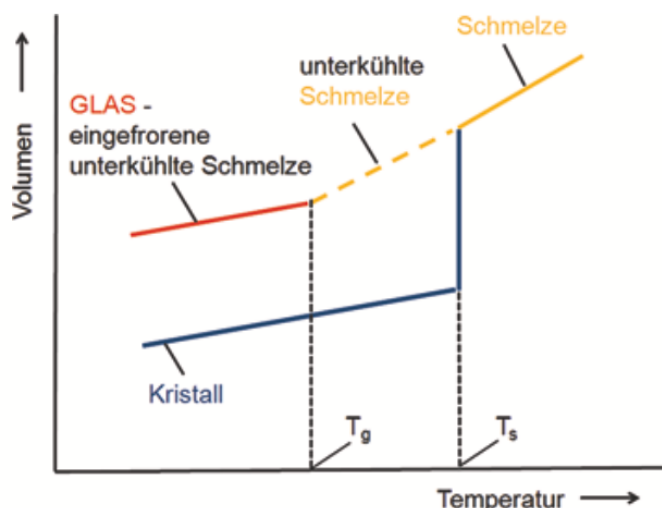


Abbildung 6-1 Glasvolumen als Funktion der Temperatur²²²

²²¹ Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020)

²²² Quelle: Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.19

Auch Metalle können durch entsprechend schnelle Abkühlgeschwindigkeiten in den Glaszustand überführt werden. Da schnelle Abkühlgeschwindigkeiten technisch oft schwer realisierbar sind, beziehungsweise in manchen Fällen auch Nachteile, wie etwa Spannung in den Bauteil, bewirken, sind Materialien, die auch bei langsameren Abkühlgeschwindigkeiten in den Glaszustand übergehen, besonders zur Glasherstellung geeignet. Dazu zählen beispielsweise die Oxide der Silikate, Borate und Phosphate. Interessant hierbei ist auch, dass bei Silikatgläsern, zum Beispiel, die Koordination um das Silikatatom dieselbe ist, wie bei einem kristallinen Silikat. Dieser Sachverhalt wird dadurch beschrieben, dass die Anordnung der Moleküle im Silikatglas dieselbe Nahordnung besitzt, wie das im Kristall der Fall wäre, die Fernordnung sich jedoch unterscheidet. Dies ist charakteristisch für oxidische Gläser, die dadurch nicht zu den amorphen Substanzen gehören. Amorphe Substanzen zeichnen sich durch eine vollkommene Unordnung der Molekülstrukturen aus. Dieser Sachverhalt ist anschaulich in Abbildung 6-2 dargestellt.²²³

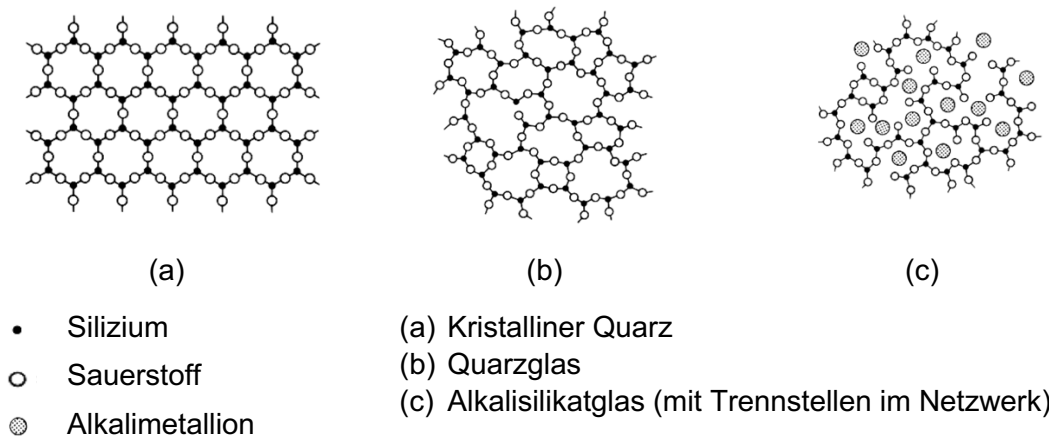


Abbildung 6-2 Zweidimensionale Strukturmodelle von kristallinem Quarz, Quarzglas und Silikatglas²²⁴

Dieses Kriterium der Differenzierung ist jedoch nur durch eine Röntgenstrukturanalyse nachweisbar und stellt bis heute eine Herausforderung für die Festkörperphysik dar. Abhängig von der Glaszusammensetzung, dem Gehalt an Verunreinigungen und der Abkühlgeschwindigkeit der Schmelze kann es zu einer spontanen Kristallisation des Glases, ausgehend von diesen „Keimstellen-Verunreinigungen“, kommen. Dieser Vorgang ist bei der Glasherstellung unerwünscht, weil die unterschiedlichen Eigenschaften des kristallinen Gefüges zu Spannungen und geminderter Festigkeit führen können.²²⁵

²²³ Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020)

²²⁴ Quelle: Holleman, A.F., Wiberg E. (2007) in Anlehnung an Andratschke, M. et al. (2011), S.1

²²⁵ Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.21 f.

6.2 Eigenschaften und Zusammensetzungen von Gläsern

Oxidische Gläser bestehen aus Netzwerkbildnern, den zentralen Bausteinen der Glasstruktur, den Netzwerkwandlern, Oxide, die das Netzwerk an bestimmten Stellen unterbrechen und Zwischenoxiden, welche eine Mittelstellung zwischen den Netzwerkbildnern und Wandlern einnehmen. Je nach verwendetem Verhältnis dieser Anteile entstehen Gläser mit unterschiedlichen Eigenschaften.

6.2.1 Netzwerkbildner

Netzwerkbildner sind die zentralen Bausteine der Glasstruktur. Einer der häufigsten Vertreter ist dabei das Siliziumdioxid. Glas, das nur aus Siliziumdioxid besteht, wird auch Quarzglas genannt und zeichnet sich durch einen hohen Schmelzpunkt von $>2000^{\circ}\text{C}$ aus. Silicatgläser bestehen zumeist aus etwa 55% bis 80% Siliziumdioxid, wobei sich durch die Zugabe anderer Oxide die physikalischen und chemischen Eigenschaften ändern. Dies wird sich in der Glasherstellung zu Nutze gemacht indem beispielsweise Netzwerkwandler verwendet werden, um den Schmelzpunkt zu verringern.²²⁶

Bei den gewöhnlichen Handelsgläsern handelt es sich meist um Natrium-Kalzium-Silikatgläser, die durch das Einschmelzen von Kieselsäure, gemeinsam mit Alkalien, meist Soda, Pottasche oder Glaubersalz, und Kalk, unter anderem in Form von Kreide, erzeugt werden.²²⁷

6.2.2 Netzwerkwandler

Um das Netzwerk der Bildner-Oxide unterbrechen zu können werden Alkalioxide, wie zum Beispiel Kaliumdioxid, Lithiumdioxid oder Natriumdioxid verwendet. Durch Zugabe dieser wird das Netzwerk instabiler und es verringert sich dementsprechend die Viskosität und die Schmelztemperatur. Durch den Einbau der Alkalioxide verringert sich jedoch auch, simultan, die chemische Beständigkeit, weswegen Erdalkalioxide, wie zum Beispiel Calciumoxid, Bariumoxid oder Magnesiumoxid, benötigt werden. Diese vergrößern ebenfalls den Viskositätsbereich der Verarbeitung, auch „Länge“ des Glases genannt.²²⁸

²²⁶ Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.33 f.

²²⁷ Ritter, F. (1950), S.208 f.

²²⁸ Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.34

Tabelle 6-1 Gläser und ihre typische chemische Zusammensetzung²²⁹

Glasart	SiO_2	B_2O_3	Al_2O_3	PbO	CaO	MgO	BaO	Na_2O	K_2O
Behälterglas	73	-	1,5	-	10	0,6	-	14	0,9
Flachglas	72	-	1	-	9	4	-	15	-
Quarzglas	100	-	-	-	-	-	-	-	-
Bleikristallglas	60	1	-	24	-	-	1	1	13

Tabelle 6-1 stellt auszugsweise einige Gläser und ihre typischen chemischen Zusammensetzungen dar.

6.2.3 Glasfärbung²³⁰

Die Wirkung von Farboxiden, bei denen die Ionen bestimmter Metalle Färbungen im Glas verursachen, findet bei der Glasfärbung Anwendung. Hierbei handelt es sich, im Wesentlichen, um die Kationen der Nebengruppenelemente der 4. Periode sowie einige Kationen der 6. Periode. Die Farbkationen weisen unterschiedliche spektrale Absorptionen auf und beeinflussen so, schon in kleinsten Mengen, die Glasfarbe. Einige dieser Verunreinigungen sind unvermeidlich, weil sie über die Rohstoffe in die Schmelze eingebracht werden, wie zum Beispiel Eisen. Je nach Art der Verbrennung, unter Luftüberschuss oder Luftmangel, entstehen unterschiedliche Wertigkeiten des Eisenoxids. Eisen verursacht dabei die Grünfärbung der sogenannten „Waldgläser“.

Tabelle 6-2 Farbkationen in Gläsern²³¹

Element	Wertigkeitsstufe	Koordination	Farbe
Titan	Ti^{3+}	$Ti^{3+}O_6$	Violett
Chrom	Cr^{3+}	$Cr^{3+}O_6$	Grün
Mangan	Mn^{3+}	$Mn^{3+}O_6$	Violette
Eisen	Fe^{2+}	$Fe^{2+}O_6$	Blau
	Fe^{3+}	$Fe^{3+}O_4$	Gelb
Nickel	Ni^{2+}	$Ni^{2+}O_4$	Blau
		$Ni^{2+}O_6$	Gelb

²²⁹ Quelle: in Anlehnung an Feßmann, J.; Orth, H. (2002), S.53

²³⁰ Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.40 ff.

²³¹ Quelle: in Anlehnung an Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.41

In Tabelle 6-2 sind ausschnittsweise einige Kationen und die durch sie entstehenden Färbungen gegeben. Da Gläser oft weder unter besonderem Luftüberschuss, noch besonderem Mangel geschmolzen werden, entsteht eine Mischung aus Gelb und Blau, das typische Grünglas. Die venezianischen Glashersteller erzielten die Entfärbung auf die gleiche Weise, wie das auch heute noch gemacht wird, indem sie Mangan hinzufügten, welches einen violetten Farbton verursacht und dadurch als komplementär Farbe zu Grün einen Grauton erzeugt, der für das menschliche Auge nicht sichtbar ist. Eine andere weitverbreitete Färbung stellt die „Kohle-Gelb-Färbung“ dar, die den Bierflaschen ihre klassische braune Farbe verleiht und verwendet wird, um die Haltbarkeit des Inhaltes zu verbessern.²³²

6.3 Glasherstellung²³³

Glas ist zumeist das Produkt eines Schmelzprozesses, bei dem die Rohstoffe auf Temperaturen über 1000°C, abhängig von der Glaszusammensetzung, erhitzt werden. Es wird in einem kontinuierlichen Schmelzprozess aufgeschmolzen und in einem anschließenden Formgebungsprozess weiterverarbeitet. Dabei kann Glas, wie kaum ein anderer Werkstoff, durch verschiedene Arten der Formgebung, geblasen, gegossen, geschleudert, gepresst, gewalzt oder gezogen werden. Bei der Herstellung von Massengläsern, wie Kalknatronsilikatgläsern für Hohlglasanwendungen, ist die einfache und ortsnahe Verfügbarkeit von Rohstoffen ein wichtiger Aspekt, weswegen Glashersteller oft in Gebieten mit Lagerstätten angesiedelt sind. Darüber hinaus spielt die Altglasaufbereitung als sekundär Rohstoff in der heutigen Zeit eine entscheidende Rolle.

Die eingesetzten Schmelzöfen bestehen zumeist aus eckigen Wannen, welche mit Feuerfestmaterial ausgekleidet werden und mit einem Gewölbe abgedeckt sind. Sie werden im Wesentlichen nur durch die Art der Energiezufuhr, Gas, elektrisch oder Öl, zur Beheizung, der Flammenrichtung und der Art der Abgaswärmerückgewinnung unterschieden. Für die Herstellung von Hohlglas werden oft stirnbeheizte Regenerativwannen mit einer durchschnittlichen Tagesproduktion von 400 Tonnen pro Tag eingesetzt.²³⁴

Abbildung 6-3 stellt die Funktionsweise des im Anschluss beschriebenen Tropfenscheiders dar, während Abbildung 6-4 die Formgebung mittels Press-Blas-Verfahren eines Flaschenglases wiedergibt, worauf ebenfalls in aller Kürze eingegangen werden soll.

²³² Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.40 ff.

²³³ Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.151 f.

²³⁴ Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.151 f.

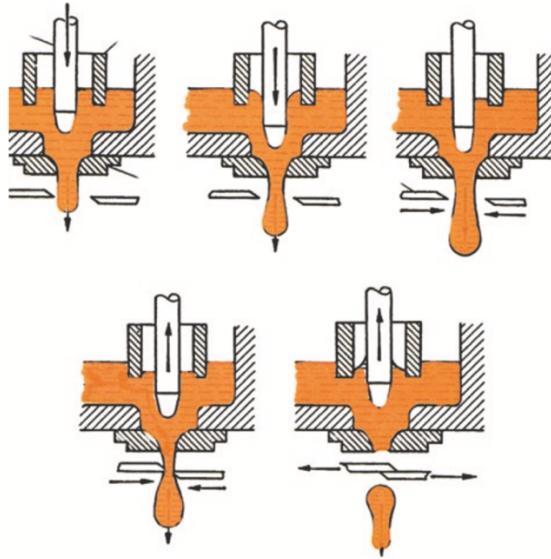


Abbildung 6-3 Funktionsweise Tropfenspeise²³⁵

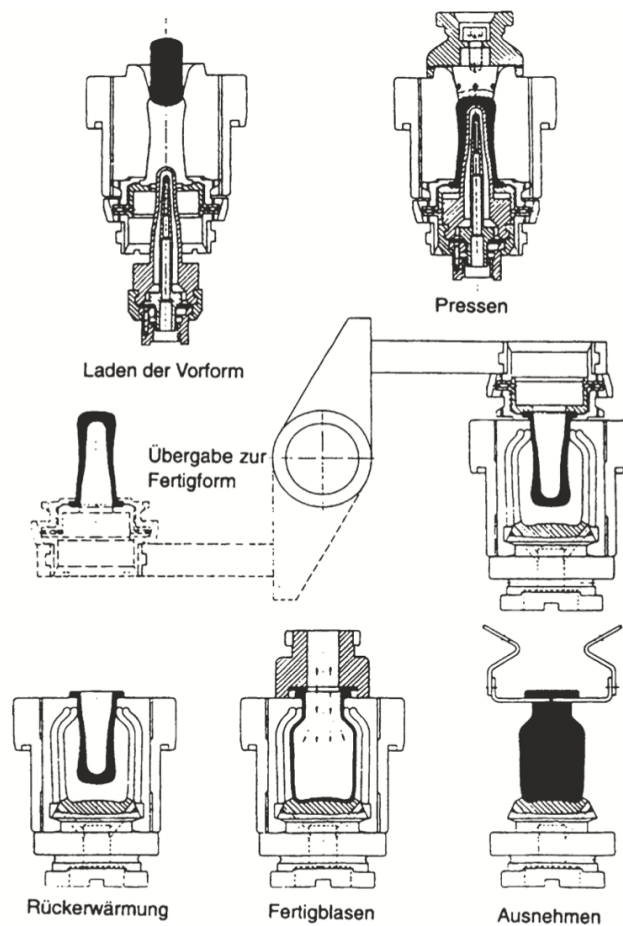


Abbildung 6-4 Prinzip Press-Blas-Verfahren²³⁶

²³⁵ Quelle: Albrecht, H. et al. (1964) entnommen aus Schaeffer, H.A.; Langfeld, R. (2020), S.175

²³⁶ Quelle: Albrecht, H. et al. (1964) entnommen aus Schaeffer, H.A.; Langfeld, R. (2020), S.178

Die Formgebung der Glasflaschen hängt in großem Ausmaß von der Viskosität ab, so wird für eine schnell laufende Formgebungsmaschine ein „kurzes“ Glas benötigt, weil das Glasteil beim Verlassen der Fertigform möglichst schnell Aushärten muss, um sich nicht weiter zu verformen, während „lange“ Gläser für komplexe, zeitaufwendige Formgebungsprozesse geeignet sind. Zur Herstellung von Behälterglas wird heutzutage ein Tropfenspeiser eingesetzt. Dabei fließt das Glas aus der Schmelzwanne in einen Kanal, auch Speiserinne genannt, an dessen Ende sich Bodenöffnungen befinden, welche im Rhythmus der Formgebung das Glas in Tropfen schneiden. Die Schnittfrequenz kann hierbei, bei großen Anlagen, die mehrere Tropfen auf einmal erzeugen, bis zu 200 Tropfen pro Minute betragen. Es kann entweder mittels Press-Blas-Verfahren oder Blas-Blas-Verfahren gearbeitet werden, wobei ersteres vorzuziehen ist, weil es gleichmäßigere Wanddicken liefert, was wiederum für eine Herstellung von Leichtgewichtflaschen unerlässlich ist. Bei diesem Verfahren fällt der Glastropfen in die Vorform hinein und wird mittels Pressstempel in die Kontur eingeblasen. Nach dem Schwenken um 180 Grad wird es das Glasteil von der Vorform in die Fertigform gebracht und dort auf die endgültige Kontur ausgeblasen.²³⁷

6.4 Verpackungsglas

Glas ist durch seine inerte Eigenschaft ideal geeignet, um Lebensmittel und Getränke zu verpacken, da es einerseits die Frische und den Geschmack erhält und andererseits keinerlei Geschmacks- oder Inhaltstoffe an die Lebensmittel abgibt.²³⁸

Als sogenanntes Behälterglas weist es eine hohle Form auf und wird deswegen auch als Hohlglas bezeichnet, zu dem auch Flaschen und Konservengläser zählen. Sie bestehen aus Kalknatron-Silikatglas und werden oftmals zur besseren Haltbarkeit der enthaltenen Produkte eingefärbt. Im Jahr 2018 stellte Deutschland 4,1 Millionen Tonnen Hohlglas her, wodurch ein monetärer Wert von 2,44 Milliarden Euro erwirtschaftet wurde. Ein wesentlicher Beitrag zur weiten Verbreitung dieser Aufbewahrungslösung leistete dabei die Wiederverwertbarkeit durch das Pfandflaschen- und Recyclingsystem. Die Formgebung dieser Gläser kann dabei Sinnbild einer Marke werden, wie etwa bei Coca-Cola²³⁹ oder den deutschen Konservengläsern des Unternehmers Johann Weck²⁴⁰, aber auch praktische Gründe erfüllen, wie beispielsweise bei Sektflaschen, welche aufgrund der hohen Innendruckes mit dem typischen Hohlboden gefertigt werden.²⁴¹

²³⁷ Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020)

²³⁸ Siegele, C. (2018), S.22

²³⁹ Coca-Cola, <https://www.coca-cola-oesterreich.at/marken/coca-cola> (Zugriff: 31.03.2021)

²⁴⁰ Weckgläser, https://www.weckgläser.com/shop/?gclid=EAlaIqobChMIzP-A8vba7wIVpWLMCh283QKgEAAAYASAAEglj1vD_BwE (Zugriff: 31.03.2021)

²⁴¹ Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.54 ff.

6.5 Glasaufbereitung und Recycling

Bereits die Einwohner des römischen Imperiums gingen sparsam mit ihren Ressourcen um und sammelten Scherben von Glas, um sie wieder einzuschmelzen. Ein besonderer Aufschwung, so wird vermutet, kam auch durch den Zerfall des römischen Reiches dem Glasrecycling zugute, da eine Rohstoffknappheit die Glasmacher zu einer Wiederverwertung zwang. Dieser Trend hielt an, bis in die sechziger Jahre des 20. Jahrhunderts, wo mit dem Beginn der Industrialisierung der Umgang mit natürlichen Ressourcen durch die Wegwerf-Gesellschaft verschlechtert wurde. Mit einem Anstieg der Energiekosten und dem Aufkommen der ökologischen Gedankenhaltung wurde das Glasrecycling in den 70-iger Jahren des 20. Jahrhunderts bereits wieder aufgegriffen. Ein Vorreiter zu dieser Zeit war das SERO-System der DDR, wo aufgrund der andauernden Rohstoffknappheit, neben vielen anderen Fraktionen, auch Altglas gesammelt wurde.²⁴²

Glas lässt sich zu 100% recyceln und beliebig oft einschmelzen, um zu neuen Verpackungen verarbeitet zu werden. Die Wiederverwendung von Glas stellt, wie in Abbildung 3-7 im Abschnitt 3.4 bereits dargestellt, heutzutage einen der wichtigsten Rohstoffe zur Glasherstellung dar. Hohlgläser bestehen heute, im Durchschnitt, zu 60% aus Recyclinganteilen. Diese Kreislaufführung ermöglicht eine Schonung der natürlichen Ressourcen, da es zu einer Einsparung an primär Rohstoffen kommt, wobei das Soda, welches für die Glasherstellung benötigt wird, mit Kosten, die in etwa 7-Mal so hoch sind wie für die anderen Rohstoffe, den teuersten Rohstoff darstellt. Den größten Vorteil aus ökonomischer Sicht liefert jedoch die Energieeinsparung durch die Wiederverwendung von Altglas zur Glasherstellung. Je 10% Einsatz von Recyclingglas reduziert sich der Energieverbrauch um etwa 3%. Dies resultiert zu einem Großteil daraus, dass die benötigte Schmelzenergie beim Einsatz von Scherben deutlich abnimmt. Dadurch ist gleichzeitig eine Steigerung der Durchsatzmenge möglich. Die Reduktion am Verbrauch fossiler Energieträger geht auch mit einer Reduktion des CO_2 - und NO_x -Ausstoßes einher, was jedoch momentan noch keine monetären Auswirkungen zeigt, weil die Zuteilung der freien CO_2 -Zertifikate für Glashersteller noch aufrecht ist.²⁴³

Emissionen organischer Verbindungen spielen in Deutschland eine geringe Rolle, da die Staubabscheidung mittels Elektro- oder Gewebefiltern mit vorgeschalteten Sorptionsstufen zur Abscheidung saurer Abgase, wie Schwefel, Chlor oder Fluor, gelöst wird. Die Entstickung kann mittels Primärmaßnahmen, wie etwa neuer Brennertechnologien oder mittels SCR (Selective Catalytic Reaction)- beziehungsweise SNCR (Selective Non-Catalytic Reaction)- Verfahren erfolgen.²⁴⁴

²⁴² Kurth, P. et al. (2018), S.300 ff.

²⁴³ Kurth, P. et al. (2018), S.299 f.

²⁴⁴ Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020), S.163

6.5.1 Wichtigkeit der Glasaufbereitung²⁴⁵

Wie bereits eingangs in Abschnitt 3.2 erwähnt ist ein entscheidendes Kriterium für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft für Glas die qualifizierte Glaserfassung.

Aus Sicht der Aufbereitung wäre eine getrennte Erfassung von Weiß-, Braun- und Grünglas die ideale Ausgangssituation, für eine drauffolgende Wiederverwertung. Doch auch mit diesem vorhergehenden Trennschritt kommt es zu Verunreinigungen des Produktes durch Fehlwürfe, Etiketten, Metallverschlüsse und ähnliches. Diese Verunreinigungen können zu Problemen beim Schmelzvorgang und zu Einschlüssen im Glas führen. Aufgrund der weiter steigenden Ansprüche, im Sinne der immer schnelleren Fertigung und dem Trend hingehend zu dünneren und leichteren Verpackungen, gehen die Forderungen an die Reinheit zu beinahe 100%. Dadurch ist eine eingehende Aufbereitung nötig, um ein möglichst reines Ausgangsmaterial für die Wiederverwertung zu schaffen.

Zum Zweck der Vorsortierung wird das aufgegebene Rohglas mittels Stangensieb in eine Grob und eine Fein- beziehungsweise Mittelfraktion klassiert, wobei entweder davor oder danach eine Abtrennung der Eisenmetalle mittels Magnetscheider stattfindet. Die entstandene Grobfraktion geht in eine manuelle Vorsortierung, um große Fehlwürfe zu entfernen. Mittels eines Walzenbrechers wird die Körnung verkleinert, wodurch sich auch Störmaterialien wie Verschlüsse und ähnliches von dem Glaskörper trennen. Zur Abtrennung dieser Störfractionen wird der gesamte Strom über Siebe geführt und anschließend durch Magnet- und Wirbelstromscheider um von verbliebenen Eisen- und Nichteisenmetallen befreit zu werden. Als letzter Schritt folgt zumeist eine optische Aufbereitung, wobei diese in Form von UV- und Röntgenfluoreszenztechnik seit 2011 in Deutschland Stand der Technik ist. In diesem Schritt sollen verbliebene Verunreinigungen wie Porzellan, Fehlfarben und Gläser, die nicht zu den Verpackungsgläsern gehören, aussortiert werden. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf den hitzebeständigen und bleihaltigen Gläsern, die große Schäden in der Glasproduktion mit Rezyklateinsatz verursachen können.

²⁴⁵ Kurth, P. et al. (2018), S.306 ff.

7 Praktische Fallstudie

Um den Beitrag der beiden, in dieser Studie untersuchten, Verpackungsmaterialien zum Klimawandel und die Umwelt im Allgemeinen darzustellen wurde eine Ökobilanzstudie durchgeführt. Zur Erstellung der LCA wurde die Software UMBERTO vom Institut für Umweltinformatik Hamburg (IFU)²⁴⁶ verwendet. Durch die Implementierung der Datenbank Ecoinvent3²⁴⁷ konnte direkt im Programm auf die vorhandenen Datensätze zugegriffen werden, um so das Modell und die dazugehörigen Stoff- und Energieflüsse abzubilden. Trotz des Vorhandenseins anderer Datenbanken wurde für diese hier vorliegende Modellierung ausschließlich die Ecoinvent3 Datenbank verwendet. Aus Gründen der Leserlichkeit wurde darauf verzichtet alle Prozessdaten direkt in die Arbeit zu inkludieren. Diese liegen am Institut für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften der Montan Universität Leoben auf und können dort auf Anfrage und nach Bedarf eingesehen werden.

7.1 Vorgehensweise

Wie bereits in Abschnitt 2.4 erwähnt, ist es für die Durchführung einer LCA und die Interpretation der Ergebnisse wichtig, Systemgrenzen festzulegen. In der Arbeit wurde eine „Cradle-to-Grave“ Analyse durchgeführt, bei der die Systemgrenzen sowohl die Materialgewinnung aus dem Rohstoff umfassen, als auch die „End-of-Life“, beziehungsweise Entsorgungs- und Verwertungsphase, miteinzubeziehen. Um eine möglichst korrekte Abbildung des Lebensweges darzustellen, war es einerseits nötig eine umfassende Literaturstudie zur Herstellung, Verarbeitung und Entsorgung von den untersuchten Verpackungsmaterialien vorzunehmen. Andererseits wurde auch der Bedeutung der Logistik des Transportes, sowie privatem Konsum und Entsorgungsverhalten Aufmerksamkeit geschenkt. Neben der Festlegung der Grenzen und der Definition des Prozessablaufes muss Rücksicht darauf genommen werden, welche Prozesse beziehungsweise Daten in der verwendeten Datenbank vorhanden sind und welches Ausmaß diese umfassen. So berücksichtigt beispielsweise der Prozess „Injection Moulding“ bereits alle dazugehörigen Input- und Outputströme inklusive des Energieverbrauches, weswegen dieser nicht separat hinzugerechnet werden darf. Das Kunststoffgranulat für diesen Prozess muss jedoch aus einem weiteren Prozess zugeführt werden, um eine korrekte Abbildung zu ermöglichen.

Zu Beginn wurde der Vordergrundprozess mit der funktionellen Einheit modelliert. Dieser umfasst bei der PET-Flasche die Rohling Herstellung, das Streckblasverfahren, das „Assembly“, also die Fertigstellung der Flasche, bestehend aus Etikettieren und

²⁴⁶ Institut für Umweltinformatik, <https://www.ifu.com/umberto/oekobilanz-software/> (Zugriff: 01.04.2021)

²⁴⁷ Ecoinvent, <https://www.ecoinvent.org/database/database.html> (Zugriff: 28.03.2021)

Verschlussanbringung, sowie der Befüllung. Hier kann bereits die funktionelle Einheit festgesetzt werden, welche für beide hier angeführten Modelle eine Flasche des jeweiligen Materials ist. Danach wurden die „Upstream“-Prozesse, jene die im Vorfeld des Hauptprozesses liegen, modelliert. Diese gehen bis zur Systemgrenze, zur Herstellung der Ausgangsmaterialien aus den Rohstoffen, wie beispielsweise Erdöl bei Kunststoffen. In einem weiteren Schritt wurden dann die „Down-Stream“-Prozesse, jene Hintergrundprozesse, die nach der Herstellung der Flasche liegen, modelliert. Diese umfassen, unter anderem, den Transport zum Regionallager und Supermarkt, die Kühlung im Supermarkt, den privaten Transport zum Endverbraucher, die Gebrauchsphase, sowie die Entsorgung nach der Verwendungsphase.

Hier ist besonderes Augenmerk auf die Gebrauchsphase zu legen, da durch die Ausdehnung des Modells, auf die vor- und nachgelagerten Prozesse, kein Output-Platz für die funktionelle Einheit als Produkt entsteht. Das Programm kann die Berechnungen nur dann auf einen bestimmten Stoffstrom beziehen, wenn dieser in einen Output-Punkt kommt und gleichzeitig die Eigenschaft „Good“, im Modell in Grün dargestellt, hat. Diese Eigenschaft markiert ein Produkt eines Unternehmens und somit den generierten Umsatz durch dieses Produkt. Wechselt jedoch die Eigenschaft „Good“ zu „Bad“, weil das Produkt das Ende der Gebrauchsphase erreicht hat und in die Entsorgung übergeht, so erzeugt es tendenziell Kosten und kann nicht mehr als Bezugspunkt für die Berechnungen verwendet werden. Es ist daher wichtig, bei der Gebrauchsphase einen sogenannten virtuellen Referenzfluss zu setzen. Dieser legt einen Produktstrom fest, der zu einem virtuellen Output führt. In diesen kann die Flasche geführt werden und gleichzeitig die Eigenschaft „Good“ behalten, ohne die Berechnung zu stören. Dies ist auch deswegen von besonderer Bedeutung, weil auch die gesamten Emissionen der End-of-Life-Phase auf diesen virtuellen Referenzfluss bezogen werden. Dadurch ist es möglich die Gesamtheit der Emissionen des Lebenszyklus für ein Produkt zu erfassen und diese auf eine zuvor gewählte Einheit dieses Produktes zu beziehen. Die Bedeutung des virtuellen Referenzflusses wird klar, sobald man nach der Berechnung des Modells die Darstellung im Sankey Diagramm auswählt, hier ist ersichtlich, dass trotz Stofffluss nach rechts, Downstream, die Emissionen nach links laufend dargestellt werden und somit den gewünschten Aspekt liefert. Nämlich den Bezug sämtlicher Emissionen und Umweltauswirkungen entlang des Lebensweges auf die funktionelle Einheit, sprich eine Flasche des jeweiligen Materials. Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2 stellen einen Ausschnitt des PET-Flaschenmodells dar und verdeutlichen den zuvor beschriebenen Sachverhalt.

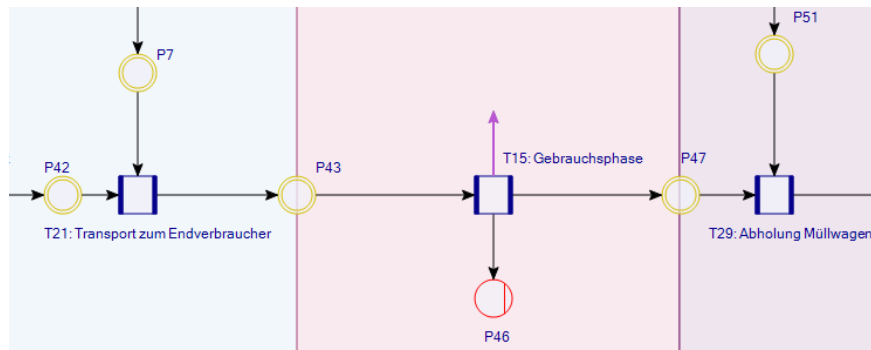


Abbildung 7-1 Ausschnitt des PET-Flaschen Standardmodells

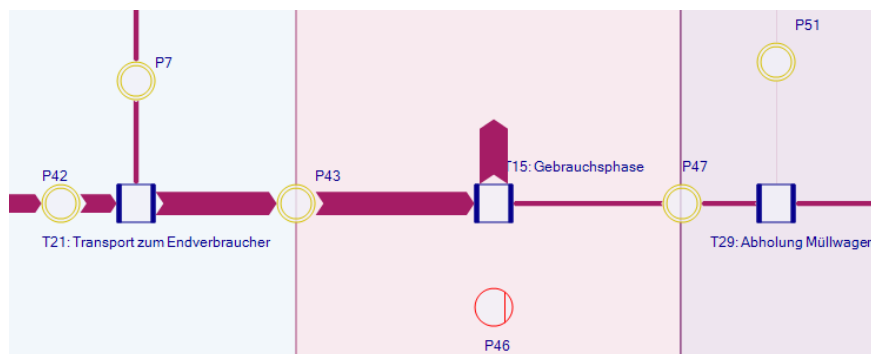


Abbildung 7-2 Ausschnitt des PET-Flaschen Standardmodells in Sankey-Format

Ein weiterer Aspekt, der kurzer Erläuterung bedarf, ist die hier verwendete Allokationsmethode. Bei Ressourcenallokation oder Faktorallokation geht es darum, knappe Ressourcen wie Boden, Rohstoffe, Emissionen, Kapital oder Arbeit der Produktion von Gütern zuzuordnen oder zu verteilen. Für die hier erstellten Modelle wurde die „Allocation at the point of Substitution“ (APOS) Methode, als Allokationsansatz gewählt. Diese Vorgehensweise verwendet die Ausweitung von Produkt Systemen, um die Zuordnung innerhalb von einzelnen Behandlungsprozessen zu vermeiden. Manche Aktivitäten, wie beispielsweise die Sammlung und der Transport von Siedlungsabfällen, finden innerhalb von Behandlungssystemen statt. Hier die richtigen Allokationsfaktoren, wie beispielsweise generierte Gewinne, für diese Schritte zu finden kann, unter Umständen, schwierig sein. APOS wurde dafür entwickelt, um solche Allokationen zu vermeiden und stattdessen die wertvollen Nebenprodukte, von Behandlungssystemen, direkt den Aktivitäten der Herstellung dieser Materialien, die diese Behandlungen benötigen, zuzuteilen.²⁴⁸

Die Variationen, die an dem Modell vorgenommen wurden, um verschiedene Situationen des Lebenszyklus abzubilden werden im Weiteren genauer beschrieben. Darüber hinaus wird genauer auf die getroffenen Annahmen, sowie die Quellen der verwendeten Informationen, die nicht aus der bereits erwähnten Ecoinvent3-Datenbank kommen, eingegangen, bevor die Ergebnisse der Modelle diskutiert und gegenübergestellt

²⁴⁸ Ecoinvent, <https://www.ecoinvent.org/database/database.html> (Zugriff: 28.03.2021)

werden. Die zugrunde liegenden Modelle für die Bewertung befinden sich, angepasst auf die Seitengröße, im Anhang dieser Arbeit.

7.2 PET-Flasche

Das erste Modell untersucht die Herstellung, den Gebrauch und die Entsorgung einer PET-Flasche. Wie bereits eingangs erwähnt leisten Verpackungskunststoffe einen nicht unwesentlichen Beitrag zum anthropogenen Kohlendioxidausstoß und damit zum Klimawandel. Einige Studien erfassten zuvor bereits den CO_2 -Fußabdruck von PET-Flaschen, die hier vorliegende Studie soll jedoch den ganzen Lebenszyklus betrachten, um eine realistische Einschätzung zu bieten, wie viel Emissionen eine Flasche im Laufe ihres Lebens tatsächlich verursacht und wie viel Einfluss letztendlich selbst der Konsument auf ebendiese hat.

7.2.1 Annahmen

Um den gesamten Lebenszyklus abbilden zu können, kann auf einige Annahmen nicht verzichtet werden. Wie bereits im Kapitel 2 angesprochen, wächst mit der Erweiterung der Systemgrenzen und der damit einhergehenden Annahmen die Ungenauigkeit des Modells. Um diese so gering wie möglich zu halten und dadurch eine realistische Einschätzung der Ergebnisse zu ermöglichen, wurde, wenn möglich, immer auf Daten aus der Wirtschaft und auf veröffentlichte Statistiken zurückgegriffen. Modellierungsschritte, welche Annahmen oder Zugriff auf externe Daten bedurften, sind im Folgenden aufgelistet und danach genauer beschrieben:

- Gewicht und Material der Verschlusskappe
- Gewicht der Flasche
- Gewicht des Etikettes
- Energiebedarf zur Etikettierung
- Energiebedarf der Befüllung
- Transport Logistik: Strecken und Transportmittel
- Aufbewahrung im Supermarkt, Kühlung
- Transport zum Endverbraucher (Einkaufsgewohnheiten und Distanzen zum Einkauf des täglichen Bedarfs)
- Abfallabholung
- Abfallentsorgung

Darüber hinaus wurde für die Modellierung der PET-Flasche angenommen, dass diese in einer Prozesskette aus Spritzgieß- und Streckblasverfahren an einem Standort hergestellt wurde. Anlagen dieser Form existieren bereits, wenn auch die separate Herstellung der Pre-Formen weiterverbreitet ist.

Das Gewicht der Schlusskappe variiert teilweise stark, so sind Unterschiede von bis zu 290% möglich. Bereits an dieser Stelle wäre ein Einsparungspotenzial, bezogen auf das Gewicht, möglich. Tabelle 7-1 gibt eine Übersicht über das Gewicht verschiedener PET-

Flaschen, die momentan von namenhaften Produzenten in Verkehr gebracht werden und einen Großteil des Marktes beherrschen.

Tabelle 7-1 Gewicht verschiedener Verschlusskappen und PET-Flaschen²⁴⁹

Inverkehrbringer	Gesamtgewicht [g]	Verschlussgewicht PE [g]
Fanta	24,07	1,73
Coca-Cola	24,28	1,83
Emsland	28,34	2,34
Pepsi	29,52	2,01
Nestea	28,65	3,16
Lipton	26,56	2,51
Trinkwasser USA	9,77	0,74
Nestlé USA	11,38	0,84

Aus den in Tabelle 7-1 gegebenen Werten wurde ein Mittelwert für das Flaschengewicht, als auch für das Verschlusskappengewicht ermittelt und als Massenstrom für die Modellierung genutzt.

Das Gewicht der Etiketten wurde als Mittelwert der Masse für Etiketten aus der Dissertation von DI Georg Wenk berechnet.²⁵⁰ Als Material wurde bei der PET-Flasche von PE-LD ausgegangen.

Der Energiebedarf für den Etikettierungsvorgang und für die Befüllung wurde aus der Einführung in die Lebenszyklusanalyse von Henkel entnommen.²⁵¹ Hier müssen bestimmte Abstriche, bezogen auf Akkuratess, gemacht werden, da es sich bei diesem Bericht um die Abfüllung von Reinigungsmitteln handelt, die jedoch nicht die komplett identen Eigenschaften gegenüber anti-alkoholische Getränke aufweisen. Diese marginale Ungenauigkeit wird in dieser Arbeit jedoch in Kauf genommen, sei jedoch an dieser Stelle vermerkt. Alle drei zuvor beschriebenen Ergebnisse werden in Tabelle 7-2 gegeben.

²⁴⁹ Neue Verpackung, <https://www.neue-verpackung.de/66036/muessen-gewichtsunterschiede-von-290-prozent-sein/> (Zugriff: 07.03.2021)

²⁵⁰ Wenk, G. (2009), Anhang S.207

²⁵¹ Henkel (o.D.), S.18

Tabelle 7-2 errechnetes Etiketten Gewicht und die benötigte Energie zur Etikettierung und Befüllung

Etiketten Gewicht [g]	Benötigte Energie zur Etikettierung [kWh/3.333 Flaschen]	Benötigte Energie zur Befüllung [kWh/3.333 Flaschen]
0,73	18	4

Die Transportstrecken für Konsumgüter in der EU wurden aus unterschiedlichen Quellen entnommen und aufgrund der teilweise vorhandenen Abweichungen angeglichen. Die Quellen und die darin genannten Distanzen werden in Tabelle 7-3 gegeben. In selbiger Tabelle wird auch die durchschnittliche Distanz zum Supermarkt für Einkäufe des täglichen Bedarfs angegeben. In dieser Umfrage wurde von 41% der Befragten angegeben, dass sie 1-5km fahren, um die Einkäufe des täglichen Bedarfs zu erledigen, ferner gaben 47% der Befragten an, dass sie mindestens 7 Einkäufe pro Woche unternehmen.^{252, 253}

Tabelle 7-3 Distanzen des Gütertransportes

Quelle	Strecke / Distanz
Henkel ²⁵⁴	Regionallager 378km Einzelhandel 80km
Umberto ²⁵⁵	550km ²⁵⁶
Statista ²⁵⁷	Entfernung Supermarkt 1-5km
Annahme der Autorin	Abfalltransportstrecke 30km
In dieser Studie verwendete Werte	
Distanz Regionallager	433,6km
Distanz Einzelhandel	116,4km
Distanz zum Einkauf des täglichen Bedarfs	3km
Abfalltransportstrecke	30km

²⁵² Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/214885/umfrage/entfernung-der-einkaufsstaeette-fuer-den-lebensmitteleinkauf/> (Zugriff: 06.03.2021)

²⁵³ Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/283574/umfrage/durchschnittliche-anzahl-der-einkaeufe-von-fmcg-in-oesterreich/> (Zugriff: 06.03.2021)

²⁵⁴ Henkel (o.D.), S.18

²⁵⁵ ifu Hamburg GmbH (2018), S.26

²⁵⁶ Anmerkung: Bezogen auf den durchschnittlichen Konsumgüter in Deutschland

²⁵⁷ Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/214885/umfrage/entfernung-der-einkaufsstaeette-fuer-den-lebensmitteleinkauf/> (Zugriff: 06.03.2021)

Da eine Strecke von 550km für den Gütertransport in Deutschland als Durchschnitt angegeben wurde, wurde dieser Wert als Ausgangspunkt herangezogen. Die Aufteilung zwischen Regionallager und Einzelhandel wurde anteilmäßig, nach den gegebenen Daten, ausgerechnet. Für den Straßentransport zum Regionallager wurde ein LKW >32t mit EURO5 verwendet, während für den Transport zum Einzelhandel entsprechend ein LKW mit 16-32t und der EURO5 gewählt wurde.

Die Aufteilung des Gütertransportes auf die unterschiedlichen, innerhalb von Europa gängigen Transportwege, wurde von Eurostat übernommen und ist in Tabelle 7-4 dargestellt.

Tabelle 7-4 Prozentualer Anteil der Transportwege am Güterverkehrsaufkommen²⁵⁸

Transportweg	Prozentualer Anteil am Güterverkehr
Straßenverkehr	74,9%
Schiene	18,4%
Binnenwasserstraßen	6,7%

Der Transportweg der Abfallentsorgung wurde bereits in Tabelle 7-4 angeführt. Darüber hinaus muss jedoch auch die Art der Abfallentsorgung antizipiert werden. Das Verhalten der Menschen vorherzusagen ist immer ein großer Faktor der Unsicherheit. Denn je nach Entsorgung ist eine andere Aufbereitung und eine andere Verwertung möglich, beziehungsweise nötig. Darüber hinaus stellt die unterschiedliche Art der Sammelsysteme, bereits innerhalb von Österreich, unterschiedliche Weiterbehandlungen in Aussicht. Um diesen Unsicherheiten zu begegnen, wurden im Zuge dieser Arbeit verschiedene Modellvariationen vorgenommen. Darüber hinaus ist anzumerken, dass bei PET, dem Flaschenkörper, von einer Recycling-Route abgesehen wurde, da hierfür keine geeigneten Daten und Prozesse im Programm beziehungsweise der Datenbank implementiert sind und eine Antizipation aller damit einhergehenden Emissionen und Verbräuche nicht auf wissenschaftlicher Basis im Rahmen dieser Arbeit durchführbar wäre. Das Standardmodell geht von einer Recyclingquote für PE von 40% aus.

Die Aufbewahrung im Supermarkt wurde ebenfalls durch Modell-Veränderungen untersucht, wobei die benötigte Leistung, für die Kühlung der Flasche in einem offenen Kühlregal, folgendermaßen, mittels der Verbrauchsangaben von der Website „Gastroheld“, für Kühlvitrinen für gewerbliche Nutzung, berechnet wurde:²⁵⁹

²⁵⁸ Quelle: Daten entnommen von Eurostat, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Freight_transport_statistics/de&oldid=354266 (Zugriff: 27.02.2021)

²⁵⁹ Gastro-Held, https://www.gastroheld.at/K%C3%BChltechnik/Wandk%C3%BChlregale?gclid=EAlaIqobChMIuc38hNnf7wIVFs93Ch34KAAPEAAAYASAAEgIZ8vD_BwE&gclid=aw.ds (Zugriff: 02.04.2021)

Tabelle 7-5 Leistungen verschiedener Kühlregale

Leistung Kühlregal 1	0,0033267 [$kW/Flasche$]
Leistung Kühlregal 2	0,002967 [$kW/Flasche$]
Leistung Kühlregal 3	0,0035972 [$kW/Flasche$]
Angenommener Leistungszeitraum	48h

Obwohl die Aufbewahrung im Kühlregal bei antialkoholischen Getränken in den meisten Fällen nicht zwingend nötig ist, so wurde sie dennoch in dieser Studie mitberücksichtigt, um Auswirkungen der Konsumentenentscheidung weiter zu verdeutlichen.

7.2.2 Alternierende Modelle

Um den Beitrag verschiedener Prozessführungen und Möglichkeiten darzustellen wurden bei dem zugrundeliegenden Modell, hier auch als Standardmodell bezeichnet, verschiedene Veränderungen vorgenommen und diese Alternativen darzustellen. Die veränderten Parameter sind:

- Transportstrecke
- Einkaufsgewohnheiten Konsument
- Verwendete Inputmaterialien (v-PET versus r-PET)
- End-of-Life (Thermische Verwertung von Siedlungsabfälle versus Recycling)

Da befüllte Flaschen nicht leer und lose transportiert werden, wurde in einer erweiterten Modellierung die Verpackung der PET-Flaschen, ebenso wie die benötigten Verpackungsmaterialien und deren Transport zum Verwendungsort ebenfalls mit dargestellt. Dieses zusätzliche Modell bietet so die Möglichkeit die Auswirkungen dieser Systemgrenzen- und Betrachtungserweiterung zu analysieren. Alle hierfür zusätzlich benötigten Informationen, wie beispielsweise die durchschnittliche Transportstrecke einer Verpackungsfolie, wurden aus dem Bericht von Henkel entnommen.²⁶⁰ Auch dieses Modell kann in seiner Gesamtheit dem Anhang dieser Arbeit entnommen werden.

7.2.3 Ergebnisse

Alle Modelle wurden mit Hilfe zweier Bewertungsmethoden für Ökobilanzen untersucht:

- LCIA Method: Ecological Scarcity 2006 (superseded) – total, total [UBP]

²⁶⁰ Henkel (o.D.), S.18

- LCIA Method: IPCC 2007 (superseded) – climate change, GWP 100a

$$\left[\frac{kgCO_{2eq.}}{PET - Flasche} \right]$$

Als Datensätze wurden, wenn vorhanden, jene aus Österreich verwendet, wie beispielsweise beim Strom, während ansonsten Daten aus der europäischen Region (RER) oder der Schweiz (CH) verwendet wurden. Nur wo keine anderen Daten vorhanden waren, oder eine Verwendung globaler Datensätze (GLO) sinnvoll war, wurde auf diese zurückgegriffen. Daten, die sich auf Länder außerhalb der EU beziehen, (ROW) wurden weitestgehend vermieden. Was davon auf die jeweiligen Prozesse zutrifft kann aus den Modellierungen im Anhang entnommen werden.

Die Ergebnisse aller Modellberechnungen werden in Tabelle 7-6 zusammengefasst.

Tabelle 7-6 Ergebnisse der PET-Flaschen Modelle als GWP und UBP

Modell	Annahmen Anpassungen	GWP $\left[\frac{kgCO_{2eq.}}{PET-Flasche} \right]$	UBP
Standardmodell	<ul style="list-style-type: none"> • Durchschnittswerte laut vorhergehenden Berechnungen 	0,28	275,78
Erweitertes Modell	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigt sowohl die Herstellung als auch den Transport von Verpackungsmaterial (Karton, Kunststoffolie, Holzpalette) 	0,29	289,49
Verkürzter Gütertransport	<ul style="list-style-type: none"> • 100km statt 550km 	0,26	252,45
Kein Recycling	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamter PE-Strom geht in die thermische Verwertung von Siedlungsabfällen 	0,28	276,63
Nur Recycling	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamter PE-Strom geht in die Aufbereitung und das Recycling 	0,27	274,50
Ohne Kühlung	<ul style="list-style-type: none"> • Getränk wird im Supermarkt nicht gekühlt 	0,22	232,56
Ohne Privat-PKW	<ul style="list-style-type: none"> • Keine privat PKW-Fahrt zum Supermarkt 	0,23	204,60

Mit r-PET	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung von r-PET als sekundär Rohstoff zur Flaschen Herstellung statt v-PET 	0,23	229,44
Best Case	<ul style="list-style-type: none"> • Ergibt sich aus oben genannten Szenarien • Nur r-PET als sekundär Rohstoff verwendet • Keine private PKW-Fahrt • Möglichst geringer Gütertransport (Annahme 100km) • Ausschließlich Recycling von PE • Keine Kühlung im Supermarkt 	0,09	87,88
Worst Case	<ul style="list-style-type: none"> • Ergibt sich ebenfalls aus oben genannten Szenarien • Ausschließlich v-PET als Primärrohstoff • Private PKW-Fahrt für nur eine Flasche • Maximaler Gütertransportweg (Annahme 700km) • Ausschließlich thermische Verwertung von PE • Kühlung im Supermarkt (48h) 	1,2	1.596,5

Die Ergebnisse des Standardmodells, das aufgrund oben in Kapitel 7.3.1 genannter Annahmen entsteht, wird in den folgenden Pivot Diagrammen abgebildet.

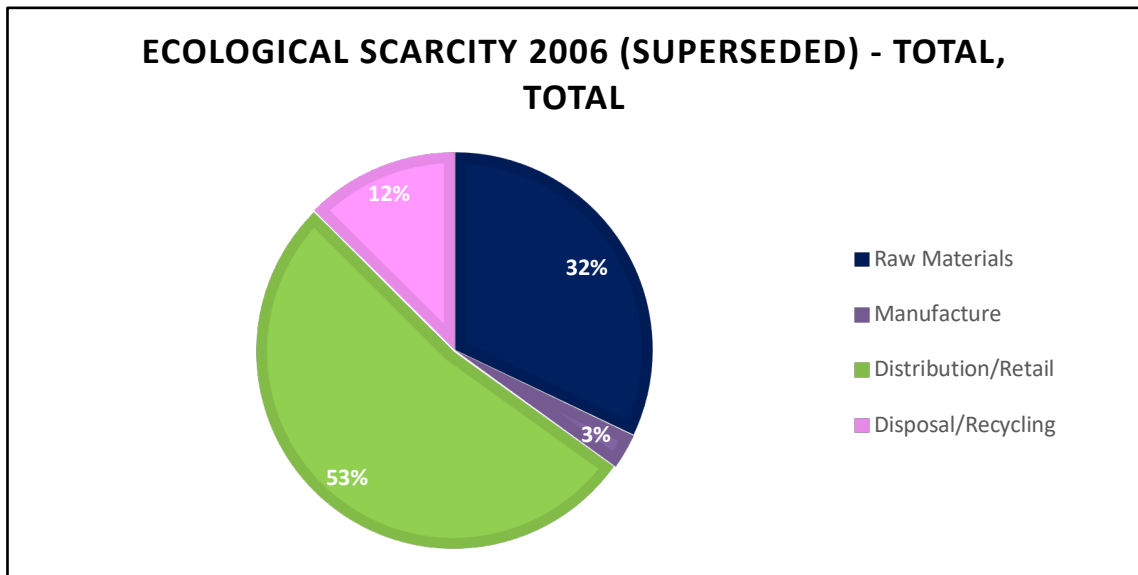


Abbildung 7-3 PET-Flaschen Standardmodell UBP nach Phasen²⁶¹

²⁶¹ Eigene Darstellung

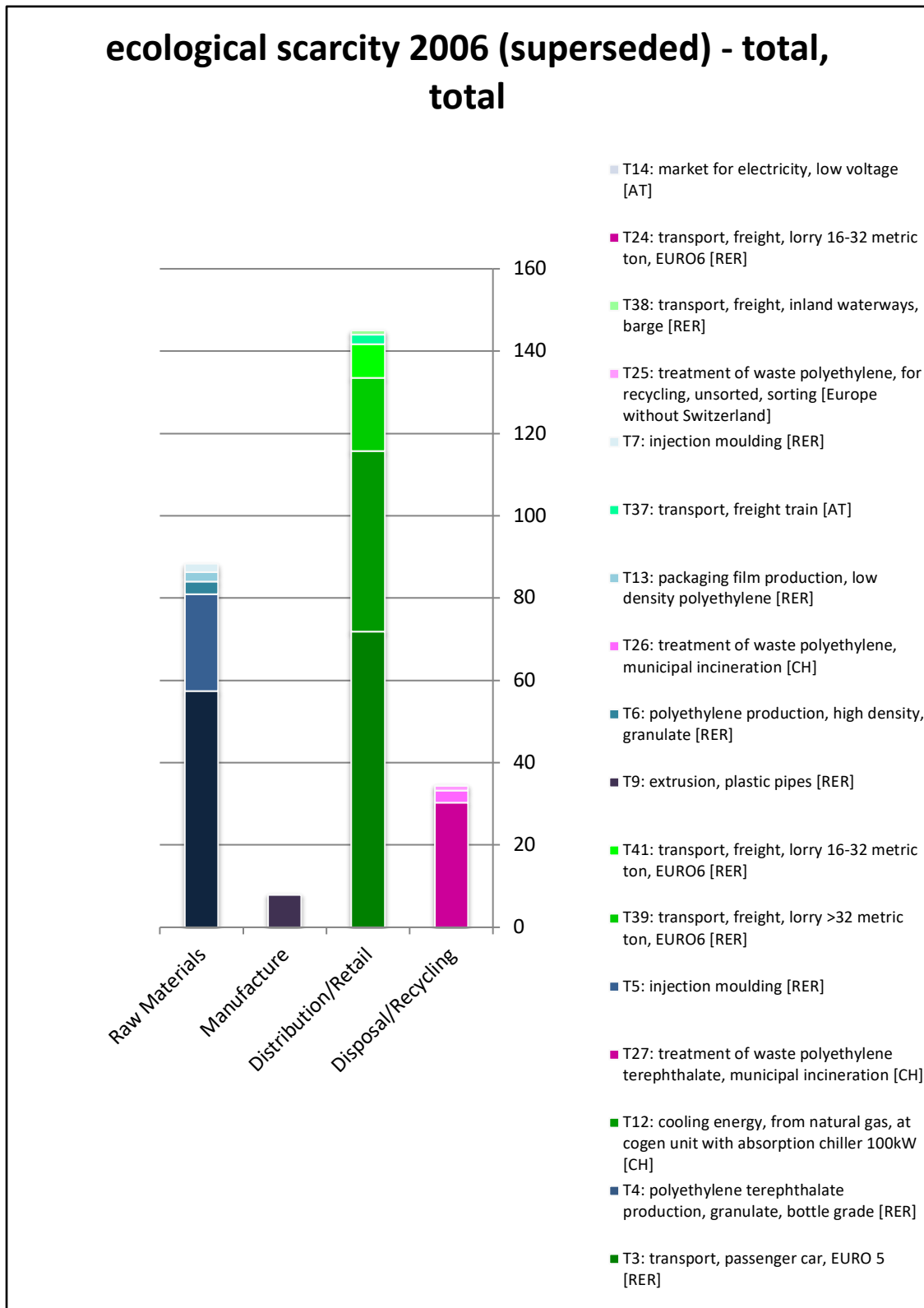


Abbildung 7-4 PET-Flaschen Standardmodell UBP²⁶²

²⁶² Eigene Darstellung

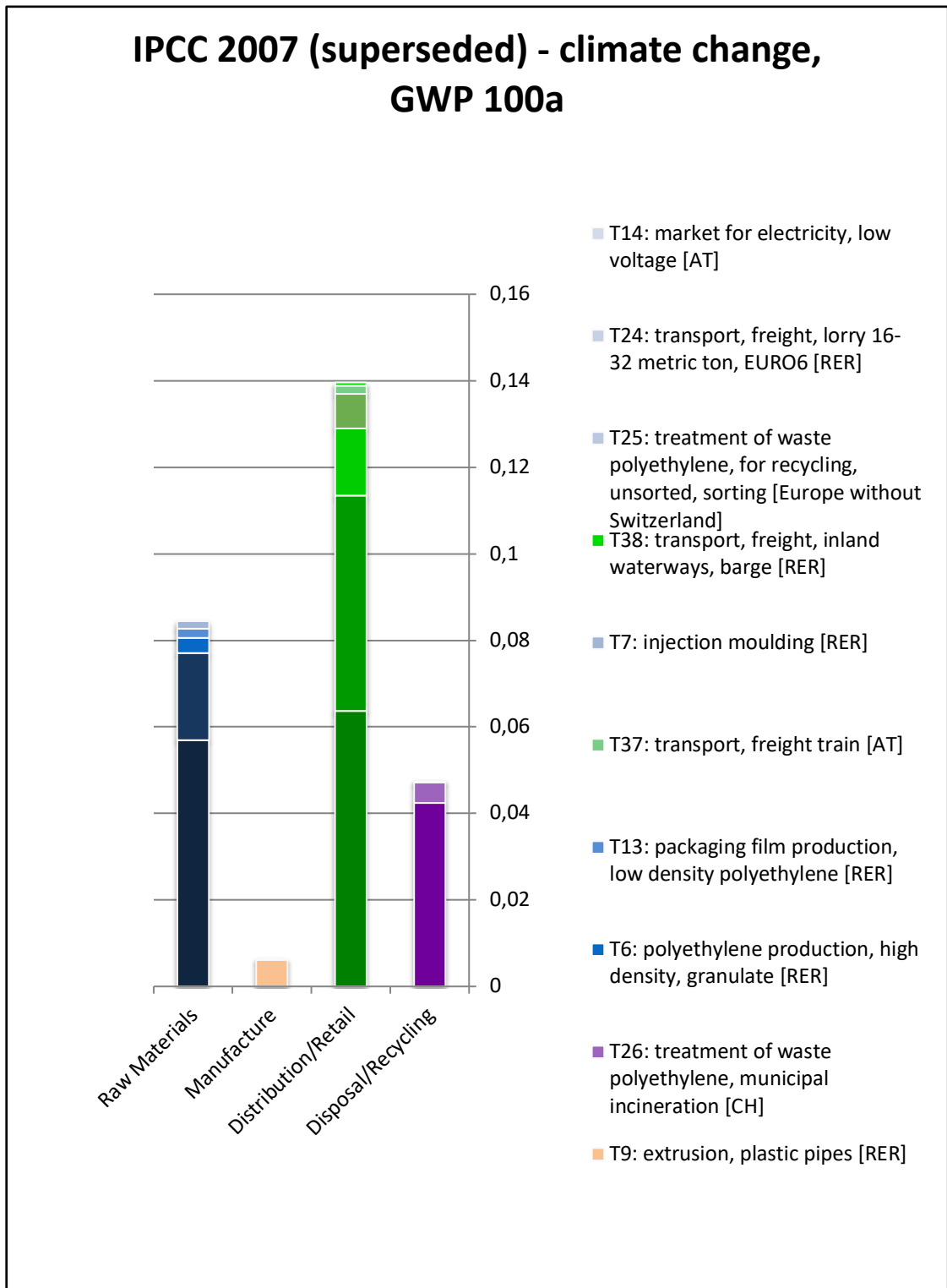


Abbildung 7-5 PET-Flaschen Standardmodell GWP²⁶³

²⁶³ Eigene Darstellung

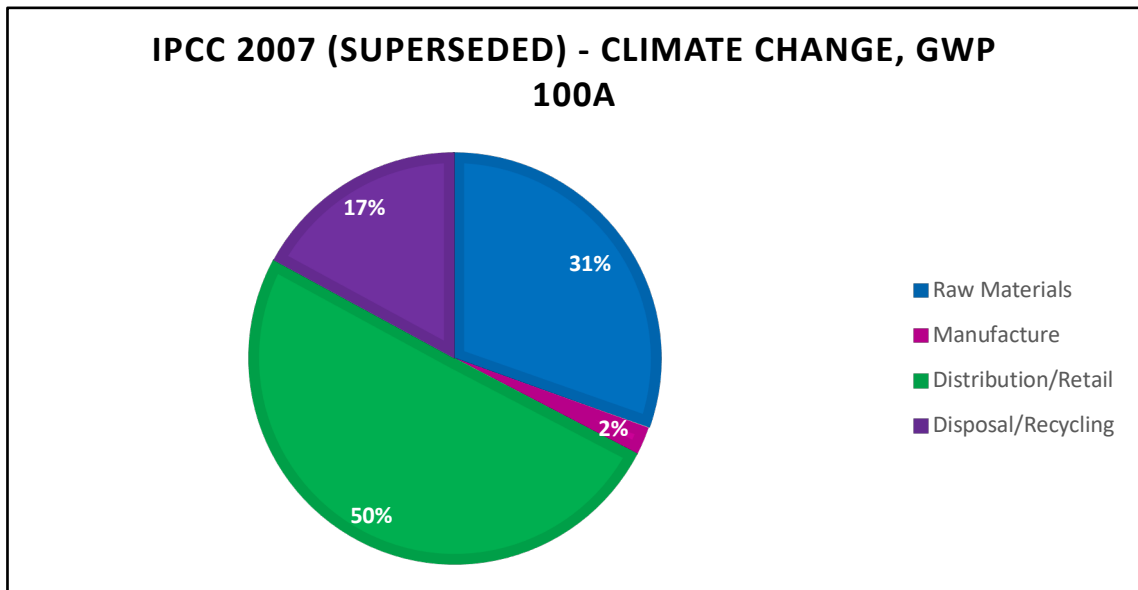


Abbildung 7-6 PET-Flaschen Standardmodell GWP nach Phasen²⁶⁴

7.3 Glasflasche

Das Modell, das sich mit der Herstellung, Verteilung und Verwendung, sowie der Entsorgung der Glasflasche beschäftigt, soll im weiteren Verlauf dieses Kapitels erörtert werden. Wie bereits eingangs erwähnt, ist die Recyclingrate bei Glas gegenwärtig ausgebaut. Ein Hohlglas besteht daher aus bis zu 60% aus Rezyklat. Deswegen wird bei der Modellierung der Glasflasche schon beim Herstellen der Flasche Rücksicht auf den bedeutenden Rezyklatanteil genommen und ist somit in den verwendeten Daten inkludiert. Die hier angeführten Ergebnisse sollen einen Vergleich zwischen der PET-Flasche und der Glasflasche ermöglichen. Auf welche Aspekte Rücksicht genommen wurde, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird im Weiteren genauer erläutert.

7.3.1 Annahmen

Auf Modellierungsschritte, die Annahmen oder Zugriff auf externe Daten bedurften, wird im Weiteren kurz eingegangen. Alle anderen Aspekte, die ident zur Kunststoffflasche sind, sind dem vorhergehenden Abschnitt zu entnehmen und werden an dieser Stelle nicht nochmals erwähnt.

Sowohl der Energiebedarf der Etikettierung, als auch der der Befüllung, wurde gleich wie bei der PET-Flasche angenommen, ebenso wie die Aspekte der Aufbewahrung im Supermarkt, der Transport mit dem privat PKW und die Abfallabholung. Auch das Material und die Masse der Verschlusskappe wurde nicht verändert. Als

²⁶⁴ Eigene Darstellung

Etikettenmaterial wurde bedrucktes Papier gewählt, wobei die Masse wie zuvor bei der PET-Flasche angenommen wurde.

Als Anhaltspunkt für die Masse der Glasflasche wurde auf die Daten von Höllensprudel zurückgegriffen und auf 365g pro Flasche festgesetzt.²⁶⁵

Der Transport der Glasflasche wurde geringfügig adaptiert, da eine Glasflasche für gewöhnlich nicht innerhalb derselben Anlage hergestellt und befüllt, beziehungsweise etikettiert wird. Die Annahmen der Transportstrecken zwischen Flaschenproduzent und Abfüller wurde an jene Angaben aus dem Bericht der Firma Henkel angelehnt.²⁶⁶ Der durchschnittliche Transport vom Warenhersteller, in diesem Fall der Glasflaschenproduzent zum verarbeitenden Betrieb, hier der Flaschenabfüller, errechnet sich daraus mit 200km.

7.3.2 Alternierende Modelle

Aufgrund der relativ konstanten Recyclingraten von Glas und dementsprechend nur einem möglichen End-of-Life Szenario, wurden lediglich die Transportrouten alterniert. Diese haben jedoch im Fall der Glasflasche, aufgrund des erhöhten Gewichtes gegenüber der Kunststoffflasche eine größere Auswirkung auf die Ergebnisse.

7.3.3 Ergebnisse

Alle Modelle wurden mit Hilfe derselben beiden Bewertungsmethoden für Ökobilanzen untersucht:

- LCIA Method: Ecological Scarcity 2006 (superseded) – total, total [UBP]
- LCIA Method: IPCC 2007 (superseded) – climate change, GWP 100a

$$\left[\frac{kgCO_{2eq.}}{Glasflasche} \right]$$

Die Ergebnisse aller Modellberechnungen werden in Tabelle 7-7 zusammengefasst. Das aufgrund der in Kapitel 7.3.1, sowie in Kapitel 7.3.1, genannten Annahmen entstehende Durchschnittsszenario, wird im Anschluss an die folgende Tabelle wieder in den Pivot Diagrammen dargestellt.

²⁶⁵ Höllensprudel, <https://www.hoellensprudel.de/sortiment/masse-gewichte-einheiten.html>
 (Zugriff: 03.04.2021)

²⁶⁶ Henkel (o.D.)

Tabelle 7-7 Ergebnisse der Glasflaschen Modelle als GWP und UBP

Modell	Annahmen Anpassungen	GWP $\left[\frac{kgCO_{2eq}}{Glasflasche} \right]$	UBP
Standardmodell	<ul style="list-style-type: none"> Durchschnittswerte laut vorhergehenden Berechnungen 	0,54	1.016,08
Verkürzter Gütertransport	<ul style="list-style-type: none"> 100km statt 550km 	0,5	976,36
Ohne Kühlung	<ul style="list-style-type: none"> Getränk wird im Supermarkt nicht gekühlt 	0,46	957,31
Ohne Privat-PKW	<ul style="list-style-type: none"> Keine privat PKW-Fahrt zum Supermarkt 	0,46	896,03
Best Case	<ul style="list-style-type: none"> Ergibt sich aus oben genannten Szenarien Keine private PKW-Fahrt Möglichst geringer Gütertransport (Annahme 100km) Keine Kühlung im Supermarkt 	0,34	797,54
Worst Case	<ul style="list-style-type: none"> Ergibt sich ebenfalls aus oben genannten Szenarien Private PKW-Fahrt für nur eine Flasche Maximaler Gütertransportweg (Annahme 700km) Kühlung im Supermarkt (48h) 	1,43	2.293,00

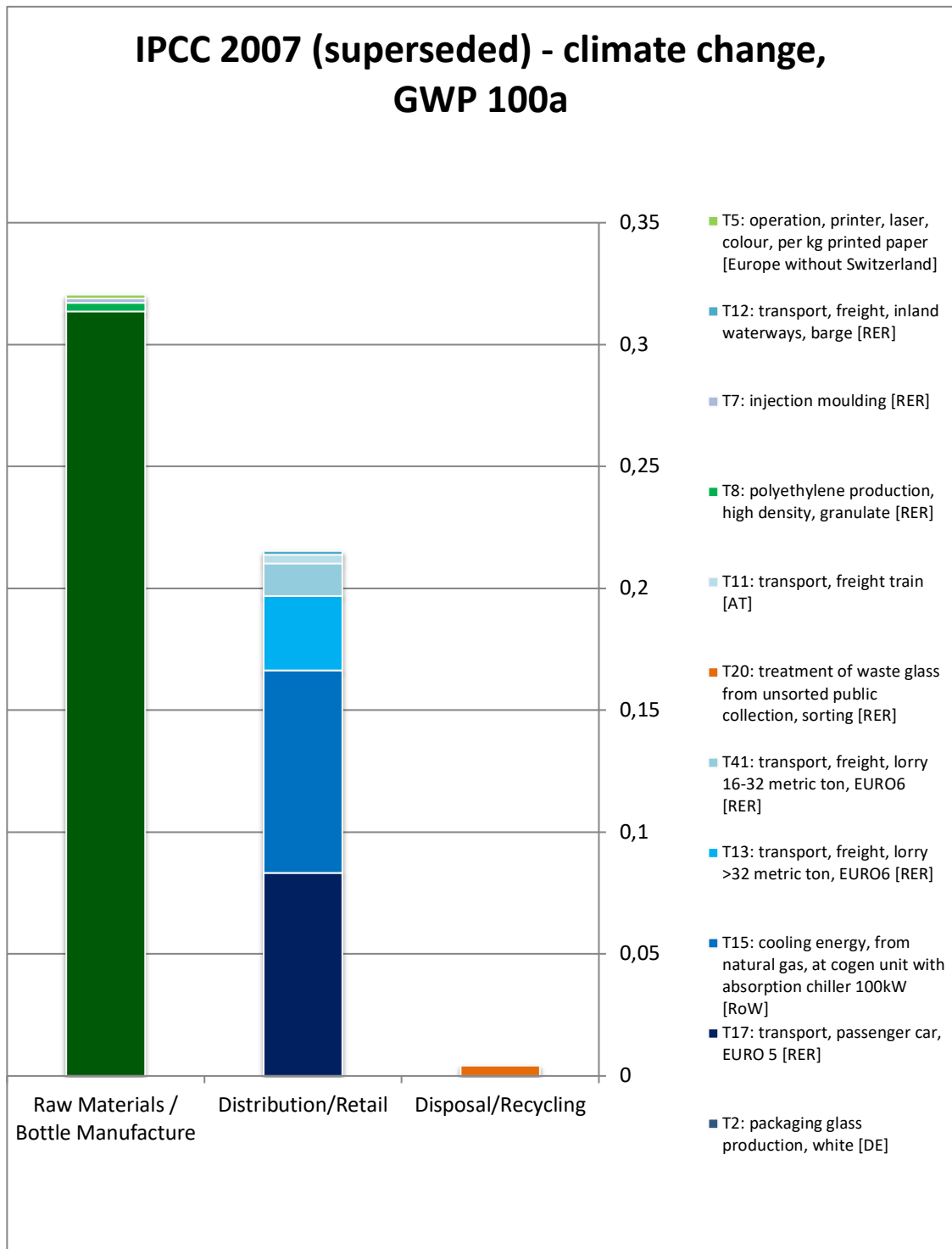


Abbildung 7-7 Glasflaschen Standardmodell GWP²⁶⁷

²⁶⁷ Eigene Darstellung

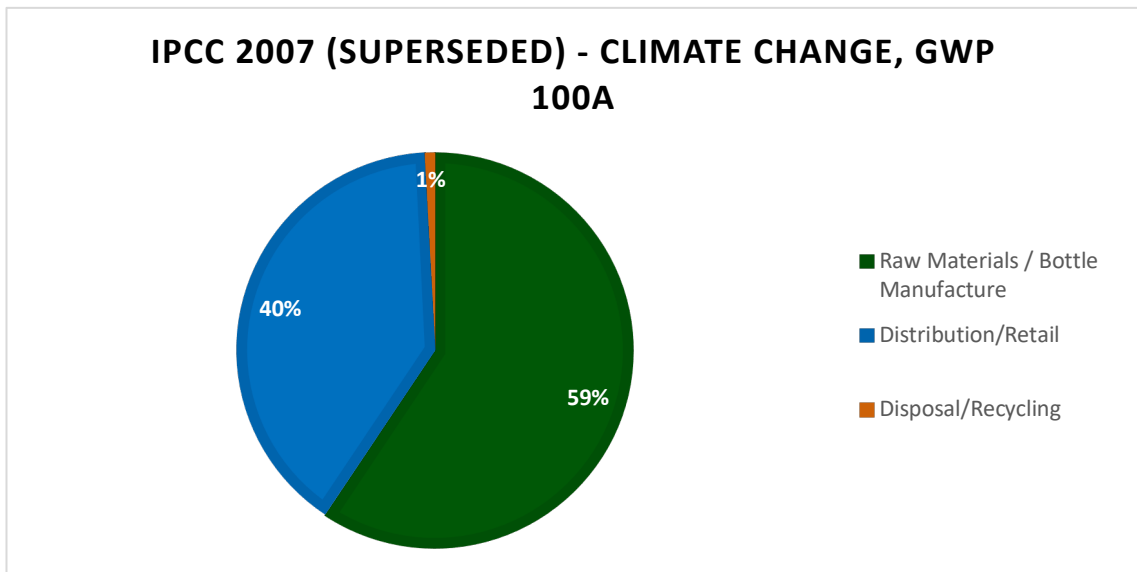


Abbildung 7-8 Glasflaschen Standardmodell GWP nach Phasen²⁶⁸

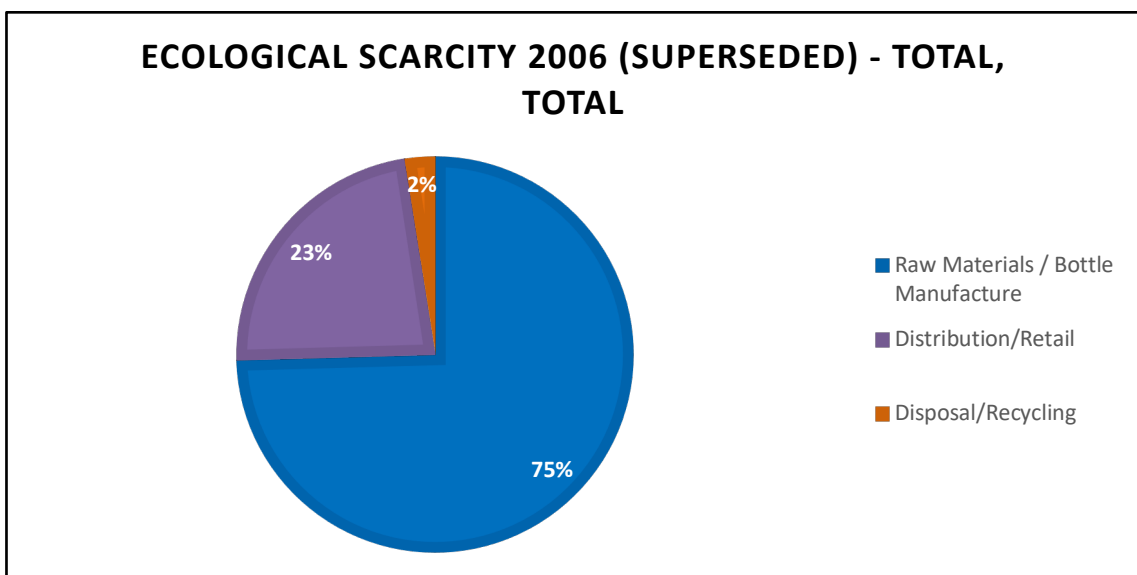


Abbildung 7-9 Glasflaschen Standardmodell UBP nach Phasen²⁶⁹

²⁶⁸ Eigene Darstellung

²⁶⁹ Eigene Darstellung

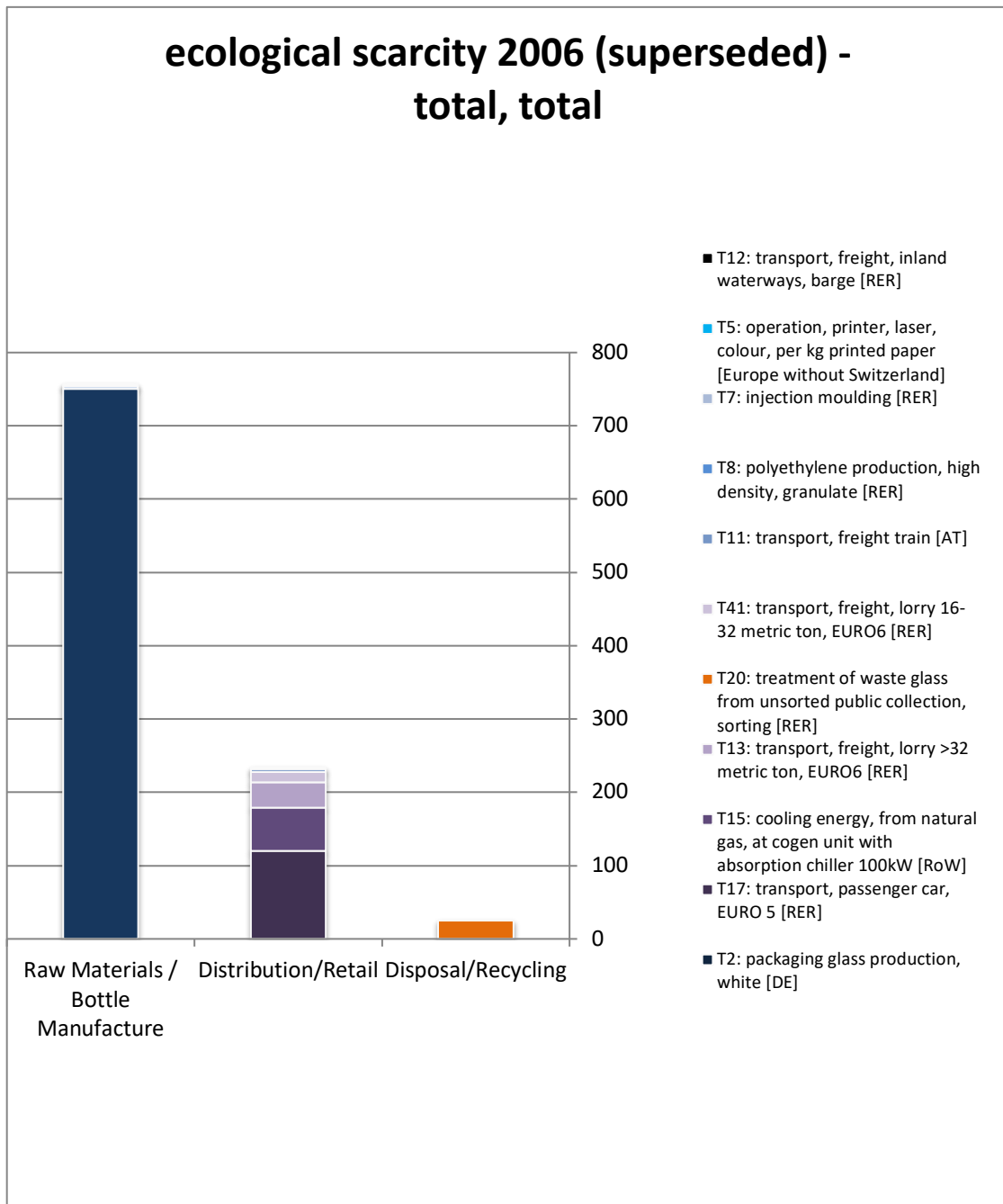


Abbildung 7-10 Glasflaschen Standardmodell UBP²⁷⁰

7.4 Vergleich, Interpretation und Bewertung der Ergebnisse

Der Vergleich zwischen verschiedenen LCA Studien ist immer mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Das liegt einerseits daran, dass die Systemgrenzen unterschiedlich festgelegt werden, andererseits auch an der Verwendung verschiedener Allokationsmethoden. Während dem Erstellen dieser Studie wurden, wenn möglich,

²⁷⁰ Eigene Darstellung

Vergleiche zu anderen Studien hergestellt, um die Ergebnisse auf Plausibilität überprüfen zu können. So wurden die Ergebnisse der CO_2 -Äquivalenz für die Herstellung von Kunststoffgranulat mit einer Studie von Fausto Gironi und Vincenzo Piemonte verglichen. Sie stellten einen durchschnittlichen GWP von 2,74 bis 4,54 $kgCO_{2eq}/kg_{PET}$ fest, womit diese Studie mit einem Wert von 2,76 $kgCO_{2eq}/kg_{PET}$ sich entsprechend in dieses Bild einordnet.²⁷¹

Im direkten Vergleich zwischen PET-Flasche und Glasflasche ist zu erkennen, dass, sollten beide jeweils nur einmal befüllt und entleert werden, bevor sie ihr Lebensende erreichen, sie sich deutlich voneinander unterscheiden, sowohl in Bezug auf die Umweltbelastungspunkte, als auch in Bezug auf das Global Warming Potential. Eine direkte Gegenüberstellung beider Standardmodelle zur besseren Übersicht ist in Tabelle 7-8 gegeben.

Tabelle 7-8 Vergleich der Standardmodelle

LCIA Methode	Glasflasche	PET-Flasche
UBP	1.016,08	275,78
GWP	0,54	0,28

Beim Glasrecycling ist, wie bereits mehrfach erwähnt, das Maximum der Wiederverwendung nach momentanen technischen Möglichkeiten beinahe ausgereizt. Durch ein geeignetes Sammelsystem und ausgereiften Aufbereitungsmethoden ist eine perfektionierte Kreislaufführung möglich. Aus Tabelle 7-8 ist ersichtlich, dass diese Vorgehensweise alleine aufgrund der entlang des Lebensweges anfallenden UBP und des GWP wichtig ist. Klar zu erkennen ist auch, dass bei der einmaligen Verwendung und sonst identen Parametern der GWP und die UBP von PET-Flaschen weitaus geringer ausfällt. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass Glasflaschen oft für die Mehrwegnutzung hergestellt werden. Solche bepfandeten Mehrwegbehältnisse können dabei bis zu 50-mal gereinigt und wieder befüllt werden.²⁷² Dieses Prinzip ist bei Bierflaschen in Österreich seit langem gängige Praxis. Auch der Sektor für antialkoholische Getränke holt hier gegenwärtig immer mehr auf, wie beispielsweise die Firma Murauer mit ihren Softdrinks „Murelli-Limonaden“²⁷³ vormacht.

Eine Studie des IFEU hat eine Ökobilanz für verschiedene Getränkeverpackungen erstellt und diese in Zusammenhang mit der Rücklaufquote für Glasflaschen untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass vor allem der Verkauf von Individualflaschen zunimmt. Diese erreichen jedoch eine geringere Umlaufzahl, die der Anzahl der Wiederbefüllungen entspricht, weil die Flaschen höherer mechanischer Belastung ausgesetzt sind und dadurch weniger Umlaufzahlen erreichen und früher aussortiert werden. Durch diesen Rückgang an Umlaufzahlen und vergleichsweise weiten

²⁷¹ Gironi, F.; Piemonte, V. (2011), S.463

²⁷² Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020)

²⁷³ Murauer, <https://www.murauerbier.at/alkoholfreies/murelli-limonaden/> (Zugriff: 04.04.2021)

überregionalen Transportwegen, sind alle in dieser Studie untersuchten Getränkeverpackungen, Glas- und PET-Flasche, sowie Aluminiumdose, gleichauf. Erst bei einer Umlaufzahl von 25 und darüber, sowie kurzen Transportstrecken von 100km, liegt die Mehrwegglasflasche im ökologischen Vergleich an erster Stelle. Bei einer Umlaufzahl von 10 sind diese drei Verpackungsoptionen beinahe gleichauf. Dieser Sachverhalt unterstreicht die große Bedeutung der Umlaufzahl und der Transportstrecken, bei der Betrachtung der Glasflasche. Darüber hinaus sind gerade in diesem Sektor noch viele Glasflaschen Einwegprodukte. Vor allem Discounterketten setzen im Getränkesortiment auf Einweglösungen, die zentral befüllt und überregional, mit Transportstrecken jenseits der 400km, vertrieben werden.²⁷⁴

Die PET-Flasche weist im Vergleich deutlich geringere Werte sowohl bei den UBP als auch bei dem GWP auf. Auffällig ist, dass die UBP der Glasflasche gut 3,5-mal so groß sind, wie jene der PET-Flasche, während das GWP der Glasflasche nur ungefähr das Doppelte ausmacht. Dies ist vor allem darauf zurück zu führen, dass die Methode der UBP auch andere Aspekte als den Beitrag zum Klimawandel mit einbezieht, wie beispielsweise die Emissionen in Gewässer, Luft oder den anfallenden Abfall im Allgemeinen.

Bei einem durchschnittlichen jährlichen Verbrauch von 187 PET-Flaschen pro Person in der Schweiz, ist der Beitrag für die mögliche CO_2 -Einsparung, den Umweltschutz und den Klimawandel nicht von der Hand zu weisen.

Gerade im Bereich des Kunststoffrecyclings gibt es noch viel Potenzial nach oben. Durch eine Anpassung der Sammelsysteme und eine erhöhte Recyclingrate könnten, mit bereits vorhandenen technischen Mitteln, die Anteile an recyceltem Kunststoff erhöht werden. Wie aus Tabelle 7-6 ersichtlich ist, bewirkt die Verwendung von r-PET eine Reduktion des GWP um $0,05kgCO_{2eq}$ je PET-Flasche. Gemessen an dem durchschnittlichen Konsum wäre das eine Einsparung von $9,35kgCO_{2eq}$ je Einwohner und Jahr. Wird angestrebt das Ziel der EU-Kreislaufwirtschaft zu erreichen, so ist eine Steigerung der Recyclingquote von Kunststoff nötig. Um dies umzusetzen sind nicht nur Forschungstätigkeiten auf dem Gebiet der Kunststoffaufbereitung nötig, sondern auch Investitionen in diesen Bereich. Dadurch würde sowohl in eine nachhaltigere Wirtschaft als auch in den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen investiert werden. Der Ausbau dieses Wirtschaftszweiges hat das Potenzial neue Arbeitsplätze zu schaffen und eine führende Rolle in diesem Sektor einzunehmen.

Darüber hinaus ist die Relevanz der privaten Einkaufsgewohnheiten zu unterstreichen. Denn durch diese trägt jeder, neben der Abfalltrennung im privaten Haushalt, aktiv zur Gestaltung des Emissionsgeschehens bei.

²⁷⁴ IFEU (2010), S.10

8 Zukunftsausblick im Verpackungswesen

In diesem Kapitel sollen in aller Kürze wichtige Aspekte und mögliche oder bereits existierende Probleme mit der angestrebten Kreislaufwirtschaft angesprochen werden.

Wie in Kapitel 7 bereits angesprochen wurde, herrscht beim Kunststoffrecycling momentan noch Aufholbedarf, sowohl um die EU-Ziele der Kreislaufwirtschaft zu erreichen als auch, um eine nachhaltigere Wirtschaft zu ermöglichen. Auch die, seit Jänner 2021 in Kraft getretenen, verschärften Regelungen zum Export von Kunststoffabfällen aus der EU erhöht den Druck auf die europäische Wirtschaft eine lokale Lösung für ihr Verpackungsabfallaufkommen zu finden. Diese verschärften Regeln sollen verhindern, dass verunreinigte, schwer sortierbare Kunststoffabfälle aus der EU in andere Länder exportiert werden und dort durch unsachgemäße Behandlung in die Umwelt gelangen. Denn, obwohl ein Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf der ökonomischen Bedeutung bestimmter Werkstoffgruppen und der Wichtigkeit einer LCA als Bewertungsmöglichkeit liegt, so sei dennoch, auch hier, auf das andauernde Problem der Umweltverschmutzung, nicht nur durch die Emissionen während des Lebenszyklus von Verpackungen verwiesen, sondern auch auf die direkte Verschmutzung durch unsachgemäße Entsorgung und das achtlose Wegwerfen (Littering).

Während die achtlose Entsorgung von Glas in die Umwelt von geringerer Bedeutung ist, ist eine Kunststoffverunreinigung unterdessen zu fragwürdigem Ruhm gekommen.

Die Akkumulation von größtenteils Kunststoffabfällen, auch als „Great Pacific Garbage Patch“ bezeichnet, befindet sich im pazifischen Ozean. Der Eintrag in das Meer geschieht dabei zu 88-95% über die größten Flusssysteme, wobei der Haupteintrag über den Jangtsee-Fluss stattfindet.²⁷⁵

Doch auch über die Donau gelangen nach Schätzungen jährlich 1530t Kunststoffe, davon hauptsächlich Mikrokunststoffe mit einem Durchmesser <5mm, ins Schwarze Meer befördert.²⁷⁶ Sowohl die Makrokunststoffe als auch die Mikrokunststoffe belasten die Umwelt und stellen Gefahren für Meereslebewesen und letzten Endes auch für den Menschen dar.²⁷⁷

Um die Einhaltung der neuen Vorgaben zu gewährleisten und um die Belastung auf die Umwelt durch Littering zu verringern, bedarf es jedoch einiger Änderungen. Solange keine Abnehmer für das Rezyklatprodukt vorhanden sind, wird sich der sekundäre Rohstoff am freien Markt nicht durchsetzen können und somit kein wirtschaftliches Interesse an der Aufbereitung und Wiederverwendung von Kunststoffverpackungen bestehen. Um dem nachzuhelfen, können verschiedene Optionen wie etwa die erweiterte Herstellerverantwortung oder ein Pfandsystem zum Einsatz kommen.

Die erweiterte Herstellerverantwortung sieht vor, dass die Produzenten und Inverkehrbringer von Produkten für die entstehenden Kosten, für die Abfallwirtschaft,

²⁷⁵ Huber-Humer, M. (2020), S.359

²⁷⁶ Mayerhofer, J. et al. (2020), S.388 f.

²⁷⁷ Huter, D.; Pomberger, R. (2020), S.378

Reinigung, sowie für Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung der Schadenswirkung Verantwortung tragen müssen.²⁷⁸

Die Einführung nationaler Pfandsysteme kann zu einer erhöhten Recyclingrate führen und auch die achtlose Entsorgung von Kunststoffverpackungen verringern. Eine Einführung eines solchen Pfandsystems führt jedoch oftmals auch zu einer Verringerung der Mehrwegquote und dadurch meist sogar zu einer Erhöhung der Einwegquote. Theoretisch erlauben auch Kunststoffverpackungen eine Wiederbefüllung, jedoch wird das in Österreich seit 20 Jahren nicht mehr praktiziert. Erst seit 2019 existieren vereinzelt Möglichkeiten zur Wiederbefüllung von Wasch- und Putzmitteln.²⁷⁹

Doch auch der logistische Aufwand, der hinter der Einführung eines solchen Pfandsystems steht, ist nicht unbeträchtlich und wird daher auch von den Supermarktketten oftmals als kritisch angesehen, da weder ihre momentanen baulichen Gegebenheiten, noch ihre Logistikinfrastruktur, darauf ausgelegt sind.²⁸⁰

Das Aufkommen sogenannter Bio-Kunststoffe, Kunststoffe die aus biologischen, angebauten Materialien hergestellt werden, bringt diverse Probleme mit sich. Einerseits werben diese Kunststoffe oft mit Begriffen wie „kompostierfähig“ oder „biologisch abbaubar“, was zu vermehrtem Littering oder zur Entsorgung über die Biotonne führt. Oft ist aber nicht geklärt und vor allem nicht angegeben, unter welche Bedingungen diese biologisch abbaubar sind. Nur wenige Stoffe erfüllen die Voraussetzungen um in Kompostieranlagen nicht als Störstoffe aufzutreten. Darüber hinaus existiert momentan keine reale Recyclingfähigkeit im Sinne einer stofflichen Verwertung. Dies ist auch dem Umstand geschuldet, dass der Marktanteil zu gering ist, um eine technisch durchführbare und wirtschaftliche Aufbereitung zu gewährleisten, weswegen sich der Nutzen der biobasierten Kunststoffe lediglich auf ihre Treibhausgas-Neutralität bei der Verbrennung verringert. Auch der Aspekt des „Green-Washing“, also die Vermittlung des Eindruckes einer besonderen Umweltverträglichkeit gegenüber Konsumenten, ist bei biobasierten Kunststoffen von deutlicher Relevanz. Während Kunststoffe oder „Plastik“, meist zu Unrecht, verteufelt wird, so vermitteln biobasierte Produkte den Anschein besonders umweltfreundlich zu sein.²⁸¹

Biobasierte Kunststoffe verursachen in der Regel weniger Treibhausgase als ihre fossilen Pendanten, jedoch werden die nachwachsenden Rohstoffe zur Erzeugung von Bio-Kunststoffen auf landwirtschaftlichen Flächen angebaut und können somit in Konkurrenz zu Nahrungsmitteln stehen oder zur Abholzung von Wäldern führen.²⁸²

Auch die PET-Flaschen selbst bringen ein in sich geschlossenes Problem mit sich, denn um beim Transport möglichst effizient zu sein, ist es von Vorteil, wenn die Flaschen wenig wiegen, doch um diese dünnwandigen Flaschen herstellen zu können, bedarf es höchster Rohstoffqualität, weswegen dafür nur v-PET in Frage kommt. Dadurch haben

²⁷⁸ Schaffernak, M. A. et al. (2020), S.14

²⁷⁹ Schaffernak, M. A. et al. (2020), S.11 ff.

²⁸⁰ Pomberger, R. (2020)

²⁸¹ Pomberger, R. (2021), S.3

²⁸² WWF, <https://www.wwf.de/themen-projekte/landwirtschaft/bioenergie/bioplastik> (Zugriff: 04.04.2021)

Flaschen, welche aus r-PET hergestellt werden, automatisch dickere Wandstärken und somit mehr Gewicht.²⁸³

Um zukünftig eine möglichst sortenreine Trennung von Kunststoffabfällen zu ermöglichen, muss bereits beim Produktdesign auf die spätere Recyclingfähigkeit geachtet werden. Gerade hier ist die LCA ein wichtiges Werkzeug, um verschiedene Alternativen im Vergleich miteinander abzuwägen und so nach verschiedenen ökologischen und ökonomischen Aspekten entscheiden zu können. Dies wäre beispielsweise durch die Verwendung von einheitlichen Wasserzeichen oder durch den Einsatz von Fluoreszenzmarkern möglich. Durch dieses sogenannte Tracer Based Sorting wird die Erzeugung hochwertiger Rezyklate möglich.²⁸⁴

Momentan werden, wie im Kapitel 5.4 zum Thema Aufbereitung und Recycling von Kunststoffen beschrieben, einige Fraktionen des Kunststoffes, die sich unter aktuellen Gesichtspunkten der Aufbereitung und des Recyclings nicht zur Wiederverwendung eignen, in Zementwerken als Ersatzbrennstoffe eingesetzt. Sollten diese Fraktionen zukünftig ebenfalls dem Recycling zugeführt werden, muss deren Brennwert in Zementwerken wieder mit fossilen primär Energieträgern ersetzt werden. Auch der Aspekt der sekundären Brennstoffe sollte bei der Planung einer zukünftigen Kreislaufwirtschaft, eventuell im Rahmen einer Ökobilanz, beachtet werden, ist jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.

Eine Nutzen- und Kostenanalyse eines verstärkten Recyclings von Kunststoffverpackungen, von Emile Van Eygen und Johann Fellner hat ergeben, dass die zusätzlichen Kosten, die zum Erreichen des „neuen“ Recyclingziels 60 Millionen Euro beitragen, einen zusätzlichen Output von 46.000 Tonnen Rezyklat zu generieren. Dies würde eine Einsparung von 80.000 tCO_{2eq} ermöglichen und so zu spezifischen Vermeidungskosten für Treibhausgasemissionen in einer Höhe von 770€ pro Tonne CO_{2eq} , bei einem Zertifikatspreis von 25€ pro Tonne, führen.²⁸⁵

In einer anderen Studie, die die Behandlung von Restmüll untersucht, wurde festgestellt, dass eine Verdreifachung der Beschäftigungszahlen möglich wäre, wenn das System anpasst und erweitert werden würde.²⁸⁶ Die Schaffung dieser zusätzlichen, „grünen“ Arbeitsplätze würde einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigeren Wirtschaft leisten.

Die zunehmende Globalisierung trägt zum Wirtschaftswachstum bei und schafft mehr Möglichkeiten als je zuvor. Sie trägt allerdings auch zu einer Zunahme des Gütertransportes über weite Strecken bei.²⁸⁷ Um dennoch, über Ländergrenzen hinweg, ein hinreichendes Recycling zu ermöglichen wäre die Einführung einer einheitlichen Markierung, wie beispielsweise Wasserzeichen, unerlässlich. Gerade Institutionen und Organisationen wie die EU bieten die perfekten Voraussetzungen, um eine gemeinsame und nachhaltige Lösung zu schaffen.

Doch auch bei Glas ist innerhalb der EU eine Verbesserung der Recyclingrate möglich. Die durchschnittliche Glasrecyclingrate in der EU beträgt relativ konstant 74%, wobei

²⁸³ Kauertz, B.; Detzel, A. (2017), S.24 f.

²⁸⁴ Woidasky, J. et al. (2020), S.441

²⁸⁵ Van Eygen, E.; Fellner, J. (2020), S.45

²⁸⁶ Altendorfer, M. et al. (2020), S.34

²⁸⁷ OECD (2008), S.41

Länder mit fortschrittlichen Sammel- und Aufbereitungssystemen eine Recyclingrate von über 90% erzielen. Ein mögliches Ziel wäre in Ländern, die noch keine so ausgezeichnete Recyclingrate haben, verstärkte Aufmerksamkeit darauf zu richten.²⁸⁸

Darüber hinaus gibt es Bestrebungen, in der EU, auch bei der Glasherstellung vermehrt auf Ökostrom zu setzen. Erste Projekte wurden durch Behälterglashersteller in Europa durchgeführt, um einen Hybridelektroofen zu bauen der zu 80% mit Ökostrom betrieben werden kann.²⁸⁹

Um eine erhöhte Recyclingrate zu gewährleisten, sind, unabhängig von dem Werkstoff, getrennte Sammlungssysteme unerlässlich. Bei Glas ist dies bereits weitestgehend idealisiert, doch die Trennung von Kunststoffabfällen ist noch problembehaftet. Auch der vorherrschende Föderalismus innerhalb einzelner Nationen macht eine einheitliche Abfallsammlung schwierig. Doch gerade die wäre wichtig, um eine bestmögliche Aufbereitung gewährleisten zu können und zumindest die regionalen Schwankungen in der Zusammensetzung des Aufgabegutes zu verringern. Um den aufbereiteten Kunststoff als sekundär Rohstoff einsetzen zu können ist eine möglichst sortenreine Trennung von besonderer Bedeutung. Der Aufgabestrom ist dennoch, und nicht zuletzt wegen der Vielfalt an verschiedenen Kunststoffen, sehr unregelmäßig und sowohl regionalen als auch saisonalen Schwankungen unterworfen. Würde man eine gemeinsame Sammlung aller Haushaltsabfälle aufbereiten wollen, wäre eine Vielzahl von Schritten notwendig, um wiederverwendbare Stoffgruppen zu generieren.

Je höher die Steigerung des Wertstoffinhaltes zwischen dem Aufgabegut und dem Produkt sein soll, desto mehr und immer feiner arbeitenden Prozessschritte und Anlagenabschnitte sind nötig, wodurch es zu einer exponentiellen Steigerung der Kosten kommt.²⁹⁰

Durch eine Vorsortierung mittels geeigneter Abfallsammelsysteme ist dieser Aufwand zu verringern, jedoch ist immer noch eine hohe Reinheit nötig, um eine Wiederverwendung beziehungsweise Kreislaufführung zu ermöglichen. Daher ist ein dezentraler Ansatz zur Aufbereitung von Verpackungsabfällen, nach Meinung der Autorin, nicht wirtschaftlich realisierbar.

²⁸⁸ EU-R (2018)

²⁸⁹ EU-R

²⁹⁰ Lechleitner, A. et al. (2020), S.50

9 Zusammenfassung

Wir haben nur einen Planeten und dennoch konsumieren wir bis zum Jahr 2050, als hätten wir drei.²⁹¹ Die aufstrebenden Volkswirtschaften wachsen schnell, was zu verstärkter Nachfrage im Energiesektor und zunehmenden Umweltverschmutzungen führt. Ohne verstärkte politische Kohärenz wird es in Zeiten einer globalisierten Wirtschaft nicht möglich sein, dauerhaft nachhaltige Lösungen für das vermehrte Abfallaufkommen zu finden. Wenn nachhaltiges Wachstum gefördert wird kann das dazu beitragen Armut zu mindern, Entwicklung zu fördern und gleichzeitig die Umwelt zu schützen.²⁹²

Der Umgang der Gesellschaft mit Konsumgütern und die Haltung der „Wegwerfgesellschaft“ muss verändert werden, um den Gedanken der Nachhaltigkeit zu leben. Dafür bedarf es einer durchsichtigen Regelung für die Abfallsammlung und einer bewussten Information und Sensibilisierung der Gemeinschaft. Bereits 1998 hielt Klaus Kümmerer fest, dass es eines Denkens im gesamten Naturzusammenhang bedarf, um Herausforderungen, wie diese, zu bewältigen.²⁹³ Die Verwendung von Verpackungsmaterialien wird sich nicht verringern, da kaum jemand auf die Bequemlichkeiten, die diese bieten verzichten will. Worauf jedoch alle Einfluss haben ist, wie mit diesen umgegangen wird, nachdem sie das Ende ihrer Gebrauchsphase erreicht haben. Es ist nötig sich seines Konsums vermehrt bewusst zu werden und auch danach zu handeln. Wie diese Studie zeigt, hat Kunststoff ein schlechteres Image als gerechtfertigt. Durch seine geringe Dichte und die dadurch gewichtsoptimierbare Gestaltung von PET-Flaschen stellt er eine der sinnvollsten Optionen zur Aufbewahrung von Getränken dar. Glasflaschen haben unterdessen ein teilweise ungerechtfertigtes „grünes“ Image. Mehrwegbehältnisse aus Glas sind durchaus sinnvolle Alternativen, auch für nicht alkoholische Getränke, doch der Trend hin zu Einwegglasflaschen statt Kunststoffflaschen konnte aufgrund der Ergebnisse dieser Studie nicht als sinnvoll erachtet werden. Das Potenzial, das eine vermehrte Kreislaufführung, für Wirtschaft und Länder hat, ist durch spezifische Vermeidungskosten für Treibhausgase und die Schaffung neuer Arbeitsplätze, im Sinne der Nachhaltigkeit, gegeben. Es gibt viele Möglichkeiten eine Kreislaufwirtschaft zu fördern. Jedes System und jede Entscheidung, sollte jedoch in seiner Gesamtheit betrachtet werden, um eine etwaige Verlagerung von Problemen zu vermeiden. Es wird in vielen Bereichen der Kunststoffweiter- und Wiederverwertung geforscht, um neue Möglichkeiten aufzuzeigen. Obwohl bereits viel getan wird, wird auch im Bereich der Verpackungen mehr nötig sein, um den momentanen Trend des Klimawandels zu verlangsamen.

²⁹¹ European Commission (2020), S.4

²⁹² OECD (2008), S.338

²⁹³ Hofmeister, S. (1998), S.1

Literaturverzeichnis

- Abts, G. (2010): Kunststoff-Wissen für Einsteiger. München: HANSER. ISBN 978-3-446-42009-0.
- Albrecht, H.; Becker, K.; Flessa, K.; Ganss, H.; Giegerich, W. (1964): Glasmaschinen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-23630-7.
- Altendorfer, M.; Pomberger, R.; Gelbmann, U. (2020): Vergleich abfallwirtschaftlicher Systeme für Siedlungsabfälle mit Schwerpunkt Beschäftigungseffekte. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Jg. 72, Nr. 1–2, S. 21–37.
- Andratschke, M.; Spanner, M.; Dachs, A.-K. (2011): Glas - Struktur und Eigenschaften, Wintersemester /2012.2011.
- Ankele, K.; Meyerhoff, J. (1997): Ökonomisch-ökologische Bewertung. In: Ökologisches Wirtschaften - Fachzeitschrift, Jg. 12, Nr. 3–4, S. .
- ARA (o.D.): EU-Kreilaufwirtschaftspaket - Herausforderungen und Lösungen. ARA. URL: <https://www.ara.at/> (Zugriff: 15.03.2021).
- Arnold, B. (2013): Werkstofftechnik für Wirtschaftsingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-36590-4.
- Auer, M. (2020): Klimaziele verfehlt: Eine halbe Milliarde Euro pro Jahr reicht nicht. In: Die Presse 06.03.2020, S. Wien.
- Bauer, M.; Lehner, M.; Schwabl, D.; Flachberger, H.; Kranzinger, L.; Pomberger, R.; Hofer, W. (2017): Bestandsaufnahme und mögliche Perspektiven der nass-mechanischen Aufbereitung von Altkunststoffen für das rohstoffliche Recycling. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Jg. 69, Nr. 11–12, S. 446–459.
- Berger, J. (2013): Kyoto-Protokoll. Umweltbundesamt. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/kyoto-protokoll> (Zugriff: 19.08.2020).
- Bilitewski, B.; Härdtle, G. (2013): Abfallwirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-79530-8.
- BMVIT (2003): Handbuch: Produktbezogene Umweltinformationssysteme (PUIS) in Theorie und Praxis, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. In: .
- Brinkmann; Baur; Osswald; Schmachtenberg (2007): Saechtling Kunststoff Taschenbuch. 30.Ausgabe, München: HANSER. ISBN 978-3-446-40352-9.
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2019): Abfall Trenn-ABC, URL: bmnt.gv.at (Zugriff: 12.02.2021).
- Bunz, M.; Mücke, H.-G. (2017): Klimawandel – physische und psychische Folgen. In: Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz, Jg. 60, Nr. 6, S. 632–639.
- Coca-Cola (o.D.): Coca-Cola. URL: <https://www.coca-cola-oesterreich.at/marken/coca-cola> (Zugriff: 31.03.2021).
- Consilium Europa (2021): Maßnahmen der EU gegen den Klimawandel. URL: <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/climate-change/> (Zugriff: 21.02.2021).

- DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- Dormer, A.; Finn, D. P.; Ward, P.; Cullen, J. (2013): Carbon footprint analysis in plastics manufacturing. In: Journal of Cleaner Production, Jg. 51, S. 133–141.
- Ecoinvent (o.D.): Ecoinvent Database Version 3. Ecoinvent. URL: <https://www.ecoinvent.org/database/database.html> (Zugriff: 28.03.2021).
- EU-R (2018): Glasrecycling erfolgt noch nicht überall in Europa. URL: <https://eu-recycling.com/Archive/20147> (Zugriff: 30.03.2021).
- EU-R Mehr Glasrecycling – weniger CO₂. URL: <https://eu-recycling.com/Archive/27359> (Zugriff: 04.04.2021).
- European Commission (2015): Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft, 02.12.2015.
- European Commission (2016): Carbon leakage. Klimapolitik - European Commission. URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/allowances/leakage_en (Zugriff: 27.03.2021).
- European Commission (2016): Übereinkommen von Paris. Klimapolitik - European Commission. URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de (Zugriff: 20.08.2020).
- European Commission (2020): Circular Economy Action Plan - for a cleaner and more competitive Europe, 2020.
- Eurostat (2017): Statistik des Güterverkehrs – Statistics Explained. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Freight_transport_statistics/de&oldid=354266 (Zugriff: 27.02.2021).
- Evans, D.; Watkins, S. (2017): Polymers: from DNA to rubber ducks. Australian Academy of Science. URL: <https://www.science.org.au/curious/everything-else/polymers> (Zugriff: 11.03.2021).
- Eyerer, P.; Hirth, T.; Elsner, P. (2008): Polymer Engineering - Technologien und Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-72402-5.
- Feßmann, J.; Orth, H. (2002): Angewandte Chemie und Umwelttechnik für Ingenieure: Handbuch für Studium und betriebliche Praxis. ecomed-Storck GmbH. ISBN 978-3-609-68352-2.
- Gastro-Held (o.D.): Gastro Wandkühlregale - GastroHeld Online Shop. URL: https://www.gastro-held.at/K%C3%BChltechnik/Wandk%C3%BChlregale?gclid=EAIaIQobChMIuc38hNnf7wIVFs93Ch34KAAPEAAAYASAAEgIZ8vD_BwE&gclid=aw.ds (Zugriff: 02.04.2021).
- Gironi, F.; Piemonte, V. (2011): Life cycle assessment of polylactic acid and polyethylene terephthalate bottles for drinking water. In: Environmental Progress & Sustainable Energy, Jg. 30, Nr. 3, S. 459–468.
- Gladden, W. (2003): Kennzahlen- und Berichtssysteme. 2., überarbeitete Auflage, Wiesbaden: Gabler Verlag. ISBN 978-3-409-21828-3.
- Haubach, C. (2013): Umweltmanagement in globalen Wertschöpfungsketten. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 978-3-658-02486-4.
- Henkel (o.D.): Einführung in die Lebenszyklusanalyse, o.D.
- Hofmeister, S. (1998): Von der Abfallwirtschaft zur ökologischen Stoffwirtschaft: Wege zu einer

- Ökonomie der Reproduktion. Opladen: Westdt. Verl. ISBN 978-3-531-13164-1.
- Huber-Humer, M. (2020): Die ubiquitäre Umweltpräsenz von Kunststoffen: ein Makro- oder Mikroproblem? In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Jg. 72, Nr. 9–10, S. 357–360.
- Huter, D.; Pomberger, R. (2020): Der Beitrag der Steiermark zum Marine Littering. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Jg. 72, Nr. 9–10, S. 378–387.
- Höllensprudel (o.D.): Höllensprudel | Maße / Gewichte / Einheiten. URL: <https://www.hoellensprudel.de/sortiment/masse-gewichte-einheiten.html> (Zugriff: 03.04.2021).
- IFEU (2010): Umweltargumente für die Getränkedose, auf Basis der Ökobilanziellen Untersuchung verschiedener Verpackungssysteme für Bier, IFEU Institut. 2010.
- ifu Hamburg GmbH (2018): Umberto Tutorial 2a - Life Cycle Assessment (LCA) with Umberto, ifu Hamburg GmbH. .01.2018.
- Institut für Umweltinformatik (2021): Ökobilanz-Software - Umberto | Institut für Umweltinformatik. ifu Hamburg GmbH. URL: <https://www.ifu.com/umberto/oekobilanz-software/> (Zugriff: 01.04.2021).
- Jägermeister (o.D.): Jägermeister Home Page. Jägermeister. URL: <https://www.jaegermeister.com/en/home> (Zugriff: 29.03.2021).
- Kaiser, W. (2011): Kunststoffchemie für Ingenieure. 3.Auflage, München: HANSER. ISBN 978-3-446-43047-1.
- Kauertz, B.; Detzel, A. (2017): Verwendung und Recycling von PET in Deutschland - Verwendung von PET und PET Rezyklaten aus Verpackungen in Deutschland Eine Kurzstudie im Auftrag des NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. .10.2017.
- Keim, W. (2006): Kunststoffe: Synthese, Herstellungsverfahren, Apparaturen. 1.Auflage, Weinheim: WILEY-VCH. ISBN 978-3-527-31582-6.
- Koch, S. (2012): Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-15288-7.
- Krätzig, C. (2019): Der Klimawandel ist keine Glaubenssache. URL: <https://www.uni-hamburg.de/newsroom/im-fokus/2019/09-27-klimaluegner.html> (Zugriff: 21.02.2021).
- Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (2018): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 978-3-658-17044-8.
- Lechleitner, A.; Schwabl, D.; Schubert, T.; Bauer, M.; Lehner, M. (2020): Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Jg. 72, Nr. 1–2, S. 47–60.
- Lin, C. C. (1998): Recycling technology of poly(ethylene terephthalate) materials. In: Macromolecular Symposia, Jg. 135, Nr. 1, S. 129–135.
- Maschinenbau-Wissen (2009): Streckblasen – Verfahren & Funktionsweise. URL: <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/420-streckblasen> (Zugriff: 12.03.2021).
- Mayerhofer, J.; Lenz, S.; Obersteiner, G. (2020): Aufkommen und Zusammensetzung von Makrokunststoffen an der Donau. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Jg. 72, Nr. 9–10, S. 388–393.
- Meyer, I.; Sommer, M.; Kratena, K.; Tesar, M.; Neubauer, C. (2016): Volkswirtschaftliche

Effekte durch Recycling ausgewählter Altstoffe und Abfälle. ÖSTERREICHISCHES INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSFORSCHUNG. .11.2016.

Murauer (o.D.): Murelli-Limonaden – Murauer Bier. URL: <https://www.murauerbier.at/alkoholfreies/murelli-limonaden/> (Zugriff: 04.04.2021).

Neue Verpackung (2020): Müssen Gewichtsunterschiede von 290 Prozent sein? URL: <https://www.neue-verpackung.de/66036/muessen-gewichtsunterschiede-von-290-prozent-sein/> (Zugriff: 07.03.2021).

OECD (2008): Nachhaltige Entwicklung, Wirtschaft, Gesellschaft, Umwelt im Zusammenhang betrachtet, 2008.

Pennington, D. W.; Potting, J.; Finnveden, G.; Lindeijer, E.; Jolliet, O.; Rydberg, T.; Rebitzer, G. (2004): Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. In: Environment International, Jg. 30, Nr. 5, S. 721–739.

Plastics Europe (2016): Polyethylen Terephthalate (PET) (Bottle Grade) CPME - June 2017, 2016.

Plastics Europe (2018): Plastics the facts 2018, 2018.

Plastics Europe (2020): Plastics - the Facts 2020: An analysis of European plastics production, demand and waste data, 2020.

Pomberger, R. (2020): Abfall = Rohstoff / Über den Umgang mit den Stoffwechselprodukten unserer Gesellschaft. online. 05.11.2020.

Pomberger, R. (2021): Über theoretische und reale Recyclingfähigkeit. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Jg. 73, Nr. 1–2, S. 24–35.

Rebitzer, G.; Ekvall, T.; Frischknecht, R.; Hunkeler, D.; Norris, G.; Rydberg, T.; Schmidt, W.-P.; Suh, S.; Weidema, B. P.; Pennington, D. W. (2004): Life cycle assessment Part1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. In: Environment International, Jg. 30, Nr. 5, S. 701–720.

Ritter, F. (1950): Einführung in die Baustoffkunde. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-23838-7.

Rudolph, N.; Kiesel, R.; Aumnate, C. (2020): Einführung Kunststoffrecycling: ökonomische, ökologische und technische Aspekte der Kunststoffabfallverwertung. ISBN 978-3-446-46128-4.

Ruzicka, J. (2016): Viele Regeln erschweren den Österreichern das Mülltrennen. In: DER STANDARD 18.08.2016, S. .

Schaeffer, H. A.; Langfeld, R. (2020): Werkstoff Glas: Alter Werkstoff mit großer Zukunft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-60259-1.

Schaffernak, M. A.; Lichtenegger, S.; Dr. Wellacher, M. M. (2020): Umsetzung der EU-Kunststoffstrategie in der Steiermark - Ausgangslage, Potentiale, technische Möglichkeiten und Maßnahmen. Leoben: Montan Universität - LEHRSTUHL FÜR ABFALLVERWERTUNGSTECHNIK UND ABFALLWIRTSCHAFT. 30.08.2020.

Schubert, H. (1967): Aufbereitung fester mineralogischer Rohstoffe. 2: Sortierverfahren, Dichtesortierung, Magnetscheidung, Elektroscheidung, Flotation, Klauben, Sortierung nach verschiedenen mechanischen und nach thermischen Eigenschaften. 4. Auflage, Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.

Schubert, H. (1989): Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. 1: Kennzeichnung von

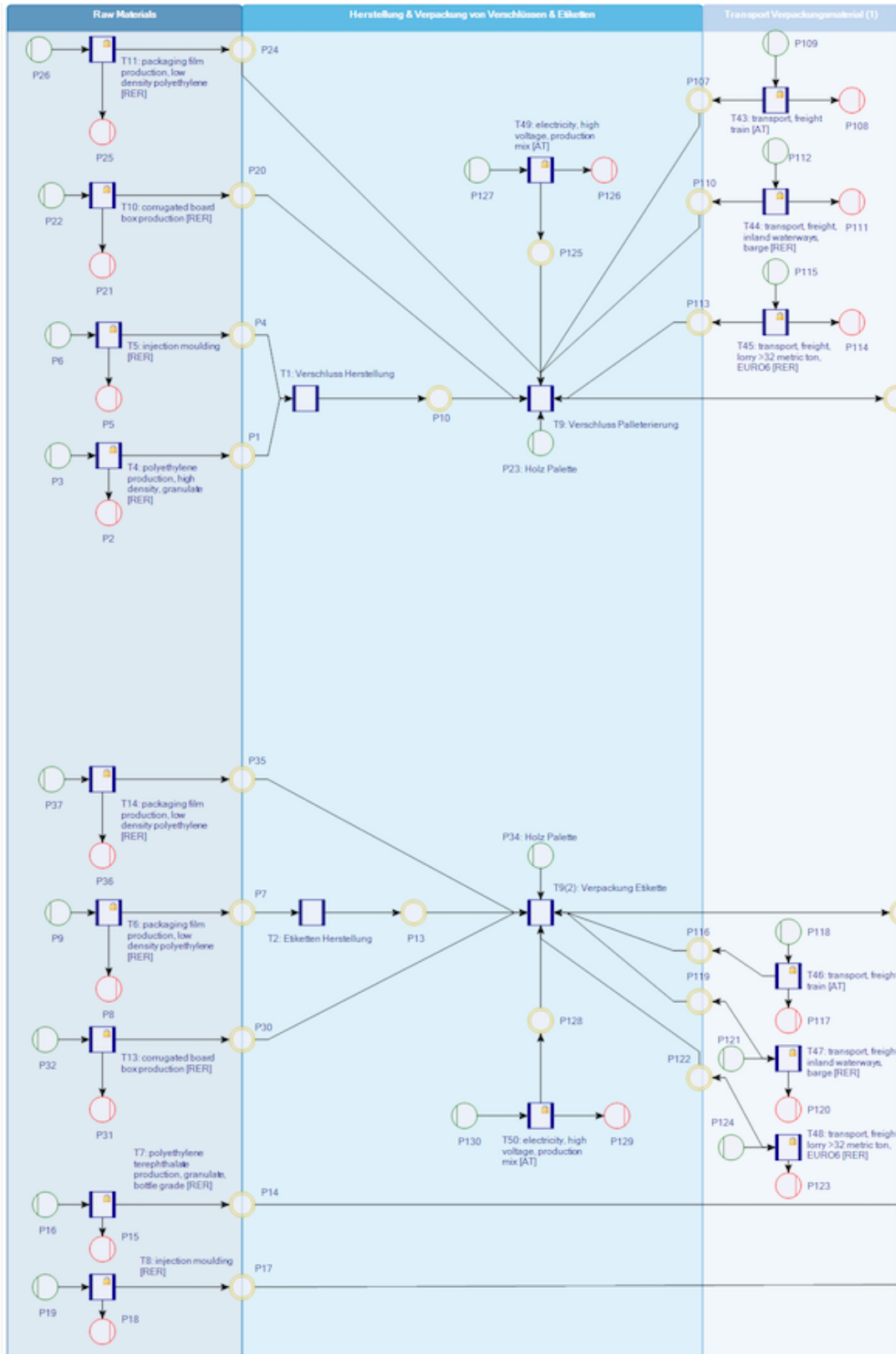
- Körnerkollektiven, Kennzeichnung von Aufbereitungs- und Trennerfolg, Zerkleinerung, Klassierung. 4., stark überarb. Aufl, Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie. ISBN 978-3-342-00289-5.
- Schubert, H. (2003): Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik. Weinheim: WILEY-VCH. ISBN 3-527-30577-7.
- Siegele, C. (2018): Auf ein Glas. In: Keramische Zeitschrift. Jg., , Nr. 4/2018, S. 2.
- Stadt Wien -MA 48 -Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark (2019): Bau keinen Mist. Das Wiener Mist ABC, URL: www.abfall.wien.at (Zugriff: 12.02.2021).
- Stadt Wien -MA 48 -Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark (o.D.): Mythen der Müllentsorgung. URL: <https://www.wien.gv.at/umwelt/ma48/beratung/muelltrennung/mythen-muellentsorgung.html> (Zugriff: 15.03.2021).
- Statista (2011): Entfernung der Einkaufsstätte für den Lebensmitteleinkauf 2011. Statista. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/214885/umfrage/entfernung-der-einkaufsstaeette-fuer-den-lebensmitteleinkauf/> (Zugriff: 06.03.2021).
- Statista (2019): Österreich - Häufigkeit von Einkäufen des täglichen Bedarfs 2019. Statista. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/283574/umfrage/durchschnittliche-anzahl-der-einkaeufe-von-fmcg-in-oesterreich/> (Zugriff: 06.03.2021).
- Umwelt Bundesamt (2020): Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen.pdf, Umwelt Bundesamt. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid->
- Umweltbundesamt (2017): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2017., S. 216.
- Van Eygen, E.; Fellner, J. (2020): Nutzen und Kosten eines verstärkten Recyclings von Kunststoffverpackungen. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Jg. 72, Nr. 1–2, S. 38–46.
- Van Eygen, E.; Laner, D.; Fellner, J. (2018): Circular economy of plastic packaging: Current practice and perspectives in Austria. In: Waste Management, Jg. 72, S. 55–64.
- Verpackungsverordnung, §3, 1. (2014): Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen und bestimmten Warenresten. Österreich. 2014.
- Weckglaeser (o.D.): Gläser und Flaschen - Weck Gläser Bestellen | WECK Gläser. URL: https://www.weckglaeser.com/shop/?gclid=EAIaIQobChMIzp-A8vba7wIVpWLMCh283QKgEAAAYASAAEgIj1vD_BwE (Zugriff: 31.03.2021).
- Wenk, G. (2009): Faltenbildung bei der Nassetikettierung von Getränkeflaschen aus Glas. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Wilke, S. (2013): Glas und Altglas. Umweltbundesamt. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehelter-abfallarten/glas-altglas> (Zugriff: 30.03.2021).
- Woidasky, J.; Moesslein, J.; Wendler, P.; Kirchenbauer, D.; Wacker, D.; Gao, G.; Lang-Koetz, C. (2020): Kunststoffidentifikation und -sortierung in der Circular Economy durch Fluoreszenzmarker. In: Chemie Ingenieur Technik, Jg. 92, Nr. 4, S. 441–451.
- WWF (2021): Bioplastik. URL: <https://www.wwf.de/themenprojekte/landwirtschaft/bioenergie/bioplastik> (Zugriff: 04.04.2021).

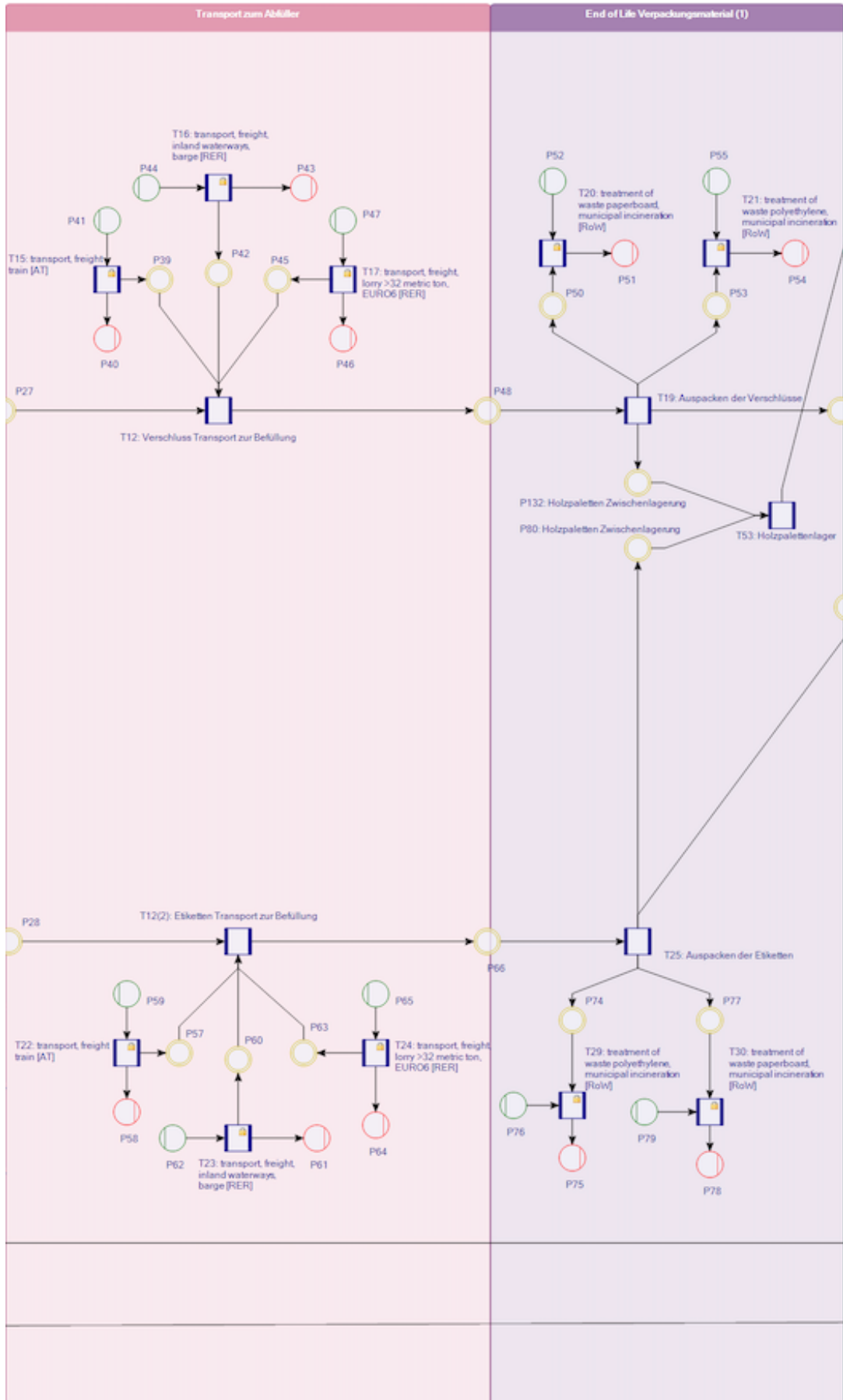
Wöhrle, D. (2019): Kunststoffe: Wichtige Werkstoffe unserer Zeit. In: Chemie in unserer Zeit, Jg. 53, Nr. 1, S. 50–64.

Zentrum Ressourcen Effizienz Ökobilanz - DIN EN ISO 14040/44,.

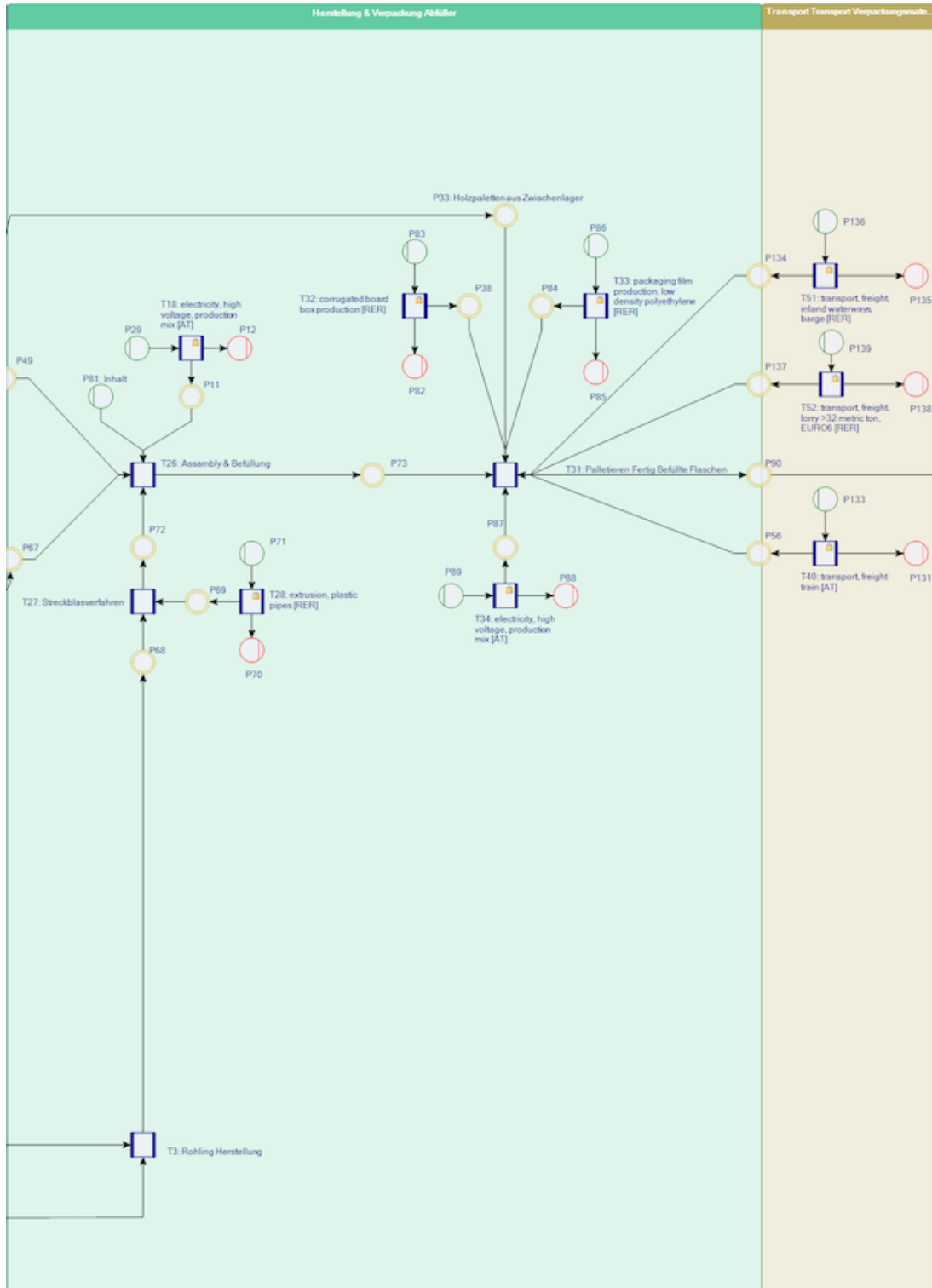
Österreichs digitales Amt (2020): Allgemeines zur Müllvermeidung und Mülltrennung (SDG).
oesterreich.gv.at - Österreichs digitales Amt. URL:
https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/abfall/Seite.3790051.html
(Zugriff: 15.03.2021).

Anhang 1: erweitertes PET-Flaschenmodell

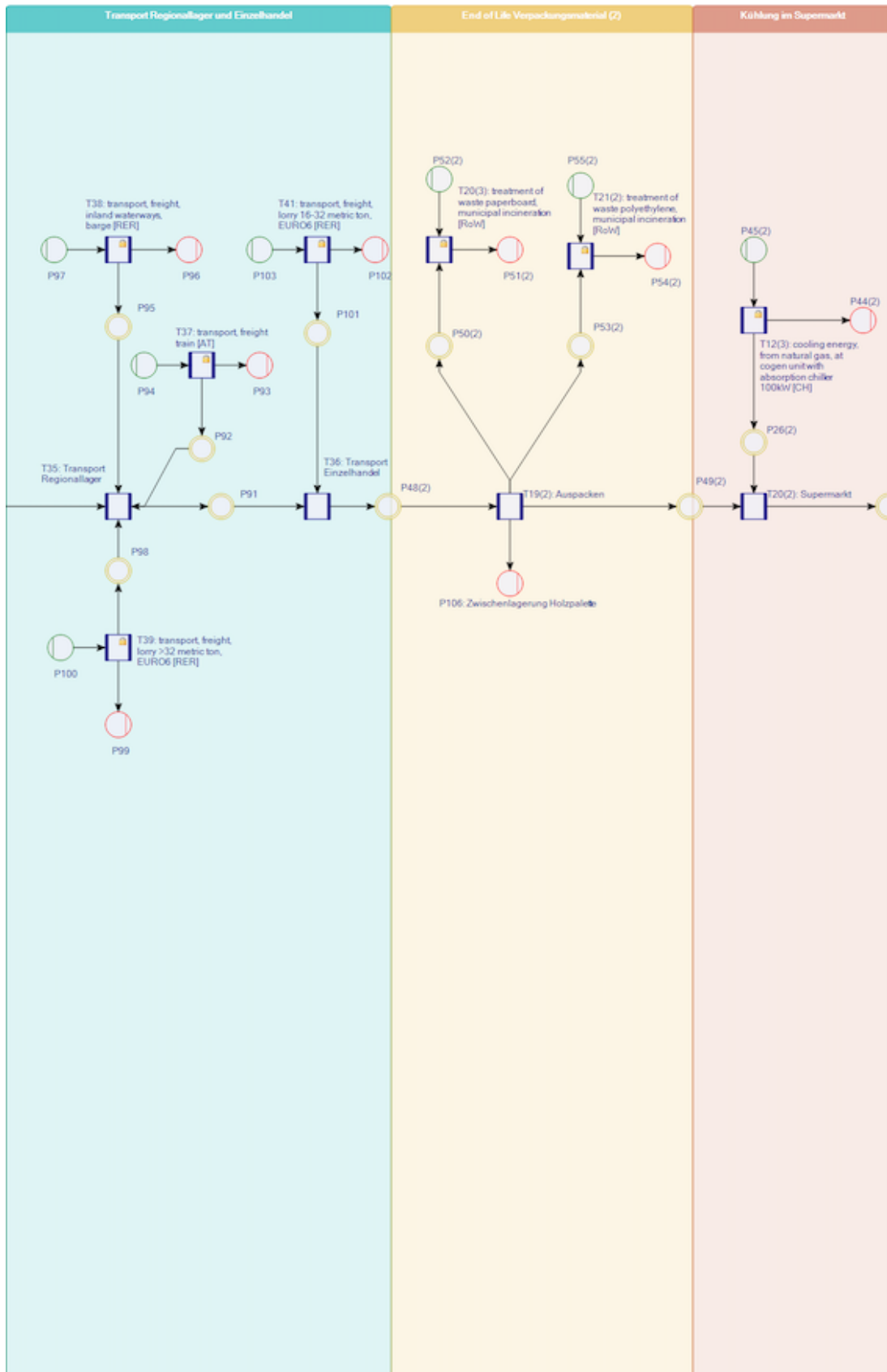




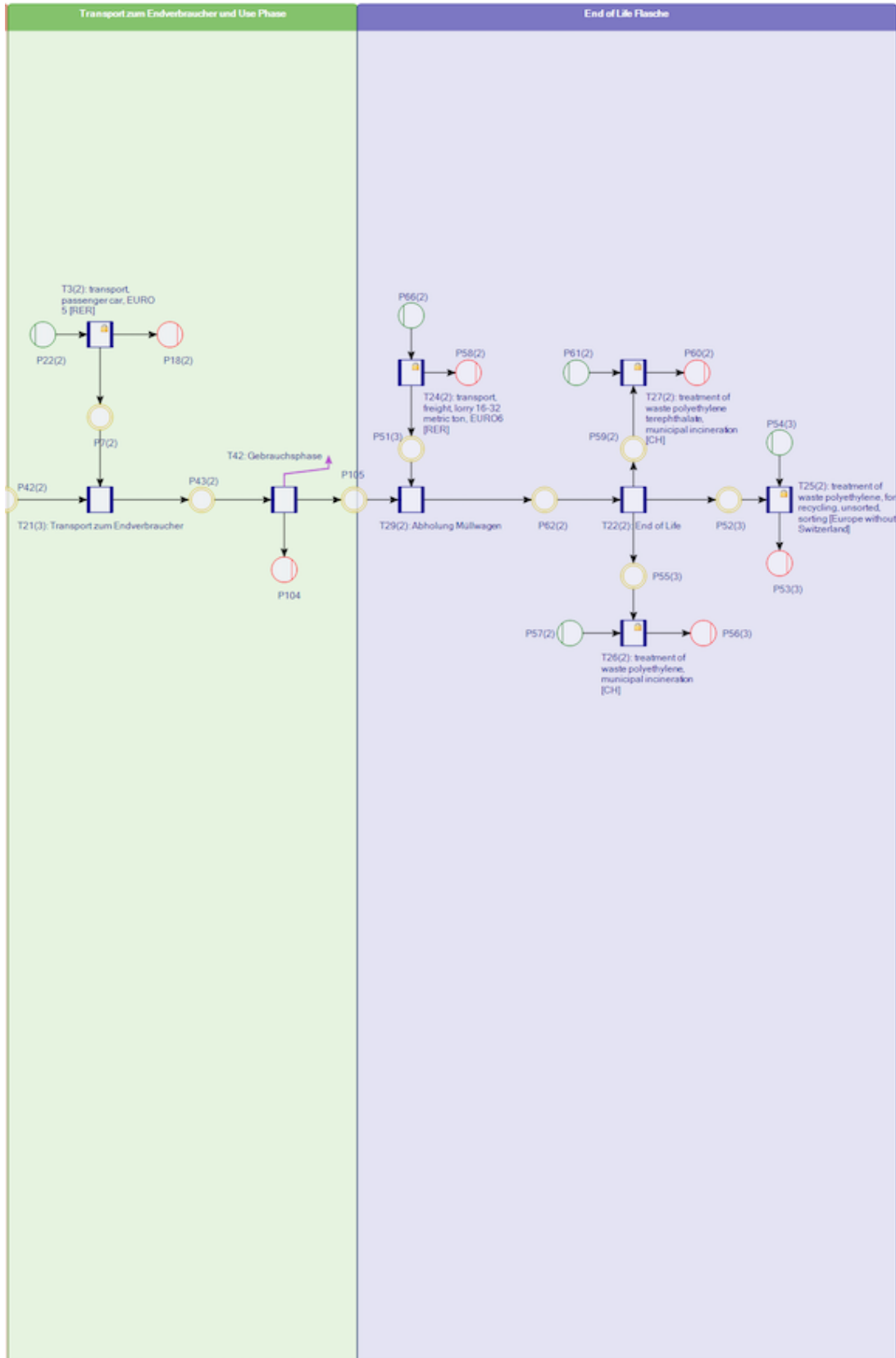
Anhang 1: erweitertes PET-Flaschenmodell



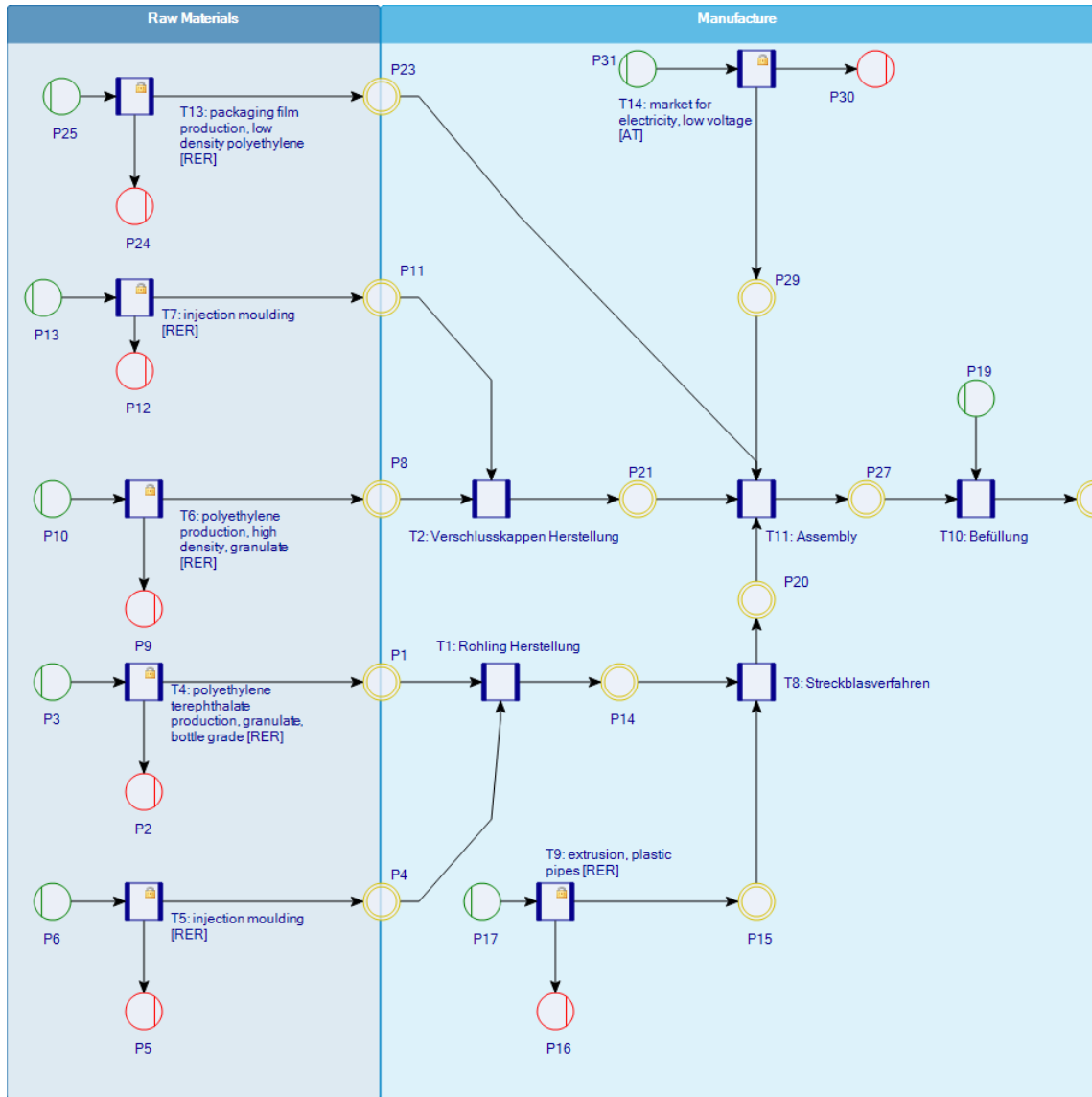
Anhang 1: erweitertes PET-Flaschenmodell

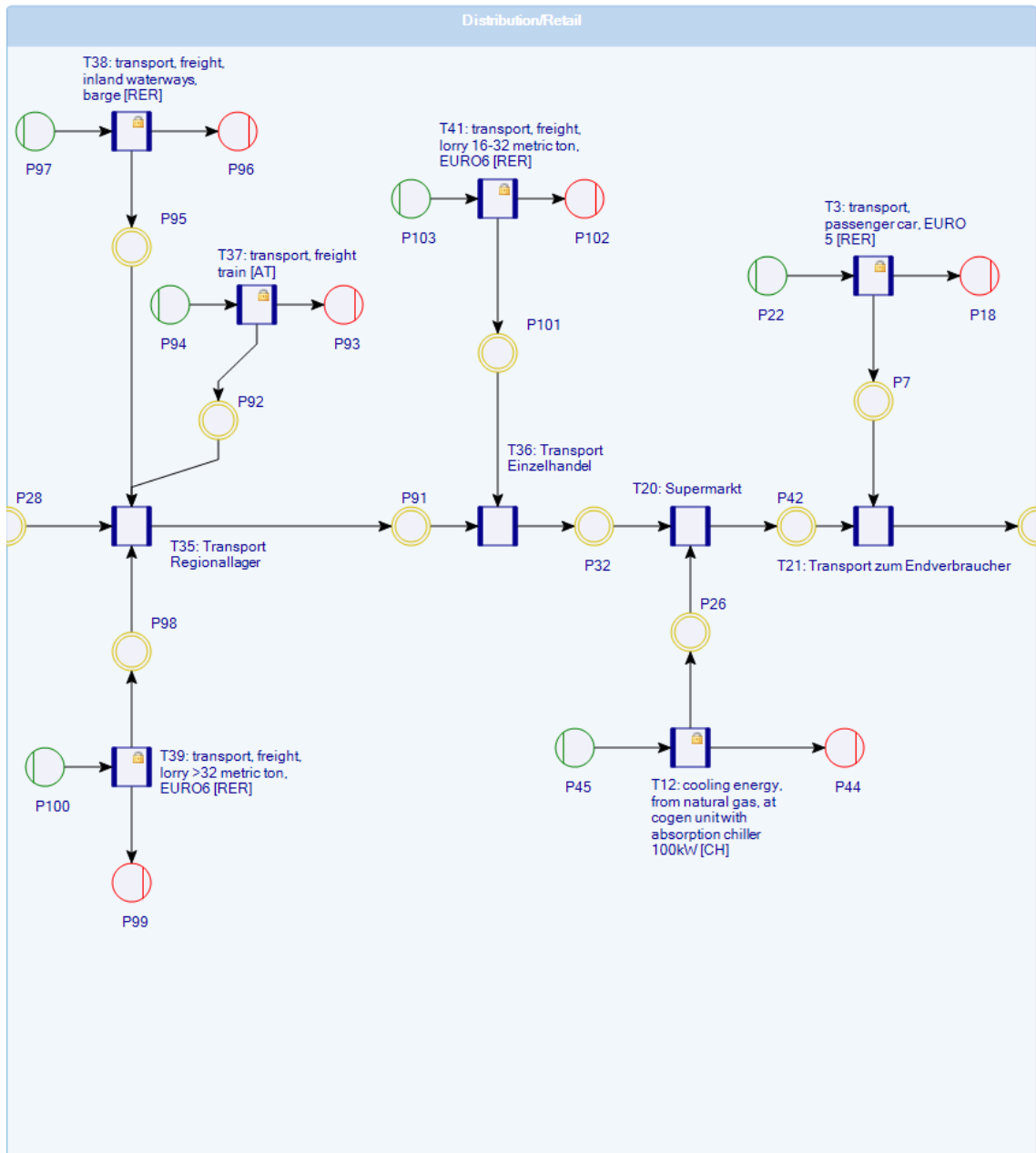


Anhang 1: erweitertes PET-Flaschenmodell

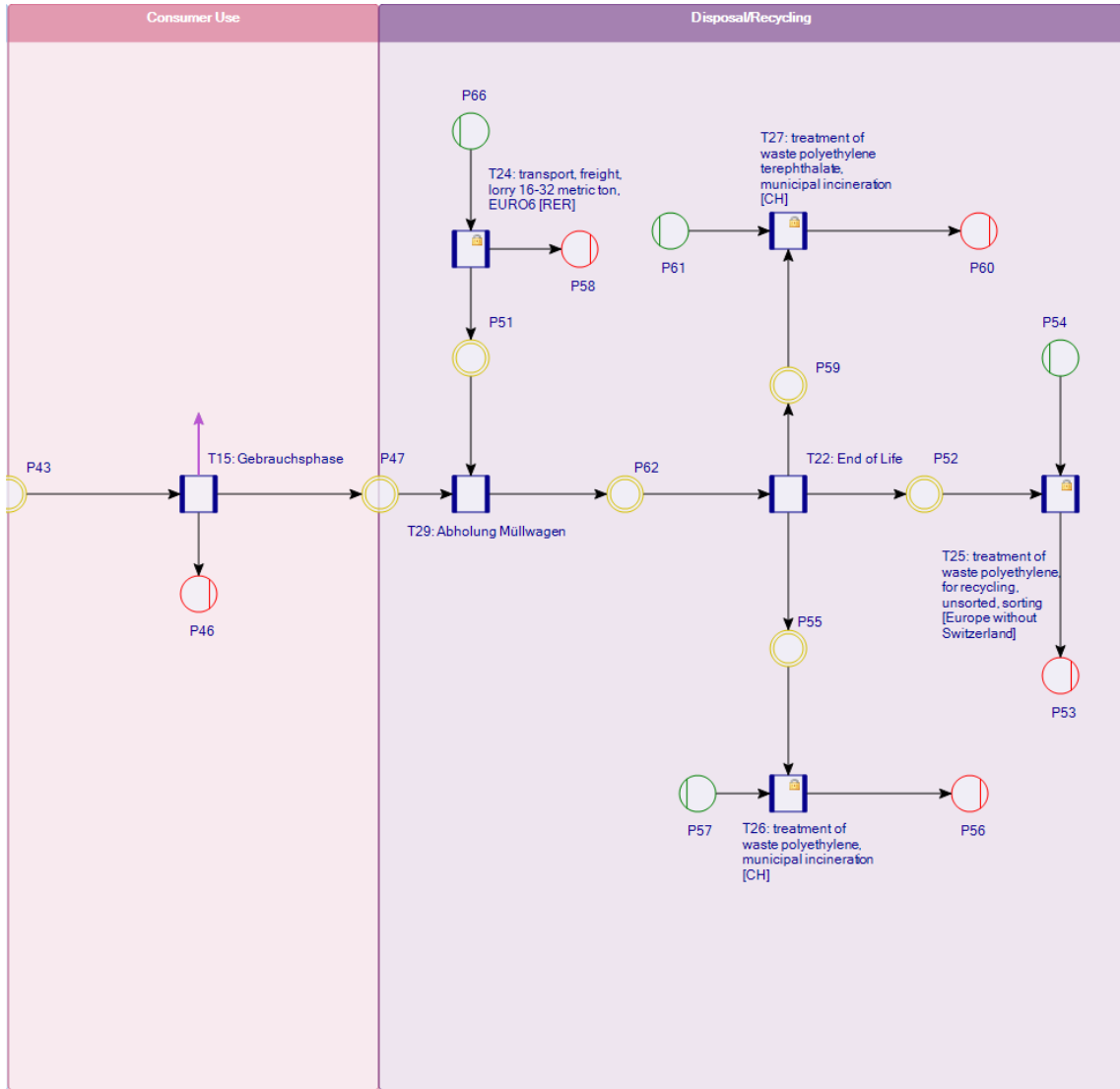


Anhang 2: Standardmodell PET-Flasche





Anhang 2: Standardmodell PET-Flasche



Anhang 3: Standardmodell Glasflasche

