

**Fachbereich Ingenieurwissenschaften
Studiengang Umwelttechnik**

BACHELORARBEIT

**Perspektiven und Hemmnisse des Recyclings von
Kunststoffverpackungen aus dem
Leichtverpackungsabfall**

Name: Adrian Timo Turuc
Matrikelnummer: 1074786
Referentin: Prof. Dr. Ursula Katharina Deister
Korreferent: Dipl.- Ing. (FH) Volker Kummer

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Versicherung	iv
Danksagung	v
Vorwort	vi
Verzeichnisse	vii
Abkürzungsverzeichnis	vii
Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	x
Zusammenfassung.....	xi
Abstract	xii
1 Einleitung und Motivation.....	1
1.1 Problemstellung.....	3
1.2 Aufbau der Arbeit.....	3
2 Aktuelle Situation und Hintergrund.....	4
2.1 Kunststoff als Verpackung	5
2.2 Mengenaufkommen von Kunststoffabfällen	6
2.2.1 Erfassung und Stoffflüsse	8
2.2.2 Recycling von Kunststoffabfällen aus dem Leichtverpackungsabfall.....	11
3 Rechtliche Grundlagen	12
3.1 EU-weite Regelungen.....	12
3.2 Nationale Regelungen in Deutschland.....	14
4 Aktuell praktizierte Recyclingverfahren	18
4.1 Derzeitige Ermittlung der Recyclingfähigkeit einer Kunststoffverpackung	19
4.2 Voraussetzungen für einen hochwertigen Recyclingprozess	19
4.3 Methoden des Kunststoffrecyclings aus Leichtverpackungen	20
4.3.1 Werkstoffliche Verwertung	20
4.3.2 Energetische Verwertung.....	21
4.4 Sammlung	22
4.5 Sortierung von Kunststoffabfällen	22
4.5.1 Manuelle Sortierung.....	22
4.5.2 Automatische Sortierung	23
4.5.3 Sortierung in der Praxis	26

4.6	Aufbereitung und Granulierung von Kunststoffverpackungen	27
4.7	Rezyklat-Einsatz.....	30
4.8	Recyclinganlagen in Deutschland	31
5	Hemmnisse eines hochwertigen Recyclings	33
5.1	Hemmnisse einer hochwertigen Sortierung	33
5.1.1	Verbundmaterialien.....	34
5.1.2	Schwarze Materialien und bedruckte Kunststoffe	35
5.1.3	Bänderolen	36
5.1.4	Fehlerhaftes Entsorgungs- und Trennverhalten	36
5.2	Verunreinigungen	37
5.3	Degradation von Kunststoffen.....	38
5.3.1	Mechanische Degradation	39
5.3.2	Chemische Degradation	39
5.3.3	Methoden der Detektion von Degradationsprozessen.....	41
5.3.4	Degradation und Stabilisation von Regranulaten	41
5.3.5	Weitere Herausforderungen des Kunststoffrecyclings.....	43
6	Forschung und Best Practice Beispiele zum Kunststoffrecycling	44
6.1	Neue Verfahrensansätze für Sortieranlagen	44
6.2	Weiterentwicklung von Kunststoffverpackungen	45
6.2.1	Projekt MaReK	45
6.2.2	Projekt Holy Grail 2.0.....	46
6.2.3	Vollständig recycelbare Verpackung.....	46
6.2.4	Rußfreies Masterbach	47
6.2.5	Einstoff-Tiefziehverpackungen.....	48
6.2.6	Kosmetikverpackung aus 100 Prozent Post-Consumer Rezyklat.....	48
6.2.7	Kunststoff-Regranulate mit spezifischen Eigenschaften.....	49
6.3	Initiativen und Forschungsprojekte	49
6.3.1	Hamburgs Wertstoff Innovative.....	49
6.3.2	Rezyklat Initiative.....	49
7	Diskussion und Vorschläge zur Optimierung des Recyclingprozesses.....	50
7.1	Optimierungsvorschläge zur rechtlichen Situation	50
7.2	Erfassung und Sortierung	52
7.3	Hemmnisse und Steigerungspotenziale des Rezyklat-Einsatzes	54
7.4	Design-for-Recycling	56

7.5	Zukünftige Probleme.....	58
8	Fazit	59
8.1	Optimierungspotenzial hinsichtlich rechtlicher Regelungen.....	59
8.2	Optimierungspotenzial der Entsorger.....	60
8.3	Optimierungspotenzial der Hersteller von Kunststoffleichtverpackungen	61
8.4	Optimierungspotenzial der Bürger	61
Glossar	62
Literaturverzeichnis	xiii
Anhang	xxix
Zusammenfassungen der geführten Interviews.....		xxix
Interview mit Herrn Glaz (Werner und Mertz GmbH) vom 30.11.2020		xxix
Interview mit Herrn Götz (Meilo GmbH) vom 16.11.2020.....		xxx
Interview mit Herrn Thor (systec plastics Eisfeld GmbH) vom 02.12.2020		xxxi
Interview mit Herrn Schneider (systec plastics Eisfeld GmbH) vom 02.12.2020		xxxi
Degradation ausgewählter Polymere während des Recyclingprozesses.....		xxxii
Degradation von PET während des Aufbereitungsprozesses		xxxii
Degradationserscheinungen von PP		xxxiv
Degradationserscheinungen von PE-LD.....		xxxv
Degradationserscheinungen von PE-HD		xxxvi



Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Texte, Gedankengänge, Konzepte usw. in meinen Ausführungen habe ich als solche eindeutig gekennzeichnet und mit vollständigen Verweisen auf die jeweilige Urheberschaft und Quelle versehen.

Alle weiteren Inhalte wie Textteile, Abbildungen, Tabellen etc. ohne entsprechende Verweise stammen im urheberrechtlichen Sinn von mir.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mir ist bekannt, dass ein Täuschungsversuch vorliegt, wenn sich eine der vorstehenden Versicherungen als unrichtig erweist.

Wiesbaden, 11.02.2021 A. I. - c

Ort, Datum und Unterschrift Verfasser

Danksagung

Auf dieser Seite möchte ich den Personen danken, die auf unterschiedliche Art und Weise zum Gelingen dieser Bachelorarbeit beigetragen haben.

Ich möchte Frau Prof. Dr. Ursula Katharina Deister für die konstruktive Kritik, die Beratung bei der Erstellung dieser Arbeit und besonders für ihre Bereitschaft danken, diese Bachelorarbeit zu ermöglichen.

Herrn Dipl.-Ing. (FH) Volker Kummer möchte ich für die Bereitschaft zur Übernahme des Koreferates und für die produktive sowie tatkräftige Unterstützung danken. Die vielen hilfreichen Anregungen und Diskussionen haben die Erstellung dieser Bachelorarbeit vorangetrieben.

Ein besonderer Dank gilt meiner Freundin, deren kritische Anregungen sich sehr positiv auf die Ausgestaltung der Arbeit ausgewirkt haben.

Danke an meine Familie und Freunde für die aufgewendete Zeit zur kritischen Durchsicht.

Vorwort

Im Rahmen eines gemeinsamen Projektes der Hochschule RheinMain mit dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) sollen Hemmnisse des Recyclings von Kunststoffleichtverpackungen aus dem Leichtverpackungsabfall ermittelt und Lösungsansätze zur Verbesserung der Situation gegeben werden. Das Thema der Bachelorarbeit lautet „Perspektiven und Hemmnisse des Recyclings von Kunststoffverpackungen aus dem Leichtverpackungsabfall“.

Die Aufgabenstellung wurde in einem 3-monatigem Zeitrahmen vom 16.11.2020 bis 16.02.2021 bearbeitet.

Verzeichnisse

Abkürzungsverzeichnis

AI	artificial intelligence (künstliche Intelligenz)
EU	Europäische Union
EU-Verpack-RL	Europäische Verpackungsrichtlinie
FTIR-Spektrometer	Fourier-Transform-Infrarotspektrometer
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kt	Kilotonne
LED	Licht emittierende Diode
LVP	Leichtverpackungen
MFR	melt mass flow rate (Schmelzmassendurchsatz)
Mio.	Millionen
MIR	mittlerer infrarot Bereich
NE	Nichteisen
NIR	Nahinfrarot
PE	Polyethylen
PE-HD	Polyethylen High-Density
PE-LD	Polyethylen Low-Density
PET	Polyethylenterephthalat
PO-Flex	Mischkunststoffe
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
UV	Ultraviolett
VerpackG	Verpackungsgesetz
VerpackV	Verpackungsverordnung
Verpack-RL	Verpackungsrichtlinie

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteile der Branchen an der Verarbeitungsmenge von Kunststoffen 2019	2
Abbildung 2: Stoffstrom der Kunststoffe aus dem LVP Abfall.....	4
Abbildung 3: Zusammensetzung des Abfalls einer Wertstofftonne in Hamburg	7
Abbildung 4: Entwicklung der Kunststoffabfallmenge bezogen auf die Anfallstelle zwischen 1994 und 2019	7
Abbildung 5: Vorläufige Marktanteile der Betreiber von Dualen Systemen im 4. Quartal 2020	9
Abbildung 6: Entwicklung der Verwertungsquoten von Kunststoffverpackungsabfällen	10
Abbildung 7: Entsorgungswege von Kunststoffverpackungen (energetische Verwertung inklusive Restmüllpfad).....	11
Abbildung 8: Verwertungskreisläufe	18
Abbildung 9: Farbsortierung von PE-HD Flakes über fünf Rutschen.....	24
Abbildung 10: Schematische Funktionsdarstellung eines Wirbelstromabscheiders, Fraktion A: Material mit geringer Leitfähigkeit, Fraktion B: NE-Metalle mit hoher Leitfähigkeit	25
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Herstellung von Kunststoffregranulaten	28
Abbildung 12: Verfahrensschritte der Sortierung und Regranulierung von Kunststoffen aus dem LVP-Abfall.....	29
Abbildung 13: Verarbeitung von Kunststoff Rezyklaten nach Branchen im Jahr 2019	30
Abbildung 14: Vergleich der Kunststoffverarbeitungsmengen in Deutschland zwischen den Jahren 2017 und 2019.....	31
Abbildung 15: Standorte der größten LVP-Sortieranlagen in Deutschland.....	32
Abbildung 16: Nicht-recyclbare Kunststofffraktionen des LVP Abfalls.....	33
Abbildung 17: Verbundverpackung mit Aluminiumanteilen	35
Abbildung 18: Verschattung durch Kunststoffbänderolen. Links: Produktumhüllende Kunststoffbänderole mit schwarzer Innenfärbung. Rechts: Fast vollständige Oberflächenverschattung durch die Bänderole.....	36
Abbildung 19: Kunststoffverpackung mit Aluminiumdeckel in der Aluminiumfraktion	37
Abbildung 20: Entwicklung des Rohölpreises (2012 bis 2019).....	43
Abbildung 21: Das digitale Wasserzeichen ist von geeigneten Scannern identifizierbar	46
Abbildung 22: Vollständig recycelbarer Standbeutel von Werner und Mertz	47
Abbildung 23: Von NIR-Spektrometern identifizierbare schwarz gefärbte Kunststoffverpackungen	48
Abbildung 24: Gewichtgemittelt Molekulargewicht und ausgewählte mechanische Eigenschaften von Roh-PET und wiederaufbereitetem PET in Abhängigkeit der Anzahl der Wiederaufbereitungsschritte.....	xxxiii

Abbildung 25: Gewichtgemittelttes Molekulargewicht und Schlagfestigkeit von Roh-
PET/wiederaufbereitete PET- Mischungen während des ersten
Extrusionsprozessesxxxiii

Abbildung 26: MFR und Halbwertszeiten der Kristallisation in Abhängigkeit zu den
Wiederaufbereitungszyklenxxxiv

Abbildung 27: Komplexe Viskosität und MFR von PE-LD über 100 Extrusionsschritte xxxv

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eingesetzte Polymere bei Leichtverpackungen aus Kunststoffen.....	5
Tabelle 2: Anzahl der notwendigen Wiederverwendungen verschiedener Taschen, um das Treibhauspotenzial einer PE-HD Tasche zu unterschreiten	6
Tabelle 3: Zielvorgaben von Verpackungsabfällen nach Artikel 6 Abs. 1 Buchstabe f) bis i) EU-Verpack-RL	13
Tabelle 4: Verwertungsquoten der Dualen Systeme nach § 16 Absatz 2 VerpackG	17
Tabelle 5: Dichtebereiche ausgewählter Polymere	26

Zusammenfassung

Die Hauptursache für eine Verdreifachung der Kunststoffabfallfraktion zwischen den Jahren 2000 und 2016 sind Leichtverpackungen aus Kunststoff. In Verbindung mit einem steigenden Verbrauch fossiler Rohstoffe sowie den damit einhergehenden negativen Umweltauswirkungen besteht ein starkes Interesse am Recycling von Kunststoffleichtverpackungen. Da diese überwiegend aus Thermoplasten bestehen, ist das werkstoffliche Recycling die zu bevorzugende Recyclingmethode. Trotz einer Erfassungsquote von über 99 Prozent werden nur 42,1 Prozent (2018) der Leichtverpackungen aus Kunststoff werkstofflich recycelt. Die durch das Verpackungsgesetz vorgeschriebene Recyclingquote von 59 Prozent für Kunststoffverpackungen bis zum Jahr 2019 wurde nicht erreicht.

Die teilweise unter 50 Prozent liegende Sortierquote lässt darauf schließen, dass das technische Potenzial zur Sortierung des LVP-Abfalls noch besser in der Fläche genutzt werden muss, um eine Erhöhung dieser Quote zu erzielen. Gesetzliche Rahmenbedingungen können über eine Rezyklat-Einsatzquote langfristig Investitionssicherheiten für sortierende und recycelnde Unternehmen schaffen. In der Folge können Investitionen bezüglich fehlender verfügbarer Techniken getätigt werden. Durch eine verstärkte Zusammenarbeit und der Bereitschaft Informationen und Daten über neue Forschungsentwicklungen innerhalb der Recyclingbranche auszutauschen, kann ein einheitlicher Stand der Technik erreicht und effizientere Verfahren entwickelt werden.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt, der die Recyclingquote verbessern kann, ist ein recyclinggerechtes Design der Verpackungen. Verbundverpackungen, schwarz eingefärbte und mit großflächigen Banderolen versehene Verpackungen werden überwiegend einer falschen oder keiner Stofffraktion im Sortierprozess zugeordnet. Diese werden als Sortierrest einer energetischen Verwertung zugeführt und gehen dem Stoffkreislauf verloren. Eine Anpassung der Bemessung von Lizenzgebühren anhand der Recyclingfähigkeit von Verpackungen würde für Produzenten einen Anreiz darstellen, die von ihnen in Verkehr gebrachten Verpackungen stärker nach dem Design-for-Recycling-Konzept zu konzipieren. Einige Firmen haben im Rahmen von Selbstverpflichtungen und Kooperationen mit sortierenden Unternehmen erste Verpackungen entwickelt, die eine hohe Recyclingfähigkeit aufweisen und als Best-Practice-Beispiel dienen.

Neben dem Verpackungsdesign und der Sortiertechnik hat die Bevölkerung über ihr Trenn- und Entsorgungsverhalten einen deutlichen Einfluss auf die Sortierquote. Der Ausbau der Öffentlichkeitsarbeit bezüglich des Kunststoffrecyclings kann zu Bewusstseinsänderungen, besserem Trennverhalten und damit zu besseren Sortierqualitäten führen. Entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften bzw. die Kommunen können über die Wahl des Erfassungssystems ebenfalls zur Erhöhung der Sortierquote beitragen.

Abstract

The main cause of a tripling of the plastic waste fraction between the years 2000 and 2016 is light plastic packaging. In the context of increasing consumption of fossil raw materials as well as the associated negative environmental impacts, there is a strong interest in recycling lightweight plastic packaging. As they are predominantly made of thermoplastics, mechanical recycling is the preferred recovery method. Despite a collection rate of over 99 per cent, only 42.1 per cent (2018) of lightweight plastic packaging is recycled. The recycling rate of 59 per cent for plastic packaging by 2019 prescribed in the Packaging Act was not achieved.

The sorting rate, which in some cases is below 50 per cent, suggests that the technical potential for sorting LVP waste on a large scale must be better utilised to achieve an increase in this rate. Legal framework conditions can create long-term investment security for sorting and recycling companies through a recycle input quota. As a result, investments can be made regarding the lack of available technologies. Through increased cooperation and the willingness to exchange information and data on new research developments within the recycling industry, a uniform state of the art can be achieved and more efficient processes developed.

Another important aspect that can improve recycling rates is recycling-friendly packaging design. Composite packaging, black coloured packaging and packaging with large banderols are predominantly assigned to an incorrect or no material fraction in the sorting process. These are fed into energy recovery as sorting residues and are removed from the material cycle. An adjustment of the assessment of the licence fees according to the recyclability of the packaging would be an incentive for the manufacturers to design the packaging they put into circulation more according to the design-for-recycling concept. Within the framework of voluntary commitments and cooperation with sorting companies, some companies have developed initial packaging that is highly recyclable and serves as an example of best practice.

In addition to packaging design and sorting technology, the population has a significant influence on the sorting rate through their separation and disposal behaviour. The expansion of public relations work on plastics recycling can lead to changes in awareness, better separation behaviour and thus to better sorting qualities. The municipal waste management authorities and the municipalities can also contribute to increasing the sorting rate through the choice of collection system.

1 Einleitung und Motivation

Kunststoffe sind heutzutage in fast allen Bereichen unseres Lebens zu finden. Neben Kunststoffverpackungen, Fensterrahmen aus PVC oder Plastikspielzeug beinhalten auch viele, vermeintlich kunststofffreie Produkte wie Backpapiere, Putzmittel oder Textilien den Polymerwerkstoff. Das ist darauf zurückzuführen, dass sich bei Kunststoffen während des Produktionsprozesses durch den Einsatz von Additiven fast beliebige Eigenschaften bezüglich Elastizität, Farbe-, Säure- und Korrosionsbeständigkeit sowie Festigkeit einstellen lassen. Im Vergleich zu anderen Materialien wie zum Beispiel Metallen lassen sich Kunststoffe kostengünstiger und in großen Mengen produzieren. In Kombination mit der geringen Dichte der Kunststoffe werden sie vor allem in der Verpackungsbranche verwendet, es folgen die Bauwirtschaft, der Fahrzeugbau, Elektro- und Elektronikprodukte, bis hin zur Landwirtschaft (Hopmann und Michaeli 2017; Obermeier und Lehmann 2019; Allassali et al. 2019).

Im Jahr 2019 wurden in Deutschland rund 5,35 Millionen Tonnen Kunststoffabfall als Post-Consumer Abfall einer Verwertung zugeführt (Conversio Market & Strategy GmbH 2020). Im europäischen Vergleich belegt Deutschland damit einen der vorderen Plätze. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das hohe Aufkommen einerseits der hochwertigen flächendeckenden Erfassung, andererseits auf das hohe Konsum- und Wohlstandsniveau in Deutschland zurückzuführen ist (bvse 2018). Zwischen den Jahren 2000 und 2016 hat sich die Kunststoffabfallfraktion von 23 auf 74 Kilogramm pro Person in Deutschland mehr als verdreifacht (Rudolph et al. 2020). Den größten Marktanteil an der Verarbeitungsmenge von Kunststoff besitzt die Verpackungsindustrie (Abbildung 1) (Conversio Market & Strategy GmbH 2020). Aufgrund der geringen Nutzungsdauer von Kunststoffverpackungen besitzen sie einen signifikanten Anteil an der Zunahme des Kunststoffabfallaufkommens.

Im Hinblick auf die Ressourceneffizienz und den Umweltschutz besteht daher ein starkes Interesse am Recycling von Kunststoffen aus dem Verpackungsmittelbereich. Das Recycling von Kunststoffverpackungen führt nicht nur zu einer Reduktion des Eintrags von Begleitchemikalien in die Umwelt, es trägt durch die Substitution fossiler Rohstoffe zur Ressourcenschonung und zu einer Entlastung der Umwelt bei. Das zeigt vor allem die Energiebilanz. Für eine Tonne recycelten Kunststoff werden nur circa 10 Prozent der Energie von Neuwarenproduktion gebraucht (Allassali et al. 2019).

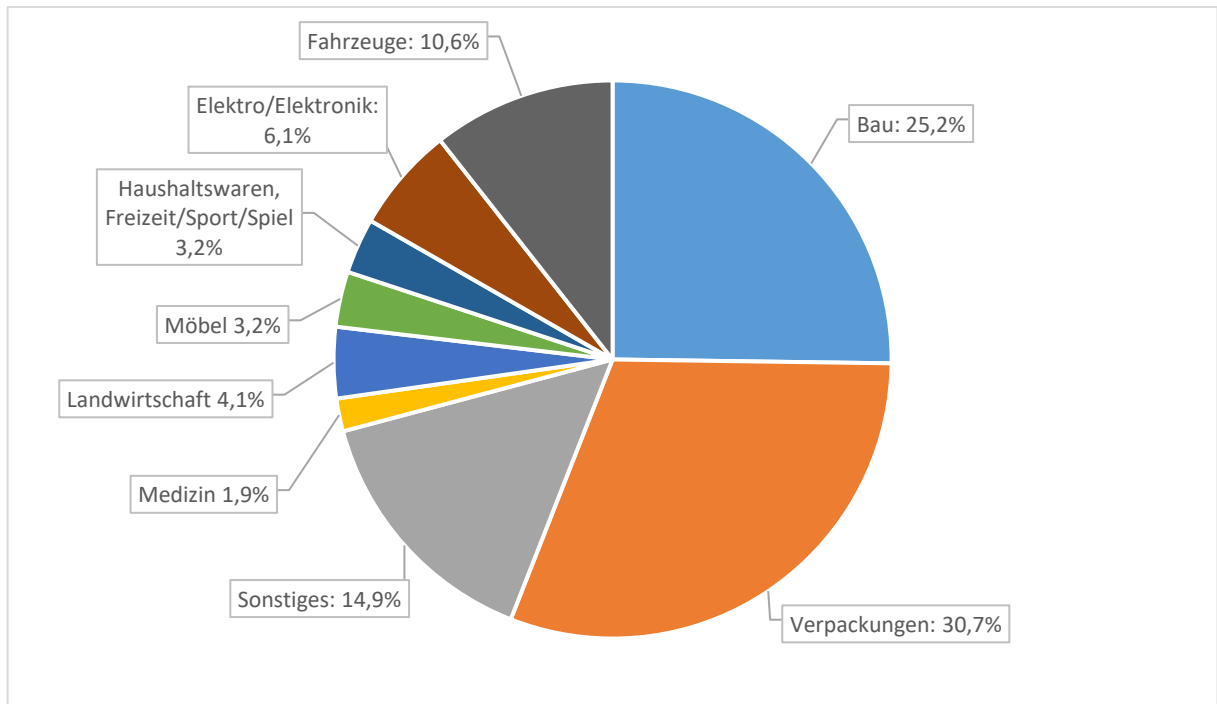


Abbildung 1: Anteile der Branchen an der Verarbeitungsmenge von Kunststoffen 2019 (Conversio Market & Strategy GmbH 2020)

Für die Verwertung von Kunststoffverpackungen existieren mehrere Recyclingmethoden. Die dominierende Recyclingmethode bei Kunststoffverpackungen ist das *werkstoffliche Recycling*. Bei diesem Verfahren werden die Kunststoffverpackungen zerkleinert, nach Kunststoffart sortiert, wiederaufbereitet und zu Regranulaten verarbeitet. Die Regranulate können je nach Produkthanforderung zusammen mit Kunststoffneuwere erneut eingeschmolzen und zu neuen Produkten verarbeitet werden (Cui und Forssberg 2003).

Beim *chemischen Recycling* werden die Kunststoffverpackungen zu chemischen Grundstoffen abgebaut, die in der petrochemischen Industrie wiederverwendet werden können. Diese Recyclingmethode kann bei Kunststoffabfällen angewandt werden, die nicht werkstofflich recycelt werden können (Sasse und Emig 1998). Dazu zählen stark verschmutzte Kunststoffabfälle oder Verbundstoffe, die einen Kunststoffanteil besitzen.

In dieser Bachelorarbeit wird das Recycling von Kunststoffverpackungen aus dem Leichtverpackungsabfall (LVP-Abfall) betrachtet. Dazu werden die Hemmnisse und die Möglichkeiten der Produzenten von Kunststoffverpackungen, der recycelnden Unternehmen, des Gesetzgebers und der Verbraucher diskutiert, um höhere Recyclingquoten und Rezyklat-Einsatzquoten zu erzielen. Der Fokus dieser Bachelorarbeit liegt auf dem werkstofflichen Recycling, da das chemische Recycling aktuell sehr energieintensiv, somit weder ökologisch noch ökonomisch sinnvoll ist und deshalb bei Post-Consumer Abfällen kaum angewandt wird.

1.1 Problemstellung

Der stetig zunehmende Verbrauch von Kunststoffverpackungen hat dazu geführt, dass der Kunststoffanteil im Abfallstrom über die letzten Jahrzehnte konstant anstieg. Die Verwertung der steigenden Kunststoffabfallmengen ist vor allem in Regionen mit starkem Bevölkerungswachstum eine große Herausforderung. Weltweit werden nur circa 9 Prozent des Kunststoffabfalls recycelt. 79 Prozent des globalen Kunststoffabfalls werden deponiert oder gelangen über Littering in die Umwelt. Auch nach der Einfuhrbeschränkung für Feststoffabfälle nach China ist das Potenzial für Recycling von Kunststoffabfällen in Europa bisher größtenteils nicht ausgeschöpft worden (Obermeier und Lehmann 2019).

Trotz einer guten Recyclingfähigkeit von Kunststoffverpackungen aufgrund ihrer thermoplastischen Eigenschaften wurden in Deutschland im Jahr 2018 nur 42,1 Prozent der Kunststoffleichtverpackungsabfälle werkstofflich recycelt (Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) Oktober 2019). Das liegt unter anderem daran, dass nur circa 75 Prozent der angefallenen Kunststoffverpackungsabfälle eine Recyclingfähigkeit aufweisen (IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. 2019). Ein weiterer Grund für die niedrige Recyclingquote ist die technische Ausstattung und die Prozessführung der Sortieranlagen für Leichtverpackungen. Die Integration bereits verfügbarer Technik in Sortieranlagen für Leichtverpackungsabfälle ist eine Möglichkeit, die Recyclingquote zu erhöhen.

Neben der niedrigen Recyclingquote ist die Rezyklat-Einsatzquote von Kunststoff-Rezyklaten in neuen Produkten ebenfalls niedrig. Im Jahr 2017 wurden, gemessen an der Gesamtmenge des verarbeiteten Kunststoffes, 12,3 Prozent Rezyklate eingesetzt. Trotz eines höheren Abfallvolumens aus dem Post-Consumer Bereich werden weniger Rezyklate in diesem Bereich eingesetzt als aus dem Post-Industrial Bereich. Darüber hinaus werden Kunststoff-Rezyklate aus dem Post-Consumer Bereich hauptsächlich zu geringerwertigen Endprodukten (Downcycling) wie Parkbänken oder Rasensteinen verarbeitet (Schneider 02.12.2020). Ein hochwertiges Recycling zu gleichwertigen Produkten findet nur in wenigen Fällen statt.

1.2 Aufbau der Arbeit

Diese Bachelorarbeit ist eine Literaturarbeit, die anhand von Studien, Fachbüchern, Gesetzestexten und Gesprächen mit Spezialisten aus der Verwertungsbranche erarbeitet wurde. Um fachliche Informationen zu erhalten, fanden Begehungen einer Kunststoffsartieranlage in Gernsheim sowie einer Recyclinganlage in Eisfeld statt. In verschiedenen Konferenzen und von Gesprächen mit Branchenvertretern bezüglich des Kunststoffrecyclings wurden der Stand der Technik und aktuelle Problematiken diskutiert.

Es wird erläutert, weshalb sich Kunststoffe als Verpackungsmaterialien eignen und ein Überblick über die Recyclingsituation von Kunststoffabfällen aus dem Jahr 2019 gegeben. Einsatzbeispiele der einzelnen Kunststofffraktionen werden vorgestellt und Gründe für die

konstant steigende Menge von Kunststoffverpackungsabfällen erläutert. Im Anschluss werden rechtliche Grundlagen bezüglich Kunststoffverpackungen und deren Verwertung vorgestellt. In Kapitel 4 wird ein aktuelles Verfahren zum Kunststoffrecycling dargestellt und Hemmnisse eines hochwertigen Recyclings erläutert. Ausgehend davon werden Forschungsprojekte und Best-Practice Beispiele vorgestellt. Anschließend werden Vorschläge zur Optimierung des Kunststoffrecyclings diskutiert, welche den Ausbau der zirkulären Kreislaufwirtschaft ermöglichen.

2 Aktuelle Situation und Hintergrund

Im folgenden Kapitel wird erläutert, weshalb sich Kunststoffleichtverpackungen gut für das Recycling eignen. Es wird ein Überblick über die Verwertungswege und Stoffflüsse von Kunststoffen aus dem Leichtverpackungsabfall gegeben (vgl. Abbildung 2).

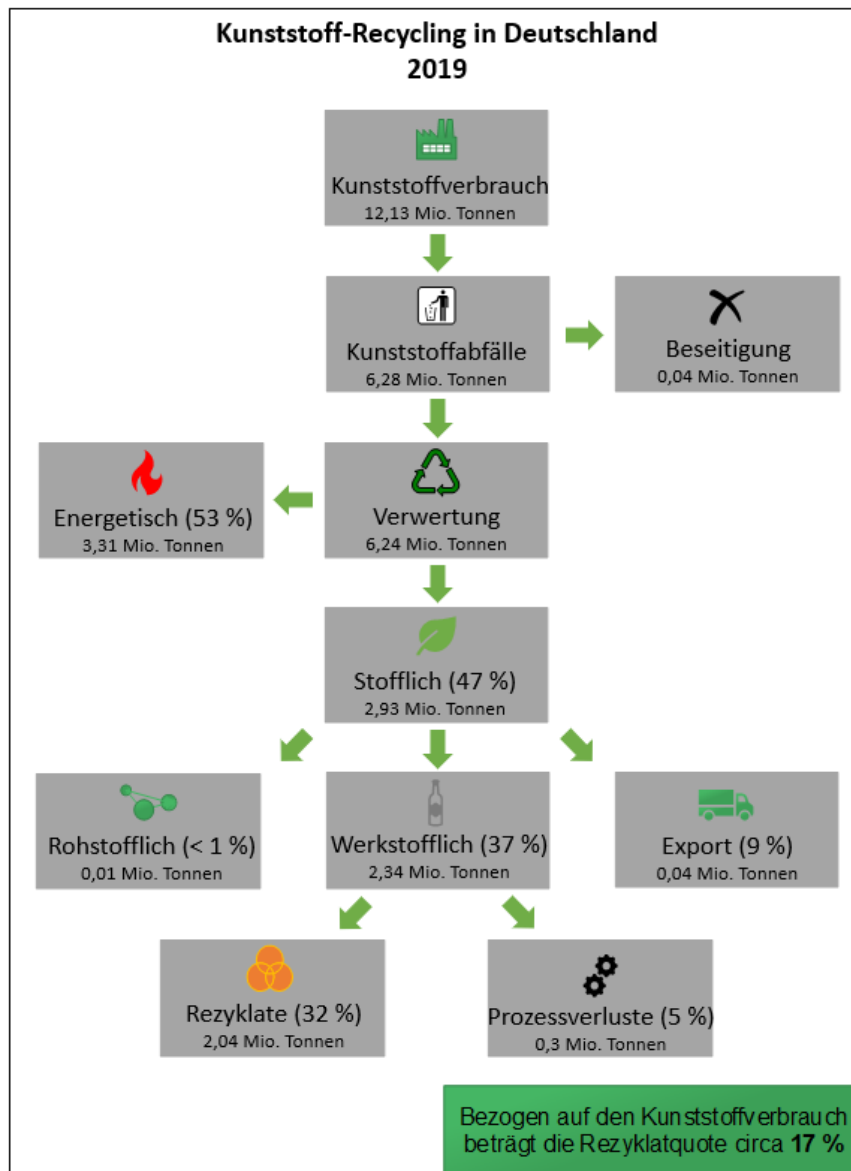


Abbildung 2: Stoffstrom der Kunststoffe aus dem LVP Abfall (Conversio Market & Strategy GmbH 2020)

2.1 Kunststoff als Verpackung

Leichtverpackungen (LVP) bestehen aus Weißblech, Aluminium, Getränkekartons und getrennten Kunststoffarten (Umweltbundesamt 2018). Sie müssen wichtige Aufgaben zum Schutz, zum Transport und zur Lagerung von Konsumgütern erfüllen. Sie sollten Informationen zum Produkt sowie dessen Handhabung liefern und das Produkt gleichzeitig vor äußeren Einflüssen schützen (bvse 2018). Aufgrund niedriger Herstellungskosten in Verbindung mit einem geringen spezifischen Gewicht und vielfältig einstellbaren mechanischen Materialeigenschaften besitzen Kunststoffe eine gute Voraussetzung, um die für Leichtverpackungen geltenden Aufgaben zu erfüllen. Aus umwelttechnischer Sicht reduzieren Kunststoffverpackungen aufgrund des geringen Gewichtes den Kraftstoffverbrauch für den Transport und verringern durch ihre Barriereigenschaften den Anfall von Lebensmittelabfällen (Rudolph et al. 2020; Sartorius 2020).

Leichtverpackungen aus Kunststoffen sind in der Regel Thermoplasten. Thermoplasten besitzen strukturell unvernetzte Polymerketten. Bei Gebrauchstemperatur verhalten sie sich energieelastisch. Werden Thermoplasten erhitzt, erweichen sie ab einer gewissen Temperatur. Der bei der Erwärmung durchlaufene viskose Zustand ist eine Voraussetzung für verschiedene technologische Verarbeitungsverfahren (z.B. Spritzgießen, Gießen, Extrudieren, Schweißen). Diese Eigenschaft ermöglicht ein mehrfaches Umformen der Thermoplasten und bildet die Grundlage für ihr Recycling.

Die häufigsten kunststoffbasierten Leichtverpackungen bestehen aus den Thermoplasten Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyethylenterephthalat (PET), Polyvinylchlorid (PVC) und Polystyrol (PS). In Tabelle 1 sind ausgewählte Polymere und ihre Einsatzgebiete dargestellt.

Tabelle 1: Eingesetzte Polymere bei Leichtverpackungen aus Kunststoffen (Linganiso 2018)

Polymer	Haupteinsatzgebiete	Einsatzbeispiele
Polyethylen Low-Density (PE-LD)	Verpackung	(Müll-)Tüten, gestrichenes Papier, Draht- und Kabelbeschichtung, Spielzeug
Polyethylen High-Density (PE-HD)	Verpackungen	Kanister, Folien, Waschmittelflaschen, Rohre, Kabelisolationen
Polypropylen (PP)	Verpackungen Möbel	Joghurt- und Margarinebecher, Büromöbel, Sirup Flaschen, Maschinen
Polysterol (PS)	Verpackungen	Einwegprodukte, Schaumschalen, Tassen, Schaumisolierungen
Polyethylenterephthalat (PET)	Verpackungen	Getränkeflaschen, Lebensmittelbehälter, Fotofilme

Kunststoffleichtverpackungen haben im Hinblick auf die Materialien, die sie substituieren, viele Vorteile. Dies wird am Beispiel einer Kunststofftasche verdeutlicht. Verschiedene Studien zeigen, dass eine Kunststofftasche über ihren gesamten Lebensweg die meisten ökologischen Vorteile im Vergleich zu einer Papiertragetasche und einer Baumwolltasche besitzt (Hischier 2014; Edwards und Meyhoff Fry 2011; Bisinella et al. 2018). Eine geringere Dichte der Kunststoffe führt neben niedrigeren Transportkosten auch zu geringeren Abgasemissionen. Für eine Stabilitätssteigerung müssen, anders als bei Papiertaschen, keine Chemikalien zugesetzt werden. Während des Herstellungsprozesses wird weniger klimaschädliches CO₂ als beim Herstellungsprozess von Baumwolltaschen ausgestoßen (Hischier 2014). In Tabelle 2 wird die Häufigkeit der nötigen Wiederverwendungen von Tragetaschen aus unterschiedlichen Materialien dargestellt, um das Treibhauspotenzial einer Polyethylen High-Density (PE-HD) Tasche zu unterschreiten (Edwards und Meyhoff Fry 2011).

Tabelle 2: Anzahl der notwendigen Wiederverwendungen verschiedener Taschen, um das Treibhauspotenzial einer PE-HD Tasche zu unterschreiten (Edwards und Meyhoff Fry 2011)

Material der Tasche	PE-HD-Tasche (ohne Wiederverwendung)	PE-HD Tasche (3-mal Wiederverwendet)
Papier	3	9
PE-LD	4	12
Nicht gewebtes PP	11	33
Baumwolle	131	393

Einige Vorteile der Polymere können sich bei unsachgemäßem Umgang negativ auf die Umwelt auswirken. Gelangen Kunststoffe durch Littering in die Umwelt, werden deren Stabilitätseigenschaften zum Problem. Durch die Diffusion der in den Kunststoffen enthaltenen Additive können für Flora und Fauna toxische Substanzen freigesetzt werden (Lucht et al. 2018). Eine flächendeckende Erfassung des Kunststoffabfalls ist daher von großer ökologischer Bedeutung.

2.2 Mengenaufkommen von Kunststoffabfällen

Fast unverändert zum Vorjahr wurden im Jahr 2018 bei den privaten Endverbrauchern in Deutschland pro Einwohner durchschnittlich 68 Kilogramm Verpackungsmüll getrennt vom Restmüll eingesammelt. Leichtverpackungen haben mit circa 30 Kilogramm pro Einwohner den größten Anteil am eingesammelten Verpackungsabfall (Statistisches Bundesamt (Destatis) 03.2020). Der Leichtverpackungsabfall besteht hauptsächlich aus Kunststoffprodukten. Die bei der Anlieferung einer Sortieranlage für Leichtverpackungsabfall größten Fraktionen bilden dabei Folien, gefolgt von Weißblech, PP-Verpackungsmaterial (z.B. Chipstüten), Mischkunststoffen (PO-Flex), PET-Verpackungen und PE-HD Verpackungen. Die

Aktuelle Situation und Hintergrund

Aluminiumfraktion, Flüssigkartonagen und Papier besitzen einen kleineren Anteil am Leichtverpackungsabfall (Götz 16.11.2020). Die Relevanz einer genaueren Betrachtung der (Leicht-)Kunststofffraktion verdeutlicht Kuchta (2019) mit der Abfallzusammensetzung der Hamburger Wertstofftonne (Abbildung 3).

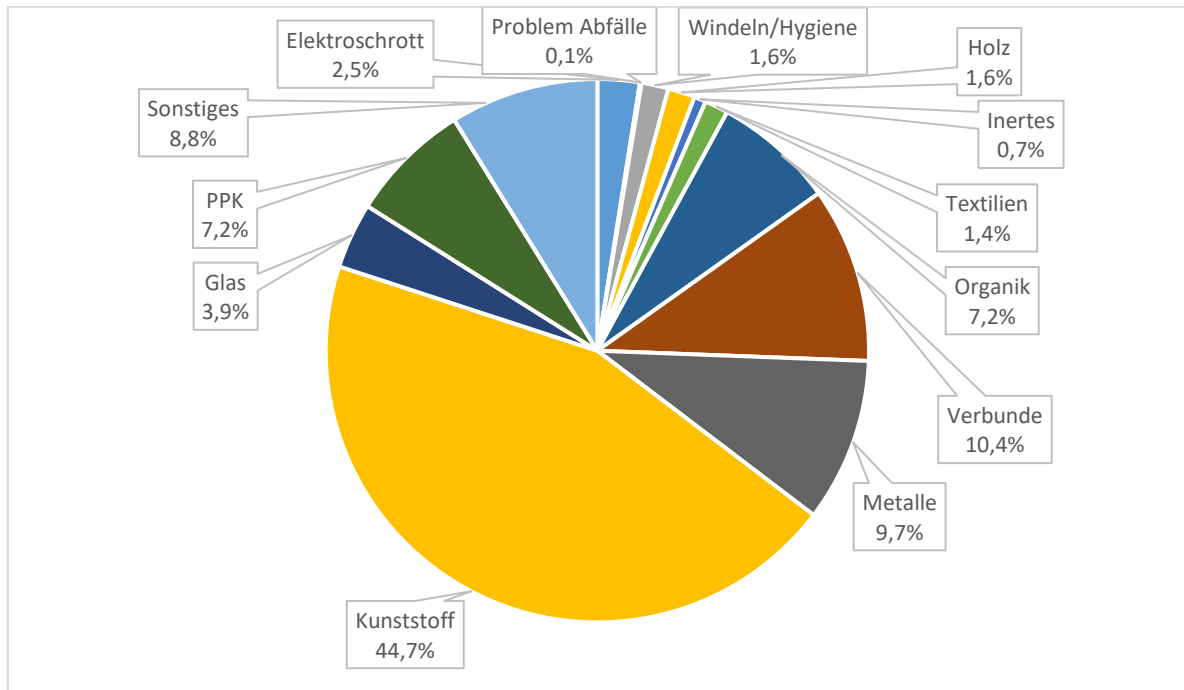


Abbildung 3: Zusammensetzung des Abfalls einer Wertstofftonne in Hamburg (Kuchta 2019)

Aufgrund der vielseitigen Eigenschaften und der günstigen Produktion von Kunststoffen hat der Kunststoffverbrauch in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich zugenommen. Im Jahr 2019 betrug der gesamte Kunststoffverbrauch in Deutschland circa 12,13 Millionen Tonnen (Conversio Market & Strategy GmbH 2020). Daraus ergab sich eine Kunststoffabfallmenge von circa 6,28 Millionen Tonnen für das Jahr 2019 (Abbildung 2/Abbildung 4).

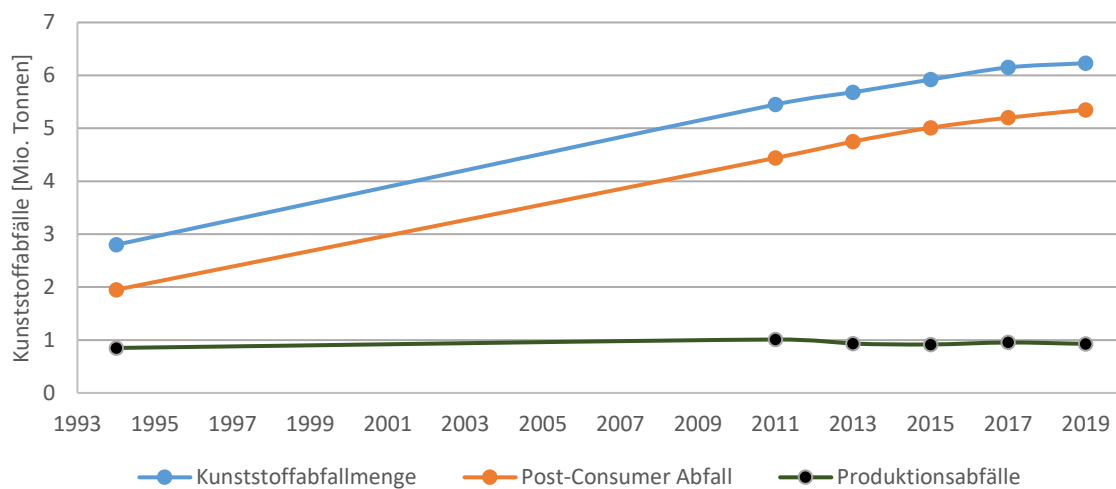


Abbildung 4: Entwicklung der Kunststoffabfallmenge bezogen auf die Anfallstelle zwischen 1994 und 2019 (Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH 2012, 2014, 2016; Conversio Market & Strategy GmbH 2018, 2020)

Die Differenz von 8,2 Millionen Tonnen verarbeiteten Kunststoffen ergibt sich aus langlebigen Produkten, wie Kunststoffrohren oder Fensterrahmen, die erst mehrere Jahre nach der Produktion zu Kunststoffabfällen werden. Ein Vergleich mit der Kunststoffabfallmenge aus dem Post-Industrial Bereich (Produktionsabfälle) zeigt, dass der Anstieg der Gesamtkunststoffabfallmenge aus dem Anstieg der Kunststoffabfallmenge aus dem Post-Consumer Bereich (Abfälle nach Ende der Gebrauchsphase) resultiert (Abbildung 4). Der hohe Anteil der Verpackungsmittelbranche an der Verarbeitungsmenge von Kunststoff (vgl. Abbildung 1) in Verbindung mit der Kurzlebigkeit der Verpackungen ist der wesentliche Grund des steigenden Abfallaufkommens. Zu den wichtigsten Ursachen für die langfristige Zunahme des Verbrauchs von Kunststoffverpackungen gehören die steigende Bedeutung des Onlinehandels, das Bevölkerungs- und Wohlstandswachstum, die Zunahme von Singlehaushalten, der Trend zum Außer-Haus Verzehr und die Zunahme des Verbrauchs von portionierter Einheiten. Gegenläufige Trends wie die Substitution von Kunststoffbehältern durch Aerosoldosen, das abnehmende Einsatzgewicht bei formstabilen Kunststoffverpackungen und leicht abnehmende Flächengewichte der Folien können die langfristige Zunahme des Verbrauchs von Kunststoffverpackungen kaum kompensieren (Schüler 2018). Im Jahr 2012 wurden circa 1 Millionen Tonnen Kunststoffleichtverpackungen von Dualen Systemen verwertet, im Jahr 2017 sind es 1,2 Millionen Tonnen (Schüler 2015, 2019).

Ein steigender Konsum und eine niedrige Lebensdauer der Verpackungsmittel haben zur Folge, dass das Verhältnis von der Kunststoffabfallmenge zu Kunststoffproduktion steigt. Dieser Zusammenhang wird von einer Studie der Conversio Market & Strategy GmbH bestätigt. Im Jahr 2019 wurden 3,22 Millionen Tonnen Kunststoffverpackungen verbraucht, 3,16 Millionen Tonnen werden davon als Abfall im gleichen Jahr entsorgt. Das Verhältnis zwischen Kunststoffverpackungsproduktion und Abfallmenge beträgt circa 98 Prozent (Conversio Market & Strategy GmbH 2020). Dass Kunststoffverpackungen als Hauptverursacher der steigenden Kunststoffabfallmenge gelten, wird auch bei der Betrachtung des Einsatzes der Polymerfraktionen deutlich. Die Polymere PP, PE-LD und PE-HD machen circa 65 Prozent der Kunststoffverpackungen aus. Gleichzeitig entfallen circa 50 Prozent der Gesamtproduktion von Kunststoff auf diese drei Polymerfraktionen (PlasticsEurope Deutschland e. V. 2019).

2.2.1 Erfassung und Stoffflüsse

Für eine flächendeckende Erfassung wurde Deutschland in rund 400 Erfassungsgebiete aufgeteilt (bvse 2018). Die Erfassung von Leichtverpackungen aus Kunststoff erfolgt über neun verschiedene Duale Systeme. Ein Duales System ist ein Unternehmen aus der

Privatwirtschaft, dass sich mit der Organisation der Sammlung, Sortierung und Verwertung der Leichtverpackungsabfälle befasst.

Hersteller und Vertreiber von Leichtverpackungen zahlen Lizenzentgelte für die Sammlung, Sortierung und Verwertung der von ihnen produzierten Verpackungen an ein Duales System. Die Kosten für die Verpackungslizenzierung richten sich nach dem Gewicht, der Materialart und der Menge der in Verkehr gebrachten Verpackungen. Im Gegenzug erhalten die Hersteller und Vertreiber jährlich einen Nachweis, der die Verwertung der von ihnen auf den deutschen Markt gebrachten Verkaufsverpackungen bestätigt.

Mit dem Lizenzentgelt bezahlt das Duale System beauftragte Entsorgungsunternehmen, die die Sammlung, Sortierung und Verwertung der Verkaufsverpackungen durchführen. Nebenentgelte werden von den Dualen Systemen an Kommunen zur Reinigung der Stellplätze oder zur Durchführung von Informationskampagnen gezahlt (Reclay Holding GmbH 2016). Die Marktanteile der neun Dualen Systeme sind in Abbildung 5 dargestellt (Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) 2020).

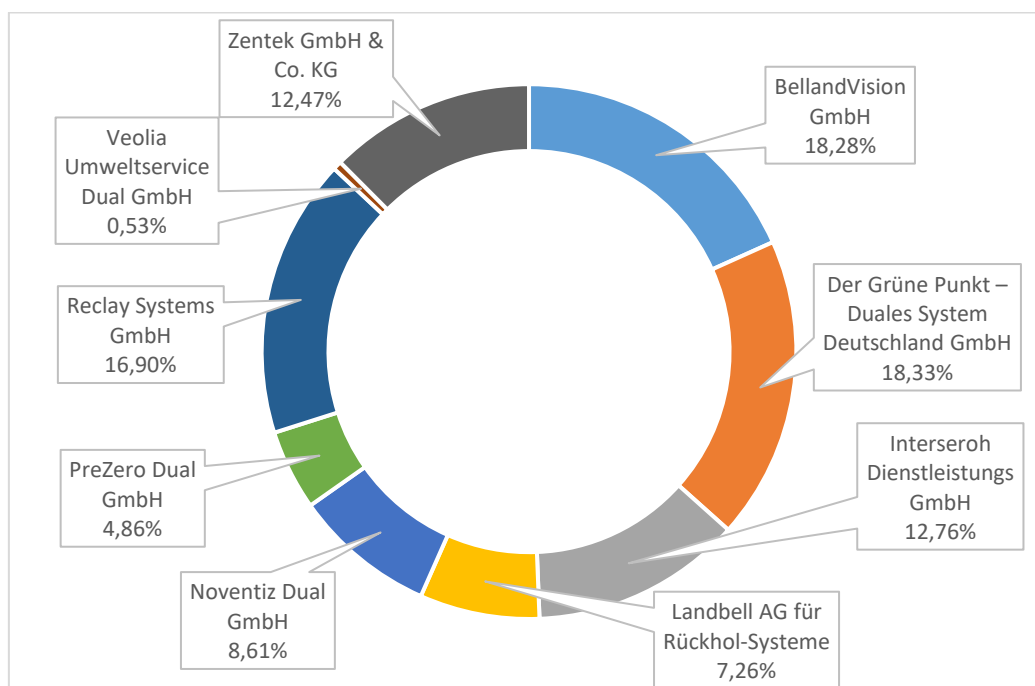


Abbildung 5: Vorläufige Marktanteile der Betreiber von Dualen Systemen im 4. Quartal 2020 (Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister 2020)

Für die Erfassung von Leichtverpackungsabfällen schreibt der Gesetzgeber in Deutschland zwei verschiedene Sammelsysteme vor (§ 14 Absatz 1 Satz 1 VerpackG). Beim Holsystem handelt es sich um ein Standarddienstleistungssystem von öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern wie Kreisen, Städten oder Verbänden. Diese beauftragen ein Duales System mit der Organisation der Erfassung von kontinuierlich in den Haushalten anfallenden Leichtverpackungsabfällen. Die Leichtverpackungsabfälle werden im Rahmen von fest terminierten Straßensammlungen gesammelt. In Deutschland haben sich bezüglich der

Sammlung des Leichtverpackungsabfalls hauptsächlich drei Erfassungsbehältnisse durchgesetzt: die Gelbe Tonne, der Gelbe Sack und die Wertstofftonne. Der Gelbe Sack weist für Sortieranlagen die größten Vorteile auf, da die Verunreinigungen der einzelnen Verpackungen aufgrund einer geringen Vermischung der verschiedenen Abfallfraktionen am geringsten sind (Götz 16.11.2020). Die Vorteile des Holsystems liegen bei deutlich höheren Erfassungsquoten und einer hohen Bürgerfreundlichkeit (Müllers 2019). Beim Bringsystem muss der Abfall von den Bürgern zu zentralen Sammelstellen gebracht werden. Dieses System wird hauptsächlich in süddeutschen Kommunen über Wertstoff- und Recyclinghöfe oder Depotcontainer angewandt (bvse 2018; Dornbusch et al. 2020). Die Erfassungsquote von Kunststoffabfällen über die Dualen Systeme beträgt in Abhängigkeit der Siedlungsstruktur bis zu 75 Prozent (Kuchta 2019). In städtischen Regionen ist der Anteil der Kunststoffabfälle, die über den Restmüllpfad entsorgt werden, höher als in ländlich geprägten Regionen (Dornbusch et al. 2020). Die von der Erfassungsquote zu unterscheidende Verwertungsquote setzt sich aus den Materialströmen zusammen, die stofflich und energetisch verwertet werden. Die Verwertungsquote stieg seit dem Jahr 1991 (11,6 Prozent) bis zum Jahr 2018 (99,6 Prozent) an (Abbildung 6).

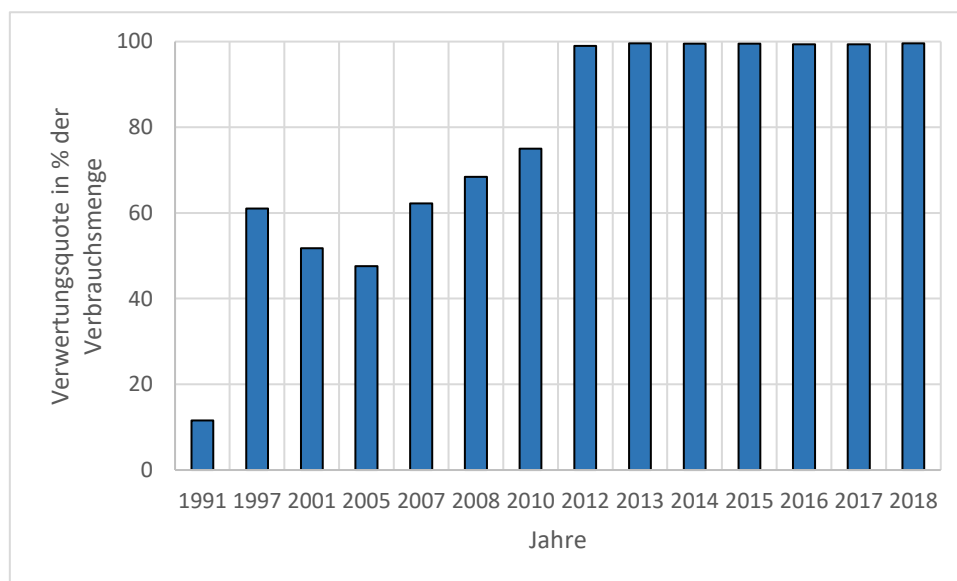


Abbildung 6: Entwicklung der Verwertungsquoten von Kunststoffverpackungsabfällen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 04.08.2020)

Die von den Dualen Systemen erfassten Kunststoffleichtverpackungen werden nur untergeordnet exportiert. Im Jahr 2018 wurden 10,19 Prozent Kunststoffleichtverpackungsabfälle im Ausland verwertet. Mögliche Gründe für die rückläufigen Exporte sind die seit dem 01.01.2018 in der Volksrepublik China geltenden verschärften Einfuhrbestimmungen für Altkunststoffexporte und die im Verpackungsgesetz definierte Recyclingquote (vgl. Kapitel 3.2.) (Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) Oktober 2019). Circa 60 Prozent des in Deutschland stattfindenden stofflichen Recyclings basiert auf der Verwertung von Verpackungen (bvse 2020). Durch die rückläufigen

Kunststoffleichtverpackungsexporte steigt das für ein werkstoffliches Recycling verfügbare Volumen und bildet die Basis für eine höhere Rezyklat Verfügbarkeit.

2.2.2 Recycling von Kunststoffabfällen aus dem Leichtverpackungsabfall

Bei der Betrachtung der Entsorgungswege aller Kunststoffverpackungen wird deutlich, dass circa die Hälfte der einer Verwertung zugeführten Kunststoffverpackungen energetisch entsorgt werden (vgl. Abbildung 7). Eine ähnliche Quote zeigt sich bei dem Kunststoffleichtverpackungsabfall. Die von den Dualen Systemen erfassten Kunststoffleichtverpackungsabfälle haben im Jahr 2018 eine Recyclingquote von 42,1 Prozent. Die Recyclingquote (stoffliche Verwertung) lässt sich aus dem Volumen des Kunststoffleichtverpackungsabfalls, das einer Verwertung zugeführt wurde ermitteln. Die Recyclingquote berechnet sich aus dem Input aller Recyclinganlagen in Deutschland bezogen auf das gesamte Abfallaufkommen der betrachteten Abfallfraktion (Statistisches Bundesamt (Destatis) 01.07.2020).

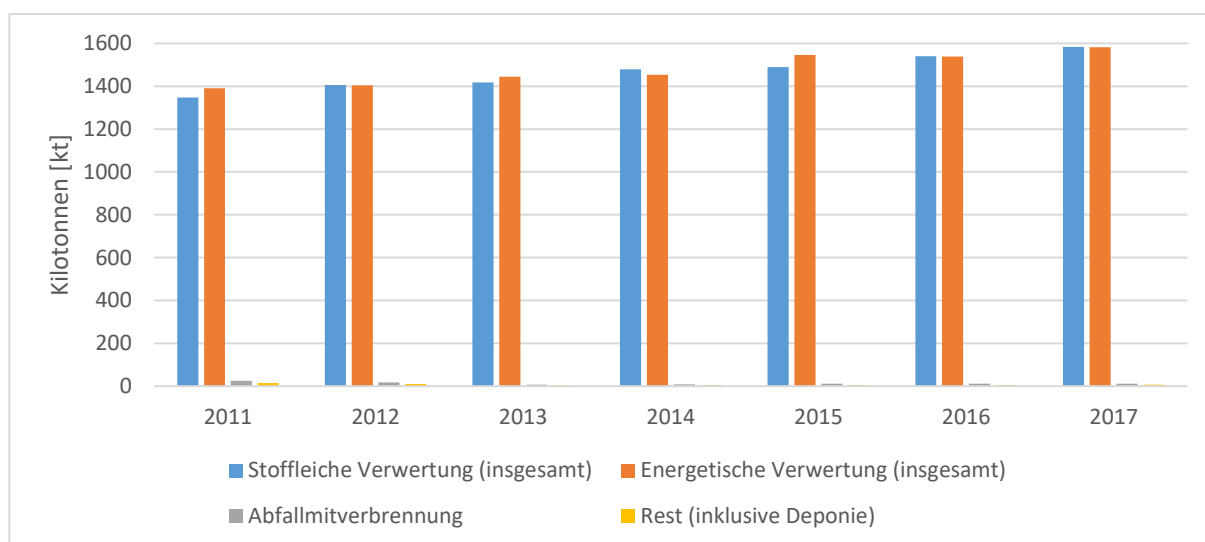


Abbildung 7: Entsorgungswege von Kunststoffverpackungen (energetische Verwertung inklusive Restmüllpfad) (Schüler 2019)

Die Fraktion des LVP-Abfalls belegt damit vor Verbundstoffen (63,5 Prozent) und PPK (Papier, Pappe, Kartonagen) (71,5 Prozent) den letzten Platz der Stofffraktionen im Leichtverpackungsabfall bezüglich der Recyclingquoten. Die höchsten Recyclingquoten weisen im betrachteten Jahr Weißblech (95,4 Prozent), Glas (82,8 Prozent) und Aluminium (82,6 Prozent) auf (Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) Oktober 2019). Die niedrige Recyclingquote von Kunststoffen im Leichtverpackungsabfall liegt neben einer Fehlwurfquote von bis zu 50 Prozent vor allem an der Gestaltung der Verpackungen (Lobbe Entsorgung West GmbH & Co KG und Lobbe Industrieservice GmbH & Co KG 2020). Insgesamt sind mehr als ein Drittel der Verpackungen nicht recycelbar. Bezüglich der Kunststoffverpackungen ist circa die Hälfte des Materials nicht recycelbar oder weist nach dem Recyclingprozesses eine starke Qualitätsminderung auf. Das resultiert in einer geringen Ausbringung von marktfähigen

Kunststofffraktionen am Output von LVP-Sortieranlagen und steigert den Ausschuss aus der nachfolgenden Kunststoffaufbereitung bei recycelnden Unternehmen. Aufgrund der Verluste von jeweils bis zu 50 Prozent im Sortier- und Recyclingprozess können circa 25 bis 40 Prozent des erfassten Kunststoffleichtverpackungsabfalls recycelt werden (Allassali et al. 2019).

3 Rechtliche Grundlagen

Die Kreislaufwirtschaft hat in den vergangenen Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Um diese effizient zu gestalten, hat die europäische Union in den vergangenen Jahren Vorgaben verabschiedet, die die gesetzlichen Rahmenbedingungen bezüglich der Abfallwirtschaft der einzelnen Mitgliedsländer stark beeinflussen (Thomé-Kozmiensky und Goldmann 2009). Jährlich fallen in der EU mehrere 100.000 Tonnen Kunststoffabfälle zur Entsorgung an. Durch das chinesische Importverbot für Kunststoffabfälle ab dem 01.01.2018 hat sich die Lage der Entsorgung dieser Abfälle in der europäischen Union verschärft (Obermeier und Lehmann 2019). Zusätzliche Verwertungswege mussten geschaffen werden, um das Abfallaufkommen einer kontrollierten Verwertung zuzuführen. Vor diesem Hintergrund hat die Kreislaufwirtschaft stark an Bedeutung gewonnen.

3.1 EU-weite Regelungen

Fast zeitgleich mit dem Inkrafttreten der chinesischen Importrestriktionen verabschiedete die europäische Kommission im Januar 2018 die *Strategie für Kunststoffe in einer Kreislaufwirtschaft* (Obermeier und Lehmann 2019). Neben einer Darstellung der Grundprobleme wie der Umweltverschmutzung und Kunststoffen im Meer, rücken Themen wie:

- ein recyclinggerechtes Design,
- Maßnahmen zur Ankurbelung der Nachfrage nach recycelten Kunststoffen und
- die Sensibilisierung der Öffentlichkeit gegenüber Abfalltrennung und Recycling von Kunststoffen

stärker in den Mittelpunkt. Die EU-Kommission hat sich zum Ziel gesetzt, qualitativ hochwertige Rezyklate herzustellen und das geplante EU-weite Ziel von 10 Millionen Tonnen Kunststoff-Rezyklaten bis zum Jahr 2025 zu erreichen (bvse 2020; Europäische Kommission 2018b). Auf Grundlage des Green Deals und des EU-Abfallpakets sind im Zuge der Problematik wachsender Abfallmengen und schwindender Ressourcenverfügbarkeiten die EU-Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2018/851) und die EU-Verpackungsrichtlinie (Richtlinie 2018/852) am 4. Juli 2018 in Kraft getreten.

In der Verpackungsrichtlinie (Verpack-RL) wurden neue Regelungen für Zielvorgaben beim Recycling bis zum Ende des Jahres 2025 und bis zum Ende des Jahres 2030 für alle Verpackungsabfälle eingeführt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Zielvorgaben von Verpackungsabfällen nach Artikel 6 Abs. 1 Buchstabe f) bis i) EU-Verpack-RL

Material	Vorgeschriebene Recyclingquote bis zum 31.12.2025	Vorgeschriebene Recyclingquote bis zum 31.12.2030
Verpackungsabfälle	65 %	70 %
Kunststoffe	50 %	55 %
Holz	25 %	30 %
Eisen	70 %	80 %
Aluminium	50 %	60 %
Glas	70 %	75 %
Papier, Karton	75 %	85 %

Aktuell wird die Recyclingquote in Deutschland über die Ermittlung des Gewichts am Input einer Sortieranlage berechnet (Obermeier und Lehmann 2019). Die in den separat gesammelten Abfallfraktionen enthaltenen Fremdstoffe fließen dadurch in die Recyclingquote ein. Um eine europaweite einheitliche Berechnungsformel für die Recyclingquote zu gewährleisten, wurde mit der Novellierung der Verpackungsrichtlinie der Artikel 6a in die EU-Verpack-RL und mit der Novellierung der Abfallrahmenrichtlinie der Artikel 11a in die Abfallrahmenrichtlinie integriert. Nach der einheitlichen Berechnungsformel wird die Recyclingquote über das Gewicht der sich zum Recycling eignenden Fraktionen am Input aller Recyclinganlagen eines Landes bestimmt. Dadurch wird sichergestellt, dass nur die Menge des Materials in die Recyclingquote einfließt, die auch einer Recyclinganlage zugeführt wird. Die Integration der EU-Verpackungsrichtlinie musste bis zum 5. Juli 2020 in das jeweilige Landesrecht erfolgt sein (Europäische Union 04.06.2018).

Aufgrund der Förderung der Kreislaufwirtschaft wurde das Inverkehrbringen von ausgewählten Einwegkunststoffartikeln in den Mitgliedsländern verboten (Artikel 5 Richtlinie (EU) 2019/904). Die Mitgliedsländer müssen die Richtlinie bis zum 3.7.2021 in nationales Recht integrieren (Artikel 17 Richtlinie (EU) 2019/904) (Europäische Union 12.06.2019).

Um den Export von verunreinigten und verschmutzten Kunststoffabfällen aus der EU zu begrenzen und damit das mögliche Volumen von Kunststoff-Rezyklaten im europäischen Wirtschaftsraum zu erhöhen, trat am 01.01.2021 die Delegierte Verordnung 2020/2174 in Kraft. Nach der Verordnung dürfen nur Kunststoffabfälle, die frei von Verunreinigungen und

Störstoffen sind, exportiert werden. Im Rahmen des Programms „Next Generation EU“ wurde zum 01.01.2021 eine Abgabe von 800 Euro pro Tonne nicht recyceltem Kunststoffabfall beschlossen (Europäische Kommission o.J.).

3.2 Nationale Regelungen in Deutschland

Mit der Einführung der Verpackungsverordnung (VerpackV) im Jahr 1991 sollte eine Trendwende hinsichtlich der Reduzierung des Aufkommens von Verpackungsmüll sowie einer Abkehr von der Wegwerfgesellschaft vollzogen werden (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) o.J.). Durch die VerpackV wird die Verantwortung für die Entsorgung des Verpackungsabfalls auf die Hersteller und Vertreiber übertragen. Da diese jedoch nicht in der Lage sind, ihre Verpackungen im gesamten Bundesgebiet nach der Gebrauchsphase einzusammeln und zu verwerten, wurde ein Verbund gegründet, der die Erfüllung der Verwertungspflichten bündelt. Daraus resultierte die gemeinsame Entsorgung über ein sammelndes und verwertendes System (Duales System). Das erste Duale System ist der Grüne Punkt, welches bis zum Jahr 2003 eine Monopolstellung bezüglich der Sammlung, Sortierung und Verwertung von Verpackungsabfällen besaß. Aktuell sind neun Duale Systeme bei der Zentralen Stelle Verpackungsregister gemeldet (Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) Dezember 2020).

Mit dem Inkrafttreten des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) am 01.06.2012 wurde die EU-Verpackungsrichtlinie 2008/98/EG in das deutsche Abfallrecht umgesetzt. Oberstes Ziel muss nach § 6 *Abfallhierarchie* die Vermeidung von Abfällen sein. Die Produktion und der Konsum müssen so gestaltet werden, dass die Abfallmenge möglichst gering bleibt. Sofern Abfälle nicht vermeidbar sind, müssen diese über eine (Wieder-)Verwertung dem Wirtschaftskreislauf erneut zugeführt werden. Kunststoffabfälle müssen folglich einer Verwertung zugeführt werden. Abfälle, die sich zu einer Verwertung eignen, können sowohl stofflich, durch Rückgewinnung von Rohstoffen, als auch energetisch (Anlage 2 Nummer R1 KrWG), zur Erzeugung von Energie durch Verbrennung, verwertet werden. Ist dies nicht möglich dürfen ausschließlich nicht mehr verwertbare Abfälle umweltverträglich beseitigt werden (Hopmann und Michaeli 2017; Deutscher Bundestag 01.06.2012).

In Anbetracht der steigenden Menge von Kunststoffabfällen hat das Bundesumweltministerium am 26.11.2018 einen 5-Punkte-Plan für weniger Plastik und mehr Recycling vorgelegt (Bundesumweltministerium (BMU) 2018). Die wesentlichen Aspekte des Plans sind im Folgenden aufgezählt:

- Aufklärung und Bewusstseinsbildung der Konsumenten
- Finanzielle Anreize zu ressourcenschonendem Handeln schaffen

- Selbstverpflichtungen von Handel und Industrie
- Verbot überflüssiger Einwegprodukte
- Internationale Kooperation

Die EU-Verpackungsrichtlinie wurde durch das Verpackungsgesetz (VerpackG) in deutsches Recht umgesetzt. Dieses ist seit dem 01.01.2019 in Kraft und löst die bestehende Verpackungsverordnung (VerpackV) ab. Vorrangiges Ziel des Gesetzes ist die Vermeidung von Verpackungsabfällen. Darüber hinaus sollen Verpackungsabfälle einer Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zugeführt werden (§1 Absatz 1 VerpackG).

Um die europäische Zielvorgabe der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle zu erfüllen, sind jährlich mindestens 65 Masseprozent der anfallenden Verpackungsabfälle zu verwerten und mindestens 55 Masseprozent zu recyceln (§ 1 Absatz 4 Satz 1-2 VerpackG).

Nach § 4 VerpackG sind Hersteller und Vertreiber von Verpackungen dazu verpflichtet, eine materialsparende, recyclingorientierte und schadstoffarme Gestaltung von Verpackungen durchzuführen. Die Anteile sekundärer Rohstoffe an der Verpackungsmasse müssen auf ein möglichst hohes Maß gesteigert werden, sofern Hygienebestimmungen und die Sicherheit der zu verpackenden Ware nicht gefährdet werden. Die Akzeptanz für den Verbraucher muss technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar sein (§ 4 Absatz 4 VerpackG). Um eine Auskunft über die Kunststofffraktion der Verpackung zu geben, können Hersteller ihre Produkte mit Kennzeichnungen versehen. Dafür dürfen die Kennzeichnungen, die in Anhang 5 VerpackG aufgeführt werden, verwendet werden (§ 6 VerpackG).

Hersteller von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen müssen sich an einem Dualen System beteiligen, welches Verpackungen zurücknimmt (§ 7 Absatz 1 Satz 1 VerpackG). Verwertet der Hersteller oder Vertreiber die von ihm in Verkehr gebrachten systembeteiligungspflichtigen Verpackungen selbst, erlischt die Pflicht an einer Systembeteiligung (§ 8 Absatz 1 Satz 1 VerpackG). Unternehmen, die Produkte mit einer hohen Recyclingfähigkeit auf den Markt bringen, müssen durch die Dualen Systeme Anreize dafür erhalten (§ 21 VerpackG).

Die Sammlung von restentleerten Verpackungen muss getrennt vom gemischten Siedlungsabfall erfolgen (§ 13 VerpackG). Restentleerte Verpackungen sind Verpackungen, deren Inhalt bestimmungsgemäß ausgeschöpft worden ist (§ 3 Absatz 6 VerpackG). Die Kommunen entscheiden über die Art des Sammelsystems, die Art und Größe der

Sammelbehälter, sowie die Häufigkeit und den Zeitraum der Behälterleerungen. Die Dualen Systeme müssen die Vorgaben der Kommunen umsetzen (§ 22 Absatz 2 VerpackG).

Das VerpackG verpflichtet die Dualen Systeme die privaten Endverbraucher regelmäßig in angemessenem Umfang über Sinn und Zweck der getrennten Sammlung von Verpackungsabfällen, die hierzu eingerichteten Sammelsysteme und die erzielten Verwertungsergebnisse zu informieren (§ 14 Absatz 3 Satz 1-2 VerpackG).

Um die Verpackungsindustrie stärker überwachen zu können, wurde über das VerpackG die Zentrale Stelle Verpackungsregister eingeführt. Die Dualen Systeme sind (nach § 19 Absatz 1 VerpackG) verpflichtet, sich an der Zentralen Stelle zu beteiligen. Die Zentrale Stelle hat die Aufgabe die Entsorgungskosten und Nebenentgelte entsprechend der Marktanteile unter den Systemen zu verteilen und eine wettbewerbsneutrale Koordination von Ausschreibungen und Informationsmaßnahmen durchzuführen (§ 19 Absatz 2 VerpackG). Sie führt ein Verpackungsregister aller gesetzlich verpflichteten Unternehmen aus Industrie und Handel, gleicht Mengen von Herstellern und Systemen ab und sorgt mit Standards für recyclinggerechtes Design bei Verpackungen (Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister 2020). Die dualen Systeme müssen vierteljährlich (§ 26 Absatz 1 Satz 2 Nummer 14 VerpackG) die für das folgende Quartal erwartete Masse an beteiligten Verpackungen gegenüber der Zentralen Stelle angeben (§ 20 Absatz 1 VerpackG). Die Zwischenberichte der Systeme bilden eine Grundlage für die Berechnung, Feststellung und Veröffentlichung der zuzuordnenden Marktanteile der Systeme durch die Zentrale Stelle (§ 26 Absatz 1 Satz 2 Nummer 14 VerpackG).

Um die Recyclingquoten der EU-Verpack-RL in deutsches Recht zu integrieren, wurden in § 16 Absatz 2 VerpackG Verwertungsquoten erlassen. In Tabelle 4 werden die Verwertungsquoten dargestellt.

Tabelle 4: Verwertungsquoten der Dualen Systeme nach § 16 Absatz 2 VerpackG

Material	Quoten für die Zuführung einer Verwertung ab dem 01.01.2019	Quoten für die Zuführung einer Verwertung ab dem 01.01.2022
Kunststoffe	90 %, davon 65 % werkstoffliche Verwertung (insgesamt 59 %)	90 %, davon 70 % werkstoffliche Verwertung (insgesamt 63 %)
Papier, Pappe und Karton	85 %	90 %
Glas	80 %	90 %
Eisenmetalle (Weißblech)	80 %	90 %
Aluminium	80 %	90 %
Getränkekartonverpackungen	75 % (erstmalige Quote)	80 %
Sonstige Verbundverpackungen	55 %	70 %

Die in § 16 VerpackG genannten Verwertungsquoten beziehen sich auf die bei den Dualen Systemen lizenzierte Verpackungsmenge. Bezogen auf die Vertragsmenge des Kunststoffverpackungsabfalls der jeweiligen Dualen Systeme müssen diese ab dem Jahr 2019 eine Recyclingquote (stoffliche Verwertung) von 59 Prozent und ab dem Jahr 2022 von 63 Prozent erfüllen. Damit liegen die Recyclingquoten in Deutschland für Kunststoffe aus dem Leichtverpackungsabfall über den von der Europäischen Union geforderten Recyclingquoten. Mit dem Inkrafttreten des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) am 28.10.2020 wurde die novellierte Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2018/851) und einzelne Richtlinien der Einweg-Kunststoff-Richtlinie (Richtlinie 2019/904) in das deutsche Abfallrecht umgesetzt. Neben der Integration einer europaweit einheitlichen Berechnung für die Recyclingquote von Abfällen wurde die Produktverantwortung der herstellenden und vertreibenden Unternehmen erweitert und die Beschaffung der öffentlichen Hand bezüglich rohstoffschonender und recyclingfähiger Produkte in das deutsche Recht integriert.

4 Aktuell praktizierte Recyclingverfahren

Der Begriff „Recycling“ beschreibt Verwertungsverfahren, bei denen Post-Industrial Abfälle und Post-Consumer Abfälle entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden (vgl. § 3 Absatz 25 KrWG). Das Produkt eines Recyclingprozesses ist ein Sekundärrohstoff. Die Gewinnungspfade von Sekundärrohstoffen aus Abfällen werden in Abbildung 8 (Hopmann und Michaeli 2017) dargestellt.

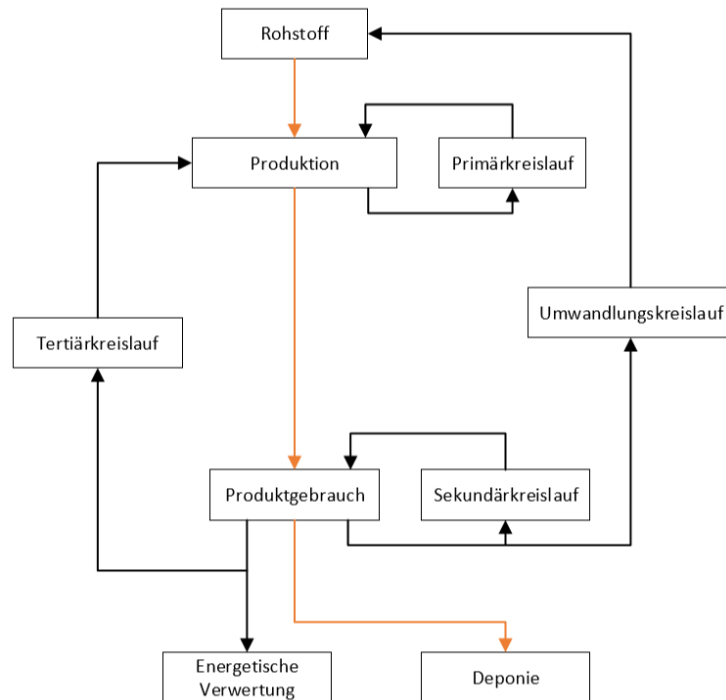


Abbildung 8: Verwertungskreisläufe (Hopmann und Michaeli 2017)

Grundsätzlich lassen sich vier Verwertungskreisläufe unterscheiden. Im Primärkreislauf werden Produktionsabfälle erneut der Produktion zugeführt. Aufgrund der Bekanntheit der Kunststoffzusammensetzung und einer hohen Sortenreinheit eignen sich Produktionsabfälle für ein hochwertiges Recycling. Mittlerweile werden fast alle Produktionsabfälle über den Primärkreislauf recycelt (Hopmann und Michaeli 2017).

Im Sekundärkreislauf wird das Produkt nach dem Ersteinsatz durch Wiederverwendung als neues oder anderes Produkt genutzt. Ein Beispiel hierfür sind Altreifen, die als Fender in Häfen eingesetzt werden. Die Verwertung von Mehrwegflaschen fällt nach der obigen Definition in den sekundären Verwertungskreislauf.

Der über die Dualen Systeme eingesammelte Kunststoffleichtverpackungsabfall gelangt in den Tertiärkreislauf. Dieser umschließt die Produktion, den Produktgebrauch und die Aufbereitung. Nach der Nutzphase wird das zu Abfall gewordene Produkt aufbereitet und als Sekundärrohstoff in die Produktion rückgeführt. Der Tertiärkreislauf wird auch als werkstoffliches Recycling bezeichnet (Hopmann und Michaeli 2017). Beim werkstofflichen

Recycling von Kunststoffen besteht die primäre Zielsetzung darin, die erzeugten Rezyklate verstärkt in höherwertigen Produktbereichen wie Kunststoffverpackungen für Reinigungsmittel oder Lebensmittel einzusetzen (bvse 2018).

Ist es aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht möglich, Kunststoffabfälle dem werkstofflichen Recycling zuzuführen, werden sie dem vierten Verwertungskreislauf zugeführt. In diesem, auch als Umwandlungskreislauf oder als rohstoffliches Recycling bezeichneter Kreislauf, wird das Produkt, das nach der Gebrauchsphase zu Abfall geworden ist, über die Aufbereitung in niedermolekulare Stoffe zersetzt. Die niedermolekularen Stoffe können als Sekundärrohstoffe einem Produktionsprozess zugeführt werden. Am Beispiel von Rohren aus PVC kann das rohstoffliche Recycling verdeutlicht werden. Die Kunststoffrohre werden zerkleinert und durchlaufen einen Hydrolyse- und einen Pyrolyseprozess. Durch die Erhitzung im Pyrolyseprozess wird der Hydrolyserückstand in Öl und Koks zerlegt (Vetter und Schmitt o.J.). Beide Fraktionen können als Sekundärrohstoffe in einem Produktionsprozess eingesetzt werden.

4.1 Derzeitige Ermittlung der Recyclingfähigkeit einer Kunststoffverpackung

Die Ermittlung der Recyclingfähigkeit einer Kunststoffverpackung erfolgt auf Grundlage einer dreistufigen Systematik (Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) 30.08.2019):

1. Sortier- und Verwertungsinfrastrukturen für ein hochwertiges wertstoffliches Recycling müssen vorhanden sein,
2. Verpackungen müssen sortierbar und ihre Komponenten trennbar sein,
3. Recyclingunverträglichkeiten aufgrund von unverträglichen Stoffen in den Verpackungen dürfen nicht vorhanden sein.

Sind diese drei Grundlagen erfüllt, wird die Recyclingfähigkeit der Kunststoffverpackung vom Wertstoffgehalt des namensgebenden Hauptpolymeranteils (z.B. PP-Anteil, PE-Anteil, etc.) abgeleitet und auf einer metrischen oder ordinalen Skala angeordnet, die aus mindestens drei Skalengraden besteht. Die Gestaltung der Verpackungsprodukte, die Abfallquelle und die Auswahl und Kombination der eingesetzten Materialien haben einen wesentlichen Einfluss auf die Recyclingfähigkeit von Kunststoffverpackungen (Bruckschen 2019).

4.2 Voraussetzungen für einen hochwertigen Recyclingprozess

Der Recyclingprozess einer Kunststoffverpackung beginnt beim Produktdesign. Kunststoffleichtverpackungen, die aus einem einzigen Material bestehen, eignen sich neben hellen und nicht etikettierten Verpackungen gut für ein hochwertiges Recycling (Stadtreinigung Hamburg AöR 2019). Eine gute Trennbarkeit von Komponenten im

Recyclingprozess ist ebenfalls im Produktdesignprozess zu berücksichtigen (DSD – Duales System Holding GmbH & Co. KG 2020a)). Neben dem Produktdesign ist vor allem die sortenreine getrennte Erfassung der Kunststoffverpackungsabfälle an der Anfallstelle wichtig (bvse 2020). Der aktuelle Stand der Technik einer Sortieranlage ist für eine hohe Recyclingquote von Bedeutung. Moderne Technik und eine effiziente Prozessführung führen zu sortenreinen Fraktionen, die hochwertig recycelt werden können. Um den Recyclingprozess wirtschaftlich zu gestalten, ist eine hohe Kunststoff-Rezyklat-Nachfrage essenziell.

4.3 Methoden des Kunststoffrecyclings aus Leichtverpackungen

Für das Recycling von Kunststoffverpackungen aus dem Leichtverpackungsabfall existieren im Allgemeinen zwei in der Praxis angewandte Methoden (Rudolph et al. 2020):

- die *werkstoffliche Verwertung* und
- die *energetische Verwertung*

Auf Grundlage des Grades der Verunreinigungen der Kunststoffverpackungen mit organischen oder anorganischen Substanzen wird eine Methode ausgewählt. Verunreinigungen können neben nicht-kunststoffbasierten Stoffen auch unterschiedliche Polymere darstellen. Eignet sich eine Kunststoffverpackung aufgrund von Verunreinigungen und Degradationsprozessen aus wirtschaftlicher und technischer Sicht nicht für eine werkstoffliche Verwertung, wird die Verpackung in einer LVP-Sortieranlage der Fraktion zur energetischen Verwertung zugeteilt.

4.3.1 Werkstoffliche Verwertung

Unter werkstofflicher Verwertung wird die Wiederverarbeitung von Kunststoffabfällen zu neuen Produkten unter Beibehaltung der Molekülstruktur der Polymermoleküle definiert. Dieser Vorgang geschieht in der Regel durch ein Auf- und Umschmelzen der Kunststoffe. Wie in Kapitel 2.1. beschrieben, können dadurch - mit wenigen Ausnahmen - nur Thermoplasten werkstofflich verwertet werden. Durch die hohe Zuverlässigkeit und einem vergleichbar geringen Kostenaufwand wird diese Verwertungsform bevorzugt eingesetzt.

Der Sammlung des Kunststoffabfalls folgt die Aufbereitung. Die Aufbereitung beinhaltet die Schritte: Zerkleinern, Reinigen (Post-Consumer Abfälle), Trennen (gemischte Abfälle) und Trocknen. Im darauffolgenden Hauptprozessschritt werden die Kunststoffe aufgeschmolzen. Das aufgeschmolzene Material kann entweder direkt zu neuen Produkten (Direktverarbeitung) oder zu Regranulaten verarbeitet werden (Schneider 02.12.2020).

Der Vorteil einer Regranulierung ist die Möglichkeit einer gezielten Einflussnahme auf die Werkstoffeigenschaften. Aufgrund gezielter Dosierungsmöglichkeiten in Verbindung mit der Beimischung von Füllstoffen, Additiven und Verstärkungstoffen, durch Entgasung oder durch

reaktive Extrusion können Rezyklate erzeugt werden, die in ihrer Erscheinung dem Neugranulat ähneln (Thor 02.12.2020). In Kapitel 4.5. und 4.6. werden diese Aufbereitungsschritte genauer beschrieben.

Das Wiederaufschmelzen kann eine Veränderung oder einen Abbau der Polymerketten zur Folge haben. Mit jedem Bearbeitungsprozess verändert sich die molekulare Struktur des Polymers. Beispiele dafür sind erhöhte Temperatur und Feuchtigkeit während des Bearbeitungsprozesses, die einen thermisch induzierten Kettenabbau und hydrolytische Kettenspaltungen bewirken. Während des Gebrauchs können durch UV-Licht und Oxidationsprozesse Kettenspaltungen und damit Qualitätsverschlechterungen des Kunststoffes indiziert werden. Um diese Abbaueffekte zu minimieren, wird dem Rezyklat häufig Rohmaterial zugegeben (Hopmann und Michaeli 2017).

In Kapitel 5.3. werden die Prozesse, die zu Qualitätsminderungen der Kunststoffe führen, genauer erläutert.

Je nach der Quelle der Kunststoffabfälle wird zwischen zwei Verwertungswegen unterschieden. Produktionsausschuss wird der primären werkstofflichen Verwertung zugeordnet, da dieser Abfall im Allgemeinen sauber und aus einer bekannten Zusammensetzung besteht. Beispiele hierfür sind Randbeschnitte (Folienextrusion), Angüsse (Spritzgießen) und Stanzgitter (Thermoformen). Diese Abfälle können entweder direkt oder nach einer Zerkleinerung erneut verarbeitet werden. Im Fall einer Verwertung von Abfällen aus der Produktion wird von innerbetrieblichem Recycling gesprochen. (Hopmann und Michaeli 2017; Rudolph et al. 2020). Post-Consumer Abfälle bedürfen aufgrund ihrer Verunreinigungen einer vorgeschalteten Behandlung im Sinne einer Sammlung, Sortierung und Reinigung (Thor 02.12.2020).

4.3.2 Energetische Verwertung

Können die Kunststoffe im Leichtverpackungsabfall aufgrund von Verunreinigungen, Färbungen, Degradationsprozessen oder mehrschichtigem Aufbau keiner Kunststofffraktion zugeordnet werden, ist eine werkstoffliche Verwertung mit den aktuell technisch verfügbaren Prozessen nicht möglich. In diesen Fällen erlaubt der Gesetzgeber eine energetische Verwertung. Da fast alle Kunststoffe primär aus Rohöl synthetisiert werden und entsprechend hohe Heizwerte haben, eignet sich diese Fraktion zur energetischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen als Brennstoff zur Strom- und Wärmeumwandlung oder als Ersatzbrennstoff (Hopmann und Michaeli 2017).

4.4 Sammlung

Der erste Schritt des Recyclingprozesses von Kunststoffleichtverpackungen ist das getrennte Sammeln der Kunststofffraktion an der Anfallstelle (vgl. Kapitel 4.2.). Die Sammlung erfolgt je nach Kommune über den Gelben Sack, die Gelbe Tonne oder die Wertstofftonne (vgl. Kapitel 3.2.). Bei zunehmender Vermischung mit anderen Materialien ordnen Sortieranlagen den einzelnen Fraktionen falsches Material zu. Dadurch reduziert sich das verfügbare Volumen von hochwertig recycelbarem Material (Glaz 30.11.2020). Das durch die Dualen Systeme erfasste Kunststoffverpackungsmaterial wird einer LVP-Sortieranlage zugeführt.

4.5 Sortierung von Kunststoffabfällen

Der Sammlung und Erfassung der Kunststoffleichtverpackungsabfälle folgt die Sortierung der einzelnen LVP-Fraktionen. Nur durch sortenreine Kunststofffraktionen können Kunststoffregranulate mit bekannten Eigenschaften hergestellt werden, die von der Industrie als Sekundärrohstoff eingesetzt werden können. Um den Recyclingprozess ökonomisch zu gestalten, müssen die Kunststoffe möglichst schnell und genau identifiziert werden (Al-Salem et al. 2009). Der Sortierprozess kann manuell oder automatisch erfolgen. In modernen Sortieranlagen erfolgt die Sortierung größtenteils automatisch. In einer nachgeschalteten händischen Sortierung werden falsch sortierte Kunststoffe aus dem jeweiligen Strang entfernt. Die Sortierung von Kunststoffleichtverpackungen besitzt den größten Einfluss auf die Reinheit des Rezyklats.

Aufgrund der in Kapitel 5 beschriebenen Hemmnisse eines hochwertigen Recyclings werden circa 50 Prozent als Sortierückstand einer energetischen Verwertung zugeführt. Im Folgenden werden ausgewählte Sortiertechniken und deren Anwendung sowie der Sortierprozess anhand einer dem Stand der Technik entsprechenden LVP-Sortieranlage vorgestellt.

4.5.1 Manuelle Sortierung

Die manuelle Sortierung gilt als das einfachste Trennverfahren. Geschultes Personal identifiziert die Kunststoffe anhand der Form, der Farbe, der Kunststoffmarke und des Recycling-Codes und sortiert die Kunststoffe nach diesen Parametern. Das Unterscheiden verschiedener Kunststoffsorten auf Grundlage der visuellen Erscheinung ist fehleranfälliger als eine automatische Sortierung. Aufgrund dessen, der hohen Arbeitsintensität und einer großen Wahrscheinlichkeit von Fehlern seitens des Personals eignet sich die manuelle Sortierung für eine grobe Vorsortierung und für die Aussortierung von Fehlwürfen aus sortenreinen Fraktionen. In der Praxis wird die manuelle Sortierung hauptsächlich zur Aussortierung von Fehlwürfen angewandt (Götz 16.11.2020).

4.5.2 Automatische Sortierung

Die automatische Sortierung ist gegenüber der manuellen Sortierung effizienter. Durch die Kombination verschiedener Sensoren können Kunststoffleichtverpackungen aufgrund verschiedener Unterscheidungsmerkmale wie zum Beispiel Farbe, Form und chemische Zusammensetzung des Materials besser getrennt werden (Feil et al. 2019). Im Folgenden werden ausgewählte automatische Sortiermethoden vorgestellt.

4.5.2.1 Trennung von Kunststoffen mit Hilfe der Nahinfrarotspektroskopie

Die Trennung von Kunststoffen mit Hilfe von Nahinfrarotspektroskopie (NIR-Spektroskopie)-Sensoren ist die verbreitetste Methode für die Sortierung einzelner Kunststofffraktionen (Götz 16.11.2020). Durch sie wurde die kostenintensive manuelle Sortierung zur Kunststofftrennung fast vollständig ersetzt. Ziel der NIR-Spektroskopie ist die Identifizierung und damit die Möglichkeit zur Sortierung verschiedener Kunststoffsorten. Nahinfrarotdetektoren arbeiten mit spezifischen Wellenlängen, die auf den Materialstrom gerichtet sind. Die ausgesendeten Wellenlängen regen die C-H-, N-H-, C-O- und O-H- Bindungen an. Einzelne Bindungen werden bei unterschiedlichen Wellenlängen in Schwingung versetzt. Die für die Schwingung notwendige Energie wird aus der ausgesendeten Strahlung bezogen. Die von den Molekülen absorbierte Energie fehlt in den stoffspezifischen Reflexions- und Transmissionsspektren (Siesler et al. 2002). Das führt zu einer Unterscheidung der einzelnen Kunststoffsorten. Aufgrund der Unterscheidung können unterschiedliche Kunststoffsorten im Materialstrom identifiziert werden. Rund 30 Zentimeter hinter den Spektrometern sind Druckluftbatterien installiert. Diese werden aufgrund der Informationen aus dem Spektrometer von einem Computer einzeln angesteuert und schießen die einzelnen Kunststoffsorten mit einem acht-Bar Druckimpuls aus dem Materialstrom heraus (Götz 16.11.2020). Die Qualität der Sortierung mittels NIR-Spektrometer ist abhängig von der Prozessführung und dem Verpackungsdesign der Kunststoffleichtverpackungen. Da ein NIR-Spektrometer zwischen „Ausschießen“ oder „im Strom verbleiben“ sortiert, erfordern hohe Prozessausbeuten in Verbindung mit hohen Qualitäten und geringen Materialverlusten mehrstufige Sortierprozesse (Götz 16.11.2020). Wird das Transportband überfüllt, können wertvolle Komponenten aufgrund von Überschattungseffekten nicht identifiziert werden und gelangen in die energetische Verwertung. Eine Monoschichtpräsentation des Kunststoffmaterials ist daher eine Grundvoraussetzung für die effektive Sortierung der Kunststofffraktionen. Rußgefärbte schwarze Kunststoffe können aufgrund der vollständigen Lichtadsorption keiner Kunststofffraktion zugeordnet werden und gelangen in die energetische Verwertung (Rudolph et al. 2020).

4.5.2.2 Farbsortierung

Die Farbsortierung findet hauptsächlich bei vorsortierten Kunststoff-Flakes Anwendung. Dafür wird der Materialstrom über insgesamt fünf Rutschen geleitet (vgl. Abbildung 9). Die über einen Schüttelrost vereinzelt Flakes werden zu Beginn des Trennprozesses über die beiden ersten Rutschen geleitet. Der Materialstrom wird mit LED-Licht bestrahlt. Sensoren identifizieren die einzelnen Farben und leiten die Informationen zu einem Rechner weiter, der diese auswertet. Der Rechner steuert auf Grundlage der Auswertung Druckluftdüsen an, die nicht erwünschte Farben abstoßen. Es verbleiben nur Flakes einer gewünschten Farbe im Materialstrom. Nachdem dieser Trennvorgang auf den ersten beiden Rutschen vollzogen wurde, wird er auf den nächsten beiden wiederholt und im Anschluss zusammengeführt. Die zusammengeführten Materialströme werden über die fünfte Rutsche ein letztes Mal analysiert und verbleibende, unerwünschte Farben aus dem Strom herausgeblasen.



Abbildung 9: Farbsortierung von PE-HD Flakes über fünf Rutschen (© Turuc, A.)

4.5.2.3 Wirbelstromabscheider

Wirbelstromabscheider werden verwendet, um Nichteisen (NE)-Metalle wie Aluminium, Kupfer oder Blei auszusortieren. Durch ein rotierendes Magnetfeld und den im Abfallstrom befindlichen elektrisch leitenden NE-Metallteilchen wird ein Wirbelstrom induziert, welcher ein Magnetfeld erzeugt. Die magnetisierten Metallteilchen werden durch das Magnetfeld abgestoßen und von dem nichtleitenden Materialstrom separiert. In Abbildung 10 ist ein Wirbelstromabscheider schematisch dargestellt. Die Fraktion A besteht aus nichtleitenden Materialien, die Fraktion B besteht aus Materialien mit hoher Leitfähigkeit (Martens 2011).

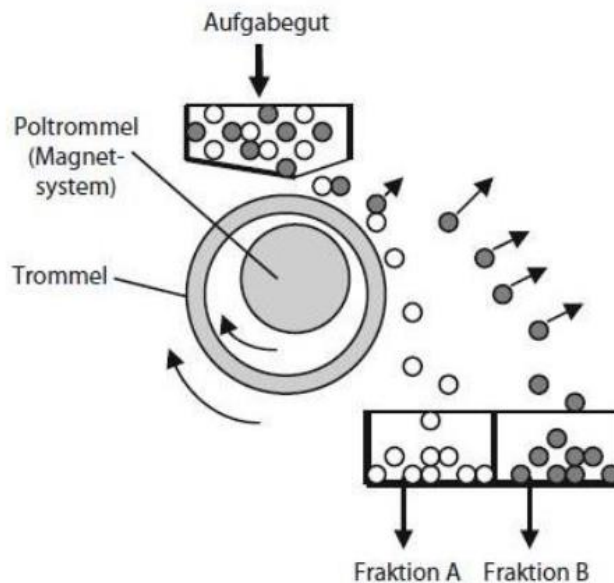


Abbildung 10: Schematische Funktionsdarstellung eines Wirbelstromabscheiders, Fraktion A: Material mit geringer Leitfähigkeit, Fraktion B: NE-Metalle mit hoher Leitfähigkeit (Martens 2011)

4.5.2.4 Schwimm- und Sinktrennung

Die Schwimm- und Sinktrennung ist eines der gebräuchlichsten automatischen Trennverfahren. Das Verfahren nutzt die unterschiedlichen Dichtebereiche der zu trennenden Materialien. Stoffe mit einer höheren Dichte sinken ab, während Stoffe mit einer niedrigeren Dichte auf dem Trennmedium aufschwimmen. Die Schwimm- und Sinktrennung wird aufgrund der ähnlichen Dichtebereiche der einzelnen Kunststofffraktionen und anhaftender Verschmutzungen häufig am Ende des Sortierprozesses angewandt. Dort besitzt der vorsortierte Materialstrom eine höhere Reinheit. Die einzelnen Kunststofffraktionen lassen sich dadurch und in einigen Fällen durch die Zugabe von Modifikatoren wie Tetrabromethan in das Trennmedium besser voneinander separieren (Al-Salem et al. 2009).

Aufgrund der hohen Wassermenge bietet sich bei der Schwimm- und Sinktrennung eine Kreislaufführung des Trennmediums an. Eine Wasseraufbereitungsanlage ist daher in den meisten in Deutschland befindlichen Anlagen integriert (Schneider 02.12.2020). In Tabelle 5 sind die Dichtebereiche einiger ausgewählter Polymere dargestellt.

Tabelle 5: Dichtebereiche ausgewählter Polymere (Rudolph et al. 2020)

Polymer	Dichtebereich (g/cm ³)
PET	1,330 – 1,400
PE-LD	0,910 – 0,955
PE-HD	0,956 – 0,980
PP	0,861 – 0,925
PS	1,050 – 1,220
PVC	1,304 – 1,388

4.5.3 Sortierung in der Praxis

Anhand einer Kunststoffsortieranlage der MEILO Gesellschaft zur Rückgewinnung sortierter Werkstoffe mbH & Co. KG in Gernsheim mit einem Jahresdurchsatz von 120.000 t/a wird ein aktuell praktizierter Sortierprozess beschrieben. Die Sortieranlage ist in der Lage das Input-Material in 13 verschiedene Fraktionen aufzuteilen (Götz 16.11.2020).

Der Abfall aus dem Gelben Sack und der gelben Tonne wird nach der Anlieferung über einen Langsamläufer und einen Schredder geöffnet. Förderbänder transportieren das Material in drei in Reihe geschaltete Siebtrommeln. Die Siebtrommeln besitzen verschieden große Öffnungsweiten, die die Abfälle nach der Größe sortieren. Der Füllgrad der Siebtrommeln sollte nicht mehr als 15 Volumenprozent betragen. Eine Überfüllung der Siebtrommel resultiert in einer Verringerung der Beweglichkeit der Partikel. In der Folge sinkt die Verweilzeit der Partikel an der Sieboberfläche und die Trennbarkeit des Materials wird eingeschränkt. Bei einem niedrigeren Durchsatz steigen die spezifischen Betriebskosten und das Verfahren wird unwirtschaftlich (Feil et al. 2019). Nachgeschaltete ballistische Separatoren trennen eine rollende und schwere Hauptfraktion wie Dosen, Weißbleche, etc. von einer flachen Leichtfraktion (Folien, Papier, Textilien, etc.). Magnetscheider heben Weißblech aus dem Abfallstrom. Fünf Windsichter ziehen lose Teile wie Zeitungsseiten, Papp- und Folienstücke heraus. Zwei Wirbelstromabscheider, die jeweils ein elektrisches Feld erzeugen, scheiden die nicht-magnetischen Anteile wie Aluminiumdosen ab. Die 22 in der Anlage installierten NIR-Spektrometer können die Kunststofffraktionen PE, PET, PS, PP und Mischkunststoffe (PO-flex) identifizieren und über Druckluftdüsen aus dem Materialstrom entfernen. Die ausgeschossenen Fraktionen werden auf mehrere Fließbänder aufgeteilt und gelangen über die händische Nachsortierung zu Materialbunkern. Paktier- und Ballenpressen komprimieren die getrennten Materialien zu kompakten Würfeln, die auf dem Gelände gelagert werden. Die zu Ballen gepressten Kunststofffraktionen weisen einen Reinheitsgehalt von 94 – 98 Prozent auf.

Mit der beschriebenen Verfahrenstechnik der Sortieranlage in Gernsheim lassen sich 53 Prozent des Materialstroms eindeutigen Fraktionen zuordnen. Damit konnte im Jahr 2020 eine Sortierquote von circa 53 Prozent erreicht werden. Der Anteil der zur energetischen Verwertung aussortierten Leichtverpackungen liegt bei 47 Prozent.

4.6 Aufbereitung und Granulierung von Kunststoffverpackungen

In einer Recyclinganlage werden die angelieferten Kunststoffballen zunächst einer Nachsortierung unterzogen und im Anschluss zu Granulaten verarbeitet.

Anhand einer Kunststoffaufbereitungsanlage der Systemic Plastics Eisfeld GmbH wird der aktuell praktizierte Recyclingprozess beschrieben. Am Beispiel der PE-LD-Fraktion wird die Aufbereitung erläutert (Schneider 02.12.2020).

Die komprimierten PE-LD-Ballen werden nach der Ankunft in der Aufbereitungsanlage stichprobenartig einer optischen Kontrolle unterzogen, um einen Überblick über die angelieferte Fraktion und deren Qualität zu erhalten. Anhand der Zusammensetzung der Stichprobe können nachfolgend Prozessparameter eingestellt werden. Die PE-LD-Ballen werden in einem ersten Verarbeitungsschritt über einen Schredder zu kleineren Kunststoff-Flakes verarbeitet. Metalldrähte und andere Metallteile werden von einem Überbandmagneten aus dem Materialstrom entfernt. Ein Windsichter trennt die PE-LD-Fraktion von anderen Kunststoffen und Störstoffen. Über ein nachgeschaltetes Sieb werden kleine PE-LD-Flocken von größeren PE-LD-Teilen separiert. Einem Vorabscheider folgt ein mechanischer Friktionsreiniger, der Staub, Etiketten und andere Anhaftungen von der PE-LD-Fraktion trennt. In einem Befeuchter wird das Material fließfähig gemacht. Durch einen nachgeschalteten Einrührer, der nach dem Prinzip einer Waschmaschine funktioniert, werden Essensreste und verbleibende Störstoffe von dem Kunststoff getrennt. Eine Schwimm-Sink Trennung entfernt Kunststoffe mit einer höheren Dichte als PE-LD aus dem Materialstrom. Nach einem Friktionswäscher trocknen Trockenpressen das verbleibende Material. In einem Schneidverdichter wird das Material voragglomeriert. Dort können dem Material je nach Produktanforderungen Farben zudosiert werden (vgl. Abbildung 11). Die aus dem Waschprozess verbleibende Restfeuchtigkeit wird hier abgesaugt. Über einen Extruder wird das Material eingeschmolzen. Laserfilter mit einer Siebweite von 200 µm trennen verbleibende PE-HD Polymere ab. Über eine Entgasung werden flüchtige Störstoffe aus dem Materialstrom gesaugt. Ein Rückspülfilter trennt in einem letzten Aufbereitungsschritt Elastomere aus dem Materialstrom ab. Über einen Granulierer werden die entstandenen PE-LD-Fäden zu linsenförmigen Regranulaten verarbeitet. Eine Zentrifuge trocknet die granulierten PE-LD-Körner, die in Big Packs verfüllt werden.

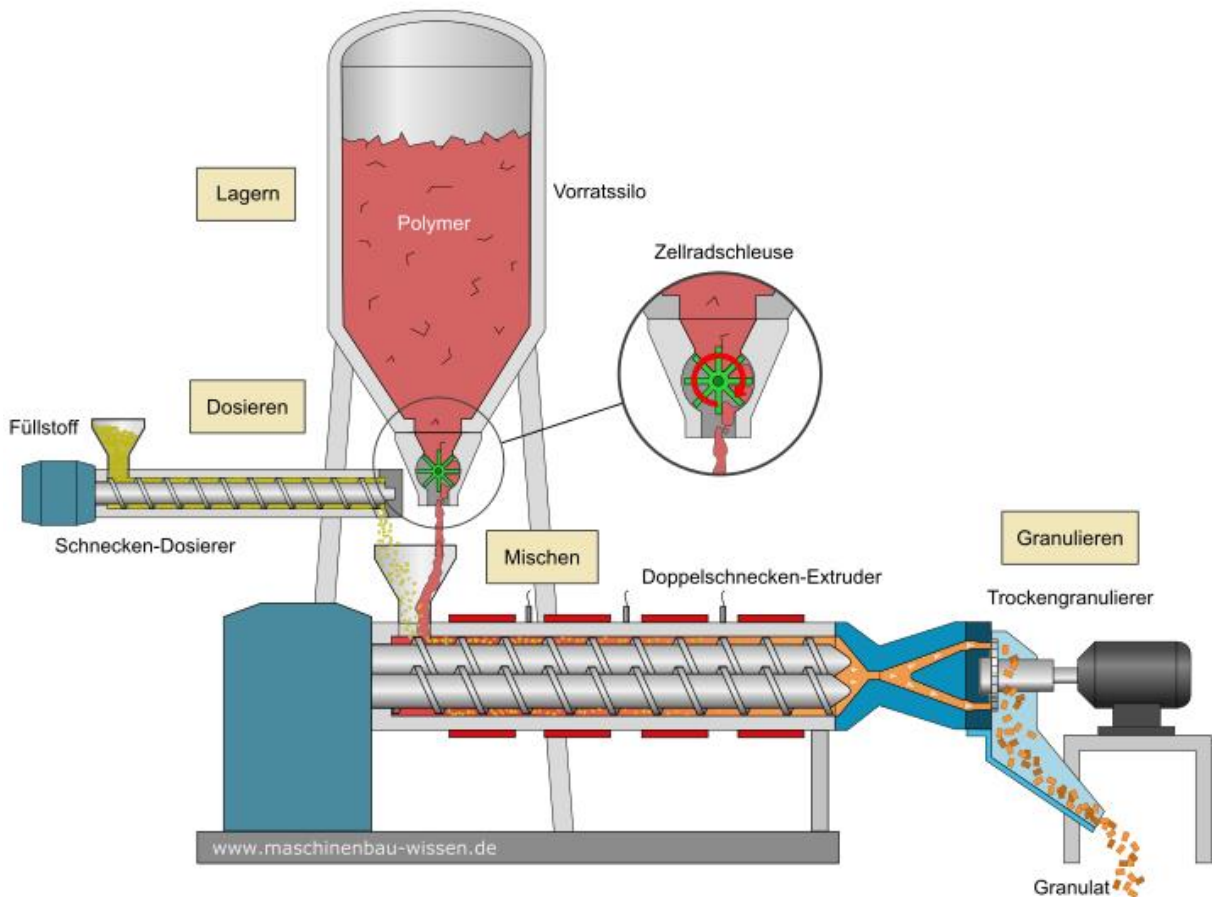


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Herstellung von Kunststoffregranulaten (Maschinenbau-Wissen.de 2021)

Das durch den Aufbereitungsprozess gewonnene PE-LD-Regranulat besitzt durchschnittlich einen PP-Anteil von 11 – 12 Prozent. Dadurch findet bezüglich der PE-LD-Fraktion hauptsächlich ein Downcycling statt. Grund dafür ist die niedrige Schüttdichte von PE-LD. Die notwendigen Anlagen müssten für eine garantierte Reinheit von über 99 Prozent PE-LD größer dimensioniert werden. Dies ist für die Recyclingunternehmen unökonomisch.

Durch eine niedrigere Schüttdichte kann die PE-HD Fraktion ökonomisch zu hohen Reinheiten aufbereitet werden. Diese liegen bei circa 99 - 100 Prozent. Durch die hohe Reinheit von regeneriertem PE-HD ist dieses im Vergleich zu Regranulaten aus PE-LD für ein breiteres Produktspektrum anwendbar. Daher werden die PE-HD Flakes nach dem Waschvorgang in einem speziellen Sortiergerät nach Farbe sortiert (vgl. Kapitel 4.5.2.2.). Das aus dem Sortierprozess stammende einfarbige Material wird wie das PE-LD in einem Extruder aufgeschmolzen und wie oben beschriebenen zu Regranulat weiterverarbeitet. Die Regranulate aus PE-LD und PE-HD können als Sekundärrohstoff in der Kunststoffindustrie eingesetzt werden (Umweltbundesamt 2019).

In Abbildung 12 sind die Verfahrensstufen des Leichtverpackungsabfalls beginnend bei der LVP-Sortieranlage bis hin zur Herstellung des fertigen Regranulates zusammenfassend dargestellt.

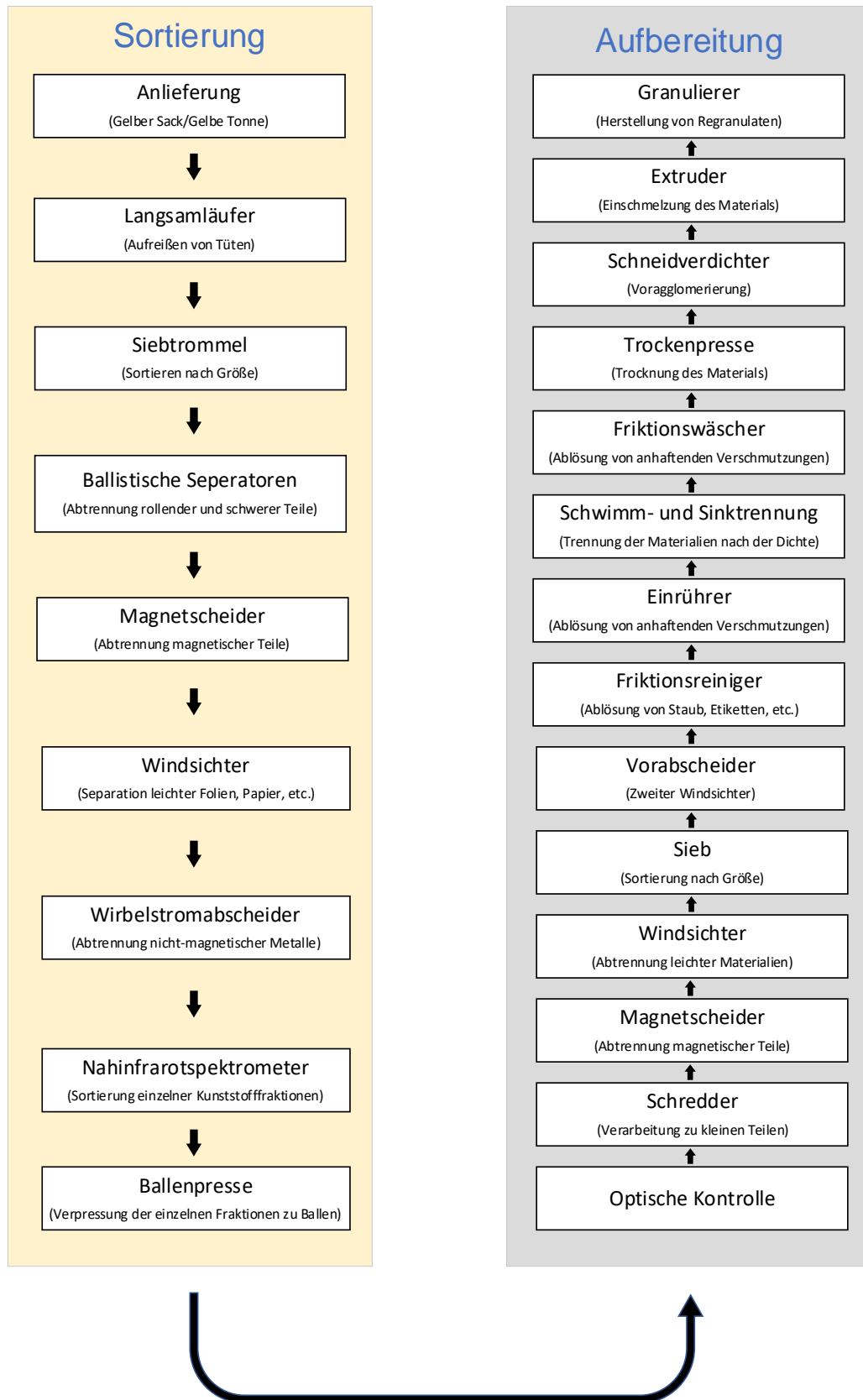


Abbildung 12: Verfahrensschritte der Sortierung und Regranulierung von Kunststoffen aus dem LVP-Abfall

4.7 Rezyklat-Einsatz

Im Rahmen der europäischen Plastikstrategie hat die europäische Kommission eine Selbstverpflichtungskampagne gestartet, die private und öffentliche Akteure motivieren soll, Kunststoff-Rezyklate einzusetzen. Die Kommission verfolgt dabei das Ziel, bis zum Jahr 2025 10 Millionen Tonnen recycelter Materialien zur Herstellung von Plastikverpackungen zu verwenden (Europäische Kommission 2018a). Im Jahr 2019 wurden in Deutschland circa 1,95 Millionen Tonnen Rezyklate verarbeitet. 43 Prozent dieser Rezyklate wurden in der Bauindustrie verarbeitet. Die Verpackungsindustrie verarbeitete 24 Prozent und die Landwirtschaft ist mit 11 Prozent drittgrößter Abnehmer des in Deutschland angefallenen Rezyklates (vgl. Abbildung 13) (Conversio Market & Strategy GmbH 2020).

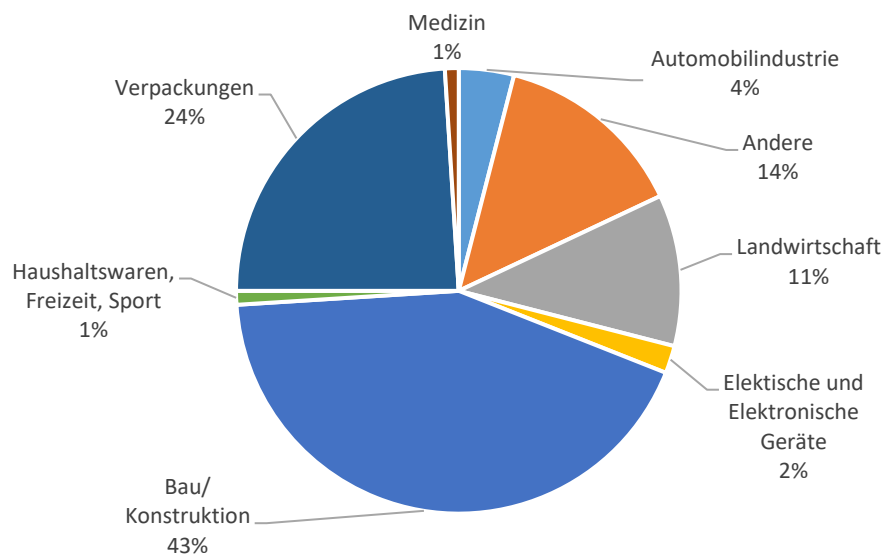


Abbildung 13: Verarbeitung von Kunststoff Rezyklaten nach Branchen im Jahr 2019 (Conversio Market & Strategy GmbH 2020)

Für landwirtschaftliche Produkte werden mit einem durchschnittlichen Rezyklat-Anteil von 36,5 Prozent prozentual die meisten Rezyklate verarbeitet. Die Bauindustrie und die Verpackungsindustrie liegen mit 23,3 und 10,9 Prozent des Rezyklat-Einsatzes in ihren Produkten dahinter (Conversio Market & Strategy GmbH 2020).

Aufgrund des hohen Einsatzes von Rezyklaten in der Bauindustrie und in landwirtschaftlichen Produkten (insgesamt 54 Prozent) kann davon ausgegangen werden, dass mehr als die Hälfte der gewonnenen Rezyklate zu geringerwertigen Endprodukten verarbeitet werden.

Bei der Betrachtung der Herkunft der produzierten Rezyklate im Jahr 2017 zeigt sich, dass 54,1 Prozent der Kunststoff-Rezyklate aus Produktions- und Verarbeitungsresten und 45,9 Prozent aus Post-Consumer Abfällen stammen (Allassali et al. 2019). Im Vergleich des Anfalls von Post-Consumer Abfällen (5,2 Millionen Tonnen) und Produktionsabfällen (0,95 Millionen Tonnen) aus demselben Jahr wird deutlich, dass nur ein geringer Teil der Post-Consumer Abfälle zu Rezyklaten verarbeitet wird (Conversio Market & Strategy GmbH 2018).

Trotz rückläufiger Kunststoffverarbeitungsmenge ist der Rezyklat-Einsatz zwischen den Jahren 2017 und 2019 um circa 10 Prozent auf circa 1,9 Millionen Tonnen gestiegen (vgl. Abbildung 14) (Conversio Market & Strategy GmbH 2020).

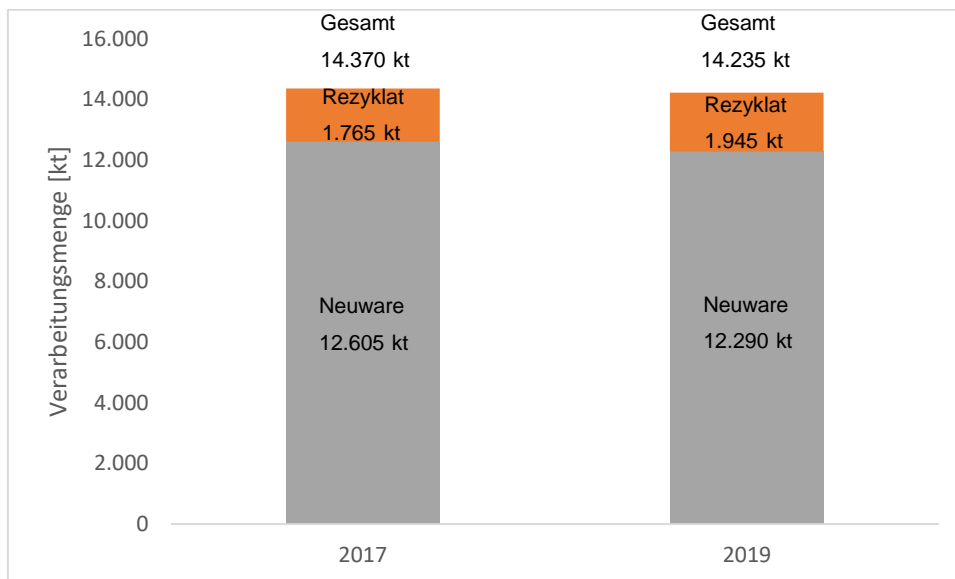


Abbildung 14: Vergleich der Kunststoffverarbeitungsmengen in Deutschland zwischen den Jahren 2017 und 2019 (Conversio Market & Strategy GmbH 2020)

Am Beispiel der Firma Werner & Merz GmbH wird erläutert, wie Rezyklate aus dem Post-Consumer Bereich in die Produktion einfließen können. Die Firma Werner & Merz GmbH stellt Reinigungs- und Pflegeprodukte für den Haushalt her. Für die Herstellung der Verpackungen werden die Rezyklate in granulierter Form in einen Extruder gesaugt und aufgeschmolzen. Unter Druckluft werden Flaschen geformt und überschüssiges Material abgeschnitten. Aufgrund der granulierten Form der Rezyklate kann eine standardisierte Anlage die recycelten Granulate komplett oder in Verbindung mit Neukunststoffgranulaten zu neuen Verpackungsmaterialien weiterverarbeiten (DSD – Duales System Holding GmbH & Co. KG 2020b).

4.8 Recyclinganlagen in Deutschland

Bundesweit existieren 62 Sortieranlagen (Stand 2017), die den LVP-Abfall in Stofffraktionen aufteilen und zur weiteren Verwertung vorbereiten (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2019). Trotz intensiver Internet- und Fachliteraturrecherche sowie Telefoninterviews konnten nur die in Abbildung 15 vorhandenen LVP-Sortieranlagen ermittelt werden. Aufgrund von Verschwiegenheiten der Anlagenbetreiber mit Verweisen auf Betriebsgeheimnisse konnten über die maschinelle Ausgestaltung keine Kenntnisse über den Stand der Technik gewonnen werden. Die häufig verwendeten Verfahrensschritte werden in Kapitel 4.5.2. beschrieben.

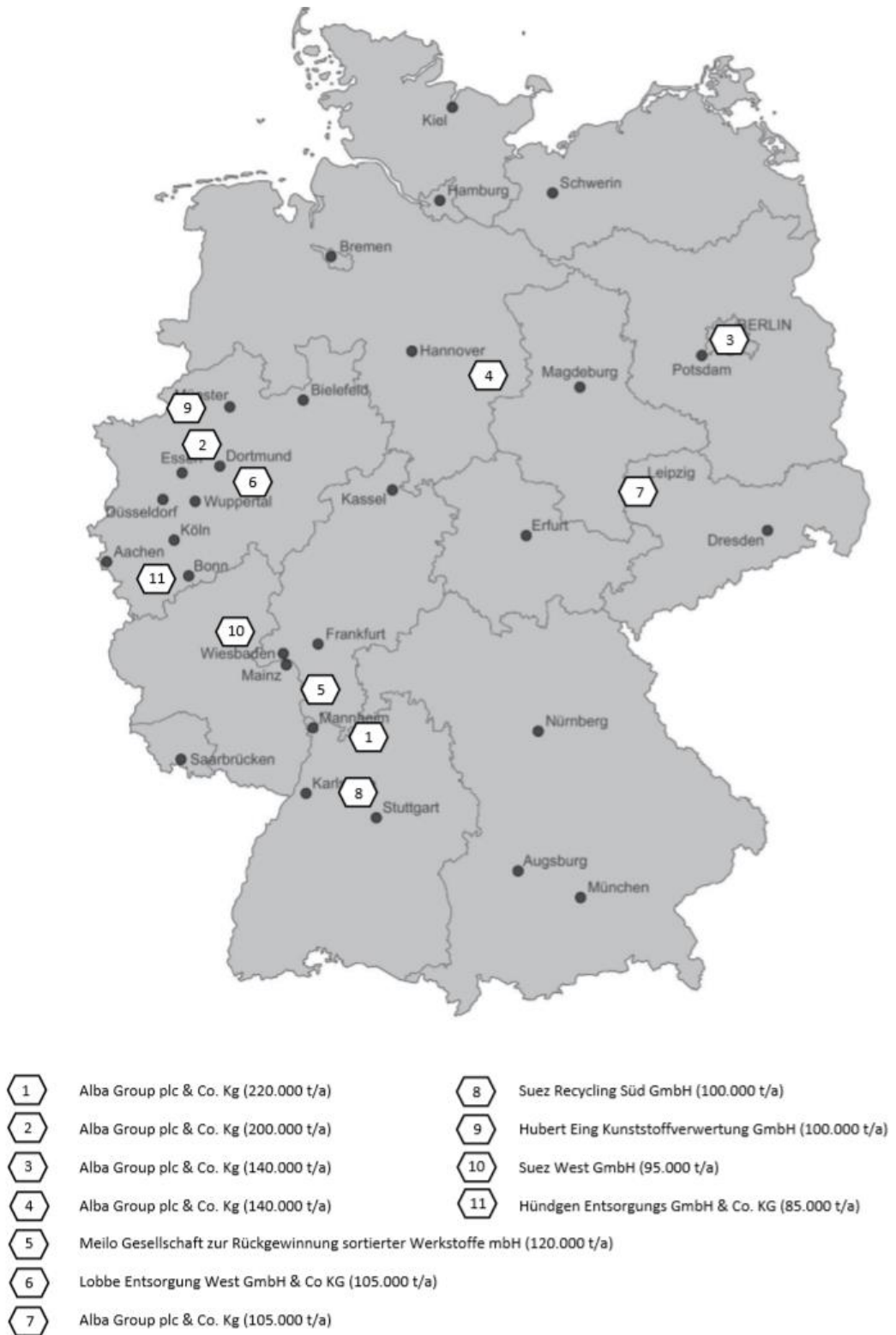


Abbildung 15: Standorte der größten LVP-Sortieranlagen in Deutschland (nach eigener Recherche/ Kartengrundlage: © ii-graphics/Adobe Stock)

5 Hemmnisse eines hochwertigen Recyclings

Das Recycling von Kunststoffabfällen aus dem LVP-Abfall wird durch mehrere Faktoren erschwert. Im Folgenden werden Hemmnisse einer hochwertigen Sortierung, der Effekt von Verunreinigungen auf die Recyclbarkeit von Leichtverpackungskunststoffen und Degradationseffekte erläutert.

5.1 Hemmnisse einer hochwertigen Sortierung

Eine effektive Sortierung ist die Grundvoraussetzung für ein hochwertiges werkstoffliches Recycling. Die aktuell praktizierenden Sortieranlagen für den Leichtverpackungsabfall erreichen eine Sortierquote von bis zu 55 Prozent. Knapp die Hälfte des Input-Materials kann keiner Fraktion zugeordnet werden und gelangt in die energetische Verwertung (vgl. Kapitel 2.2.2.). Bezogen auf die Kunststofffraktion des Leichtverpackungsabfalls sind 16 Prozent nicht-recyclbare Kunststoffe. Sie bestehen aus Verbunden oder sind durch Banderolen beziehungsweise schwarze Farbe maskiert (Günther und Vogt 2018). Das Produktdesign, technische Grenzen beim Recycling und die damit einhergehenden geringen ökonomischen Handlungsspielräume der sortierenden Unternehmen sind Gründe für diese Quote (Götz 16.11.2020; Thiel et al. 2018).

In Abbildung 16 wird ein Überblick über die verschiedenen LVP-Fraktionen gegeben, die über traditionelle Sortier- und Recyclingmethoden nicht wertstofflich recycelt werden können.

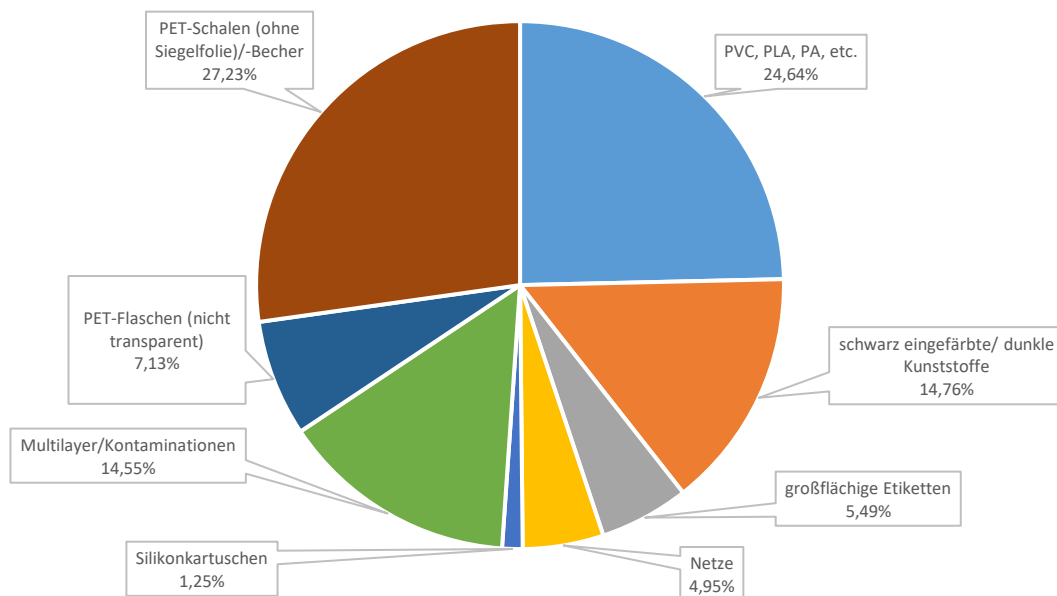


Abbildung 16: Nicht-recyclbare Kunststofffraktionen des LVP Abfalls (Christiani 2017)

Im Folgenden werden die wichtigsten Faktoren erläutert, die ein hochwertiges werkstoffliches Recycling einschränken.

5.1.1 Verbundmaterialien

Für Verpackungshersteller sind Verbundverpackungen, zu denen auch Tiefzieh- und Schalenverpackungen zählen, aufgrund der vielseitig einstellbaren Produkteigenschaften von Vorteil. Sie sind elastisch, leicht und schützen das Produkt vor äußeren Einwirkungen. Bezüglich eines Recyclings gestaltet sich die Sortierung der teilweise mehrschichtig aufgebauten Verpackungen als schwierig. Die PET-Fraktion aus dem Gelben Sack/der Gelben Tonne besteht vor allem aus nicht-transparenten Flaschen oder mehrschichtigen Tiefziehschalen. Diese können aufgrund von Färbungen, Kleberresten und Fremdstoffen zum größten Teil nicht identifiziert werden und gelangen als Sortierrest in die energetische Verwertung (Dehoust o.J.). Andere Verbundverpackungen werden meistens geführt von dem dominierenden Stoff in den Sortieranlagen abgetrennt. Die in geringeren Mengen vorhandenen Stoffe gehen in der Folge einer hochwertigen Verwertung verloren. Am Beispiel eines Flüssigkeitskartons lässt sich dies verdeutlichen. Ein Flüssigkeitskarton besteht in der Regel aus drei Komponenten: einer außenliegenden Papierfraktion, einer den Inhalt schützenden Alu- und einer stabilisierenden Kunststofffraktion. In der Sortieranlage wird der Flüssigkeitskarton der NE-Metallfraktion zugeordnet, da der Aluminiumanteil des Kartons über den Wirbelstromabscheider magnetisch abgestoßen und aussortiert wird. Der Kunststoffkorpus und die Papierfraktion gehen im weiteren Prozessverfahren verloren. Da der Wirbelstromabscheider Verpackungen ab einem Aluminiumgehalt von 2 Massenprozent als NE-Metall aussortiert, werden auch Verpackungen mit kleinen Aluminiumanteilen der NE-Fraktion zugeordnet.

In Abbildung 17 ist eine Verbundverpackung dargestellt, die zum größten Teil aus Kunststoff besteht. Aufgrund der Aluminiumlegierung im Inneren der Verpackung wurde die Verpackung über den Wirbelstromabscheider der NE-Metallfraktion zugeordnet. Die Kunststofffraktion kann in der Folge nicht werkstofflich recycelt werden.

Traditionelle Methoden sind daher nicht für eine Sortierung von Verbundverpackungen geeignet (Falter et al. 2017). Kann die Verbundverpackung keiner Fraktion zugeordnet werden, wird sie der energetischen Verwertung zugeführt (Bücklein 2020).



Abbildung 17: Verbundverpackung mit Aluminiumanteilen

5.1.2 Schwarze Materialien und bedruckte Kunststoffe

Mit Ruß eingefärbte schwarze Verpackungen sind ein weiteres Hemmnis in Bezug auf ein hochwertiges Recycling. Diese sind wegen des günstigen Farbstoffes preiswerter in der Herstellung als farbige Verpackungen (Götz 16.11.2020). Für die Sortierung nach Kunststoffarten wird der Abfallstrom hauptsächlich mittels NIR-Sensoren analysiert. Aufgrund der starken Lichtadsorption schwarzer Stoffe wird das von den Sensoren ausgesendete Licht kaum reflektiert. Daher kann keine stoffspezifische Zuordnung gewährleistet werden. Die schwarz eingefärbten Verpackungen gelangen trotz einer Recyclingfähigkeit von über 90 Prozent in die energetische Verwertung (Ebbing 2020; Christiani 2017).

Neben der nicht-Detektierbarkeit von schwarzen Materialien schränken auch wasserunlösliche Druckerfarben die Recyclbarkeit der Kunststoffe ein (Al-Salem et al. 2009). Die Eigenschaften der Regranulate können durch die Anhaftung der Farbe und der einhergehenden Belastung auf das Material beeinträchtigt werden. Trotz der Entwicklung diverser Techniken wie Schleifverfahren, Hochtemperaturfarbentfernungsverfahren oder Abriebverfahren ist keine dieser Technologien vollständig zufriedenstellend. Gründe dafür sind erhöhte Degradationsprozesse während der Aufbereitung (Al-Salem et al. 2009).

5.1.3 Banderolen

Banderolen werden von Unternehmen eingesetzt, um die Aufmerksamkeit der Konsumenten auf das Produkt zu lenken und um Informationen über das Produkt abzubilden. Verschattet die Banderole die Produktoberfläche der Kunststoffverpackung zu mehr als 50 Prozent, analysieren die Nahinfrarotsysteme die stoffliche Zusammensetzung der Banderole anstelle der stofflichen Zusammensetzung der Verpackung (Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) 30.08.2019). Eine Kunststoffverpackung, die aus PE-HD besteht, wird aufgrund einer verschattenden PE-LD-Banderole der PE-LD-Fraktion zugeordnet (Götz 16.11.2020). In Abbildung 18 (*rechts*) ist eine Kunststoffverpackung dargestellt, die durch Verschattungseffekte der Banderole einer falschen Kunststofffraktion zugeordnet wurde. Die Kunststoffverpackung in Abbildung 18 (*links*) wird zum größten Teil von einer Banderole verschattet. Dadurch, dass die Banderole zusätzlich eine schwarze Färbung auf der Innenseite aufweist, ist die Separation der Kunststoffverpackung in die richtige Kunststofffraktion unmöglich.



Abbildung 18: Verschattung durch Kunststoffbänderolen. Links: Produktumhüllende Kunststoffbänderole mit schwarzer Innenfärbung. Rechts: Fast vollständige Oberflächenverschattung durch die Banderole.

5.1.4 Fehlerhaftes Entsorgungs- und Trennverhalten

Neben einem nicht-recyclinggerechten Design haben auch Konsumenten durch ihr Entsorgungs- und Abfalltrennverhalten einen Einfluss auf die Recyclingquote. Durch das Entfernen eines Verschlussdeckels oder das Abziehen von Aludeckeln von Joghurtverpackungen können beide Stoffe sortenrein voneinander getrennt werden. In Abbildung 19 ist ein Joghurtbecher der NE-Metallfraktion zugeordnet worden, da der

Aluminiumdeckel nicht entfernt wurde. Die Kunststofffraktion des Joghurtbechers wird dem hochwertigen Recycling entzogen. Stapelung von Behältnissen und die Befüllung von hohlen Verpackungen mit anderen Materialien führen ebenfalls zu Wertstoffverlusten. Auch die Entsorgung stark verschmutzter Materialien schränkt ein hochwertiges Recycling ein. Diese lassen sich, abhängig vom Grad der Verschmutzung, sortieren, können sich aber in der anschließenden Verwertung als problematisch erweisen (Ebbing 2020).

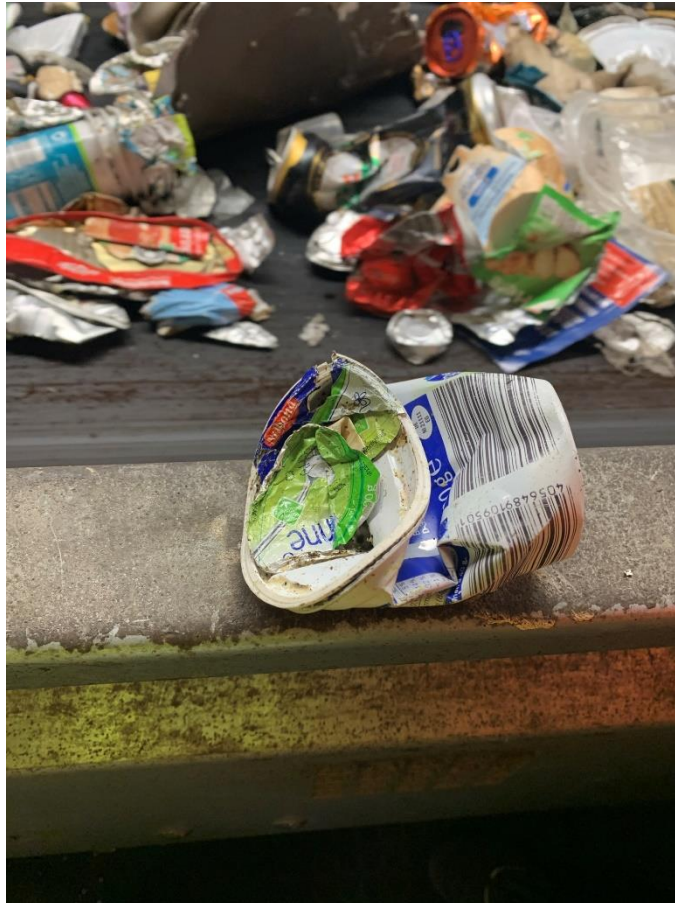


Abbildung 19: Kunststoffverpackung mit Aluminiumdeckel in der Aluminiumfraktion

Neben der fehlenden Auftrennung der einzelnen Fraktionen entstehen weitere Wertstoffverluste durch Fehlwürfe oder Störstoffe. Produkte aus Gummi wie Fahrradreifen, Kabelkanäle oder Schlauchboote werden mit einem Masseanteil von bis zu 30 Prozent aus dem Input der Sortieranlagen entfernt (Feil 2020).

5.2 Verunreinigungen

Nicht nur das Verpackungsdesign und Sortierfehler der Endnutzer schränken ein hochwertiges Recycling ein. Ein hoher Anteil von (unbekannten) Begleitstoffen und Chemikalien (Weichmacher, Farben, etc.) erschwert die Produktion hochwertiger Rezyklate (Thomé-Kozmiensky und Goldmann 2009). Begleitstoffe und Chemikalien können aus aktiv im Produktionsprozess beigemischten Stoffen bestehen oder aus Stoffen, die während der Nutzungsphase in die Polymermatrix des Produktes hineindiffundieren.

Kunststoffverpackungen aus Polyolefinen, die durch Additive oder Füllstoffe eine Dichte von $0,995 \text{ g/cm}^3$ überschreiten, werden als nicht recyclingfähig eingestuft (Verpackungsregister Zentrale Stelle 2020). Das Reinigen der Kunststoffe gestaltet sich aufgrund der Verunreinigungen in der Polymermatrix schwer. Werden diese in der Aufbereitung nicht entfernt, können sie zu Fehlstellen, Unverträglichkeiten oder zu Wechselwirkungen mit den Polymermolekülen und in der Folge zu Qualitätseinbußen des Polymers führen (Hopmann und Michaeli 2017). Hochpolymere Kunststoffe wie PE sind gegenüber schwachen Oxidationsmitteln sowie gegen Basen und Säuren beständig. Werden Substituenten wie Hydroxyl-, Acetyl oder andere funktionelle Gruppen in die Polymermatrix eingesetzt, sinkt die chemische Beständigkeit des Kunststoffes. Die Polarität des Kunststoffes und des Mediums haben dabei einen wesentlichen Einfluss auf den Grad der Eigenschaftsänderungen eines Kunststoffes. PE und PS sind unpolare Kunststoffe. Im Kontakt mit einem unpolaren Lösemittel werden diese Kunststofffraktionen gelöst oder quellen auf. Das Aufquellen hat eine Erhöhung der Beweglichkeit der Makromoleküle zur Folge. Die Festigkeit und die Härte nehmen ab und elektrische sowie physikalische Eigenschaften verändern sich (Hopmann und Michaeli 2017). Die Vermischung unterschiedlicher Kunststofffraktionen kann zu Abbauprozessen führen. Am Beispiel der Wiederverwertung von PET wird dies verdeutlicht: Während des Extrusionsprozesses können durch eine Vermischung von PET und PVC säureproduzierende Zusammensetzungen entstehen. Die entstandene Säure fungiert als Katalysator für Kettenspaltungsreaktionen (Rudolph et al. 2020).

Neben Verunreinigungen innerhalb der Polymermatrix können Verunreinigungen auf der Oberfläche der Kunststoffe ebenfalls zu Qualitätsminderungen der Rezyklate führen. Das Entfernen von Farbe oder anderen Beschichtungsmaterialien auf Kunststoffoberflächen führt zu Spannungskonzentrationen, welche die Eigenschaften des Kunststoffes einschränken (Al-Salem et al. 2009).

5.3 Degradation von Kunststoffen

Ein wachsendes Problem des werkstofflichen Recyclings von Kunststoff(-abfällen) ist die Degradation (Abbau). Da chemische Reaktionen wie die Polymeraddition, die Polymerisation und die Polykondensation in der Theorie reversibel sind, kann die Energie- oder Wärmezufuhr eine Photooxidation und/oder mechanische Spannungen verursachen, die als Folge auftreten (Al-Salem et al. 2009). Recycelte Kunststoffe erfahren durch den Wiederaufbereitungsprozess eine Qualitätsminderung.

Der Verlust der Materialqualität von Kunststoffen tritt in drei Phasen des Recyclingkreislaufes auf (Lazarevic et al. 2010):

- in der Nutzphase (z.B. UV-Degradation),
- in der Sortier- und Trennphase als Resultat von Kontaminationen (säureproduzierende Teile, Wasser, Farbbestandteile) und
- während des Extrusionsprozesses (Verlust des Molekulargewichtes durch Kettenspaltungen).

Kunststoffleichtverpackungen können aufgrund der Degradationsprozesse nicht beliebig oft eingeschmolzen und erneut verformt werden. Um diese Prozesse in der Praxis zu kompensieren, wird in Abhängigkeit des Degradationsgrades des Kunststoffregranulates neues Kunststoffgranulat beigemischt. In diesem Kapitel werden vertiefende Informationen zu Degradationsprozessen von Kunststoffen vorgestellt.

Detaillierte Kenntnisse über die Degradation ausgewählter Kunststofffraktionen sind in Anhang 1 zusammengefasst.

5.3.1 Mechanische Degradation

Bei der Verarbeitung von (Re-)Granulat zu geformten Kunststoffteilen werden durch Schub- und Zugspannungen Polymerbindungen zerstört. Verursacht wird dies durch Scherung, Dehnung und Umlagerungsprozesse während der Extrusion. Durch die auftretende Scherung und Dehnung nehmen Spannungen mit steigender Kettenlänge und abnehmendem Abstand zum Kettenzentrum zu. Die Spannungen werden durch eine Einschränkung der Beweglichkeit der Kettensegmente aufgrund einer Temperaturabnahme nach dem Extrusionsprozess intensiviert. In der Folge übersteigen die Spannungen die innermolekularen Bindungskräfte und es kommt zu Kettenspaltungen. Aufgrund dieser Kettenspaltungen bilden sich Radikale an den Bruchstellen. In Verbindung mit chemischen Reaktionen der Radikale kann es zu weiteren Veränderungen der Molekülstruktur und einer weitergehenden Degradation kommen.

5.3.2 Chemische Degradation

Durch ihren makromolekularen Aufbau sind Kunststoffe anfällig für chemische Alterungsvorgänge. Schwache Bindungskräfte auf molekularer Ebene sind der Grund für den großen Einfluss von Licht, Wärme und Sauerstoff auf den Kunststoff. Chemikalien und UV-Strahlung sind weitere Auslöser für Alterungsvorgänge. Bei der chemischen Degradation führen Änderungen im molekularen Maßstab zu Kettenbrüchen, Zyklisierung und Neuvernetzungen. Die durch Kettenspaltung entstandenen Radikale reagieren durch Isomerisierung, Dimerisierung, Oxidation oder Reduktion und bewirken in der Folge eine Veränderung der Molekülstruktur (Ehrenstein und Pongratz 2007). Einige Eigenschaften von

Kunststoffen können als Indikatoren für die Qualität der recycelten Polymere verwendet werden. Diese sind die Kristallinität, das Schmelzverhalten, die Morphologie, die thermische Vorgeschichte und das viskoelastische Verhalten (Vilaplana und Karlsson 2008).

Im Folgenden werden drei verschiedene Prozesse der chemischen Kunststoffdegradation erläutert.

5.3.2.1 *Thermische Degradation*

Unter thermischer Degradation versteht man den Abbau der Polymerketten bei erhöhten Temperaturen und ohne Sauerstoffeinwirkung. Die überwiegend für Kunststoffverpackungen verwendeten Polyolefine (PP und PE) sind gegenüber thermischen Einflüssen relativ beständig (Ehrenstein und Pongratz 2007). Bei den Extrusionsprozessen wird mit Temperaturen von bis zu 300 °C und mit Drücken von circa 200 bar gearbeitet. Bei diesen Belastungen wird die innere Energie innerhalb der Polymerketten erhöht. Übersteigt die innere Energie die Bindungskräfte der Atome, bilden sich Bindungsbrüche entlang der Polymerkette. Kettenbrüche sind die häufigste Ursache für Degradationen von Polyolefinen. Wie bereits im Kapitel 5.3.1. beschrieben wurde, entstehen durch Bindungsbrüche Radikale an den Enden der Polymerketten. Durch die erhöhte innere Energie nimmt auch die Beweglichkeit der aufgenommenen Stoffe zu. Dies kann zu einer Migration der Stoffe durch das Polymer und zu einer Reaktion mit den entstandenen Radikalen führen (Rudolph et al. 2020).

5.3.2.2 *Autoxidation*

Der Abbau von Polyolefinen durch Oxidationsreaktionen wird durch eine Inkubationszeit charakterisiert. Nach dem Verlust der Stabilisatoren beginnt die Autoxidation (Ehrenstein und Pongratz 2007). Als Autoxidation wird eine Oxidationsreaktion durch den Luftsauerstoff verstanden. Diese Reaktion läuft in der Regel sehr langsam und ohne zu beobachtende Wärmeentwicklung ab. Die Oxidationsreaktion führt zu Kettenspaltungen und zu einer Abnahme der molaren Masse. Durch die gewonnene Beweglichkeit der gespaltenen Kettenglieder können diese rekristallisieren. Die Bildung von Oberflächenrissen und Verfärbungen sind weitere Folgen des Degradationsprozesses (Ehrenstein und Pongratz 2007).

5.3.2.3 *Thermisch-oxidative Degradation*

Unter thermisch-oxidativer Degradation wird der Abbau von Polymerketten in Kunststoffteilen durch Wärmeenergie unter Sauerstoffanwesenheit verstanden. Während die Autoxidation bei Raumtemperaturen langsam verläuft, ist der Prozess der thermisch-oxidativen Degradation stark temperaturabhängig. Steigende Temperaturen führen zu einer exponentiellen Beschleunigung entsprechender Reaktionen (FSKZ Fördergemeinschaft für das Süddeutsche

Kunststoff-Zentrum e.V. o.J.). Ein Grund dafür ist die niedrige Aktivierungsenergie (59 kJ/mol) für den Oxidationsprozess (Ehrenstein und Pongratz 2007). Trifft energetische Strahlung in Form von erhöhten Temperaturen auf das Kunststoffprodukt, liefert diese die Aktivierungsenergie für die Reaktion und fungiert so als Initiator der oxidativen Degradation des Kunststoffes. Die oxidative Reaktion stellt allgemein den wichtigsten Degradationsprozess für Kunststoffe dar (Hopmann und Michaeli 2017).

5.3.3 Methoden der Detektion von Degradationsprozessen

Um den Grad der Degradation von Kunststoffregranulaten bestimmen zu können wurden einige Verfahren entwickelt.

Die *melt mass flow rate* (MFR) beschreibt, wie viel Gramm Material bei konstanter Last innerhalb von zehn Minuten durch eine schmale Kapillare fließt (Rudolph et al. 2020). Je geringer die MFR, desto viskoser ist ein Material. Quervernetzungen, die während des Extrusionsprozesses entstehen, führen zu einer Abnahme der MFR, während eine steigende MFR auf Kettenbrüche hindeutet.

Ein wichtiges Werkzeug zur Überwachung von Oxidationsreaktionen ist die *Chemolumineszenz*. Sie wird zur Bewertung der thermo-oxidativen Stabilität von recycelten Polymeren eingesetzt. Deaktivierungen von aktivierten Carbonylgruppen, die während der Oxidation gebildet wurden, lassen sich mittels Chemolumineszenz nachweisen.

Bei der *Raman- und FTIR-Spektroskopie* können Veränderungen in der chemischen Struktur, die über den Lebenszyklus des Kunststoffes auftreten, detektiert werden. Dafür werden Informationen über verschiedene funktionelle Gruppen gesammelt und ausgewertet. Die Quantifikation spezieller funktioneller Gruppen kann Rückschlüsse auf Degradationsprozesse geben.

5.3.4 Degradation und Stabilisation von Regranulaten

Die Auswirkungen der Degradation von Kunststoffregranulaten sind unter Experten umstritten. Einerseits wird die Ansicht vertreten, dass sich Degradationserscheinungen von Kunststoffen bei der Vermischung der Polymere während des Aufbereitungsprozesses gegenseitig aufheben. Der Degradation von Kunststoffen kommt daher eine eher untergeordnete Rolle bezüglich des Recyclings zu (Glaz 30.11.2020). Andererseits wird behauptet, dass die Bestimmung des Degradationsgrades der Regranulate für den Einsatz des Sekundärrohstoffes wichtig sei. Anhand dessen könne die Anzahl der bereits erfolgten Wiederaufbereitungsschritte bestimmt und die Vermischung mit Rohmaterial gesteuert

werden. Nur so können qualitative Aussagen hinsichtlich Verarbeitungsparameter und Lebensdauereigenschaften der späteren Produkte getroffen werden. Die Bedeutung von Degradationseffekten steige mit einem wachsenden Anteil an rezyklierten Kunststoffen im Leichtverpackungsabfall. Diese These unterstützen Untersuchungen an Regranulaten in einem Labor in Eisfeld. Um die Eigenschaften und die Qualität der Regranulate bestimmen zu können, werden aus den Regranulat-Chargen Stichproben entnommen. Der Umfang der Untersuchung richtet sich nach dem Polymertyp. Polymere aus PE-LD werden auf die Parameter Feuchtegehalt, Dichte, MFR und Schüttgewicht getestet. Bei dem reineren Regranulat PE-HD kommen ergänzend die Parameter Schlagzähigkeit, Zugfestigkeit, Wärmekapazität, E-Modul, Farbe und Opazität hinzu. Aus den Untersuchungen des Labors geht hervor, dass sich über die letzten Jahre die MFR erhöht. Gleichzeitig wird das Material spröder (Schneider 02.12.2020). In Verbindung mit einer wachsenden Rezyklat-Einsatzquote deutet dies darauf hin, dass sich die Regranulat-Eigenschaften mit jedem Recyclingzyklus verändern.

Durch die Zugabe von Additiven können Degradationsprozesse der Kunststoffe während der Gebrauchsphase und der Verarbeitungsphase eingeschränkt werden. Als Additive werden alle anorganischen und organischen Substanzen bezeichnet, welche eine oder mehrere Eigenschaften von Polymeren verändern (La Mantia 1998).

Zu den wichtigsten Klassen von Additiven bezüglich des Kunststoffrecyclings gehören (La Mantia 1998):

- *Antioxidantien und Stabilisatoren*: verzögern den Abbau der Polymere
- *Kompatibilisatoren*: Verbesserung der Verträglichkeit zwischen inkompatibler Polymeren
- *Trockenmittel*: Entfernen die Feuchtigkeit im Rohstoff während des Verarbeitungsprozesses
- *Kettenverlängernde Additive*: Kettenverlängerung durch Polyaddition

Die Zugabe neuer Stabilisatoren während des Recyclings (Restabilisierung) kann sowohl zum Schutz des thermomechanischen Abbaus während der Verarbeitung als auch zur Verbesserung der Langzeitstabilität der recycelten Produkte beitragen. Eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften ist mit Stabilisatoren nicht möglich. (Vilaplana und Karlsson 2008). Die Verwendung bestimmter Zusatzstoffe wie Radikalgeneratoren oder reaktive funktionelle Gruppen bewirken eine Neuvernetzung der gebrochenen Polymerketten und erhöhen das Molekulargewicht. Dadurch werden die mechanischen und rheologischen Eigenschaften verbessert. Eine weitere Form des Upgradings von recycelten Kunststoffen ist die Zugabe von kettenverlängernden Additiven. Dies wurde an PET getestet. Dabei reagiert die PET-Hydroxylgruppe während der reaktiven Extrusion mit der Carbonylengruppe des

Additivs. Durch Polyaddition kommt es zu Kettenverlängerungen, die einer steigenden MFR entgegenwirken (Vilaplana und Karlsson 2008).

5.3.5 Weitere Herausforderungen des Kunststoffrecyclings

Neben Degradationseffekten und Einschränkungen der Sortierung steht das Recycling von Kunststoffleichtverpackungen vor weiteren Problemen. Bezüglich des gesamten Recyclingprozesses herrscht Unklarheit über die beste technologische Lösung der jeweiligen Verfahrensschritte. Der fehlende Austausch über effektivere Prozessführungen und technische Innovationen der recycelnden Unternehmen wirkt sich nachteilig auf die Recyclingbranche aus (Alassali et al. 2019). Eine einbrechende Nachfrage nach Kunststoffregranulaten führt zu unwirtschaftlichen Produktionsbedingungen. Für kunststoffverarbeitende Unternehmen lohnt sich der Einsatz von Kunststoffregranulaten erst ab einem Rohölpreis von 70 US-Dollar pro Barrel (Thomé-Kozmiensky und Goldmann 2009). Durch die seit dem Jahr 2012 gefallen Rohölpreise bieten Kunststoffneuewaren deutliche Preisvorteile gegenüber dem möglichen Rezyklat-Einsatz. In Abbildung 20 ist die Entwicklung des Durchschnitts des Rohölpreises der OPEC Länder dargestellt.

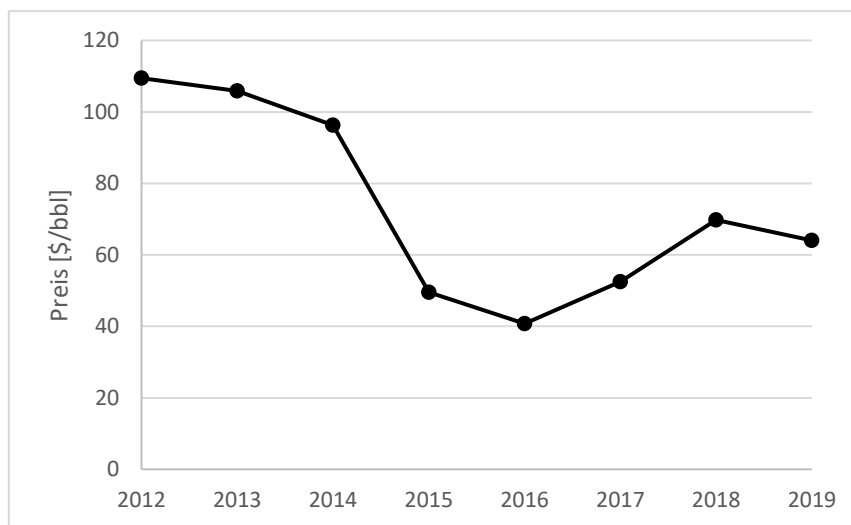


Abbildung 20: Entwicklung des Rohölpreises (2012 bis 2019) (Mineralölwirtschaftsverband e.V. 2021)

6 Forschung und Best Practice Beispiele zum Kunststoffrecycling

In dem folgenden Kapitel werden Best Practice Beispiele und Forschungsprojekte zum Recycling von Kunststoffleichtverpackungen vorgestellt.

6.1 Neue Verfahrensansätze für Sortieranlagen

Die nach meinen Recherchen modernste Sortieranlage für LVP-Abfall in Europa befindet sich in Ölbronn. Die Anlage zeichnet sich durch ein erstmalig eingeführtes automatisiertes Bunkermanagementsystem aus, welches zu einer Effizienzsteigerung bezüglich des Durchsatzes beiträgt. Dafür wird eine definierte Materialmenge automatisch aus dem Produktbunker entnommen und die jeweiligen Fraktionen zur momentan freien Ballenpresse transportiert. In Bezug auf die Erhöhung der Sortierquote wurde in der Sortieranlage in Ölbronn ein neues Konzept der Prozessführung angewandt. Dabei wird zunächst mittels NIR-Spektrometer die gewünschte Kunststofffraktion, danach mit einem zweiten NIR-Spektrometer die im Materialstrom verbleibenden Störstoffe aussortiert. Das Material, welches sich nach den beiden Sortierschritten auf dem Band befindet, gelangt über ein Rückgewinnungsband erneut in den Sortierprozess, sodass die im ersten Durchlauf nicht identifizierte aber recycelbare Fraktion in einem zweiten Durchlauf aussortiert und einem werkstofflichen Recycling zugeführt werden kann (Reichenbach 2020).

Trotz des integrierten Rückführbandes können in der Sortieranlage in Ölbronn keine PET-Schalenverpackungen aussortiert werden. Die PET-Rezyklat-Initiative von Werner & Mertz beschäftigt sich unter anderem mit dieser Problematik. Durch einen zusätzlichen Sortierschritt können PET-Flaschen aus dem Materialstrom aussortiert und anschließend aufbereitet werden (Dehoust o.J.). Ein System, welches dünne PET-Flaschen, PET-Schalen und Silikonkartuschen unterscheiden und abtrennen kann ist die Hyper Spektral Imaging Technologie der Firma Steinert GmbH (Steinert GmbH 2021). Der Aufwand ist durch den zusätzlichen Sortierschritt geringfügig höher, es können jedoch höhere Recyclingquoten erreicht werden.

Neben der Sortierung von verschiedenen PET-Materialien stellt die Sortierung schwarzer Kunststoffe eine weitere Herausforderung für die konventionelle Sortiertechnik dar. Einige Firmen haben über verschiedene Ansätze Systeme entwickelt, die auch schwarze Materialien detektieren können. Hyperspektralkameras der Firmen Specim (FX 50) und Steinert (UniSort BlackEye) arbeiten für die Identifikation schwarzer Kunststoffe nicht im NIR-Frequenzbereich sondern im mittleren Infrarot Bereich (MIR). Eine andere Möglichkeit zur Identifikation schwarzer Kunststofffraktionen ist die Integration von Radarkameras. Diese arbeiten im Tetraherz-Strahlungsbereich. Elektrostatische Separatoren, deren Trennwirkungen auf einer

unterschiedlichen elektrischen Aufladung der verschiedenen Kunststofffraktionen beruhen, sind weitere Alternativen zur Trennung von durch optische Systeme nicht-identifizierbare Materialien (bvse 2020).

Neben nicht-detektierbaren Kunststoffen sind mehrschichtige Verpackungen ein weiteres Hemmnis im Hinblick auf ein hochwertiges Recycling. Für die Separation der verschiedenen Schichten hat die Neidhardt Recycling GmbH ein Verfahren entwickelt. Mit dem Trennverfahren werden aktuell PVC-Aluminium-Verbundfolien, die für Blisterverpackungen genutzt werden, in die einzelnen Materialfraktionen aufgeteilt. Dabei wird die Verbundfolie in 20 mm große Stücke zerkleinert und einer Zentrifuge zudosiert. Durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit zwischen einem Stator und einem Rotor entsteht ein Luftstrom, der das Aluminium von dem Kunststoff trennt. Die Aluminiumfolie verformt sich während des Prozesses, wohingegen die PVC-Folie ihre flache Form beibehält. Aluminium und PVC werden im Anschluss durch Siebe und elektrostatische Aufladungen voneinander getrennt (VinyIPlus 2015).

6.2 Weiterentwicklung von Kunststoffverpackungen

Neben der Entwicklung neuer Technik für LVP-Sortieranlagen arbeiten einige Unternehmen und Forschungsinstitute an der Weiterentwicklung von Kunststoffverpackungen bezüglich eines Designs for Recycling. Im Folgenden werden Projekte von Unternehmen vorgestellt, die die Recyclingfähigkeit von Produkten erhöhen können.

6.2.1 Projekt MaReK

Die Projektteilnehmer des Forschungsprojektes „MaReK – Marker-basiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen“ untersuchen die Eignung von Fluoreszenz-Markern für den abfallwirtschaftlichen Einsatz. Ziel des Projektes ist der Aufbau eines Marker-basierten Sortier- und Recyclingsystems. Dafür haben die Projektteilnehmer einen anorganischen Marker entwickelt, der in das Verpackungsmaterial integriert wird. Während des Sortierprozesses emittieren die anorganischen Marker durch eine Anregung einer speziellen Wellenlänge mittels Infrarotstrahlung fluoreszierendes Licht. Das emittierte Licht kann von speziellen Kameras detektiert und ausgewertet werden. Die Marker-Partikel werden in geringen Mengen dem Kunststoff im Produktionsprozess zugeführt. Je nach Kunststofffraktion werden unterschiedliche Marker-Partikel verwendet. Nach der Nutzungsphase können die verschiedenen Kunststofffraktionen im Sortierprozess durch die fluoreszierenden Partikel sortenrein getrennt werden. Der Vorteil der Marker-basierten Sortiertechnik besteht gegenüber bestehender Sortiertechnik in der Differenzierung von fast identischen Kunststofffraktionen (Polysecure GmbH 2019). Nachteilig an der Verwendung von

Markern ist die Möglichkeit einer Verschleppung während des Aufbereitungsprozesses in andere Kunststofffraktionen. Zur Umsetzung eines Marker-basierten Recyclings müssten Investitionen sowohl seitens der Inverkehrbringer als auch seitens der Sortierer getätigt werden (Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall 2020).

6.2.2 Projekt Holy Grail 2.0

Im Projekt Holy Grail 2.0 wurde ein digitales Wasserzeichen für Kunststoffverpackungen entwickelt, welches für den Konsumenten kaum sichtbar ist und sich den Projektteilnehmern zufolge problemlos von speziellen Scannern in einer LVP-Sortieranlage auswerten lässt. Die hinterlegten Informationen bilden die gesamte Wertschöpfungskette ab, die das Produkt durchlaufen hat. Dadurch können Rückschlüsse auf Degradationseffekte und die Zusammensetzung der Kunststoffabfälle gezogen werden. In Abbildung 21 ist ein digitales



Abbildung 21: Das digitale Wasserzeichen ist von geeigneten Scannern identifizierbar (Henkel AG & Co. KGaA 2020)

Wasserzeichen auf einer Kosmetikverpackung aufgedruckt. Die Vorteile des digitalen Wasserzeichens sind eine unbegrenzte Anzahl an Codes, die zur Identifizierung verwendet werden können, und die Möglichkeit der Entfernung des Codes während der Aufbereitung. Im Rahmen der Inbetriebnahme einer industriellen Versuchsanlage wird die Funktionsfähigkeit der Wasserzeichen-Technologien zur Sortierung der Verpackungsabfälle erprobt (Henkel AG & Co. KGaA 2020).

6.2.3 Vollständig recycelbare Verpackung

Bezüglich eines recyclingrechten Verpackungsdesigns hat die Firma Werner und Mertz mit ihrer Marke „Frosch“ nach eigenen Angaben einen Standbodenbeutel entwickelt, der mit traditionellen Sortier- und Recyclingtechnologien zu 100 Prozent recyclingfähig ist (Abbildung 22). Der Beutel ist zu einem Großteil (85 Prozent) unbedruckt. Dies erleichtert die Identifikation der Kunststofffraktion durch NIR-Spektrometer. Die bedruckte Banderole ist aufgrund des

Verzichts recyclingeingeschränkter Klebstoffe und Haftmittel vollständig recyclingfähig. Durch die Möglichkeit einer Wiederverwendung spart der Standbeutel bis zu 70 Prozent



Abbildung 22: Vollständig recycelbarer Standbeutel von Werner und Mertz (© Werner & Mertz GmbH)

Kunststoffmaterial gegenüber einer Kunststoffflasche ein. Die Institute cyclos-HTP und Interseroh bestätigen dem Standbeutel eine vollständige Recyclingfähigkeit, die nicht weiter optimiert werden könne (Werner und Mertz GmbH 2020a).

Ein Faktor, der zur vollständigen Recyclingfähigkeit des Standbeutels von Werner und Mertz beiträgt, ist die recyclinggerechte Druckerfarbe. Herkömmliche Standard-UV-Farben können schlecht im Deinking-Prozess entfernt werden, da sie eine feste, chemische und mechanisch-widerstandsfähige Schicht bilden. Diese sind fest mit dem Material verbunden, auf welchem sie aufgetragen wurden, und lassen sich nur schlecht durch einen Deinking-Prozess ablösen. In Kooperation mit der Firma Siegwirk wurden eine UV-Offsetfarbserie und spezielle UV-Flexo Lacke für den Verpackungsdruck entwickelt, die hervorragende Deinking-Eigenschaften besitzen (Werner und Mertz GmbH 2020b). Diese sind wasserlöslich und können während des Recyclingprozesses abgewaschen werden.

6.2.4 Rußfreies Masterbatch

Mit der Entwicklung eines rußfreien Masterbatches hat die Firma Henkel die Problematik von nicht sortierbaren rußgefärbten Kunststoffen aufgegriffen. Der alternative schwarze Farbstoff ermöglicht die Identifikation der schwarz gefärbten Kunststofffraktion über NIR-Spektrometer. In Abbildung 23 sind Kunststoffbehälter dargestellt, die mit dem alternativen Farbstoff von Henkel gefärbt wurden. Für die Entwicklung des alternativen Farbstoffes wurden Henkel und

das Partnerunternehmen Ampacet mit dem Recycling Award 2019 ausgezeichnet (Henkel AG & Co. KGaA 2019).



Abbildung 23: Von NIR-Spektrometern identifizierbare schwarz gefärbte Kunststoffverpackungen (Henkel AG & Co. KGaA 2019)

6.2.5 Einstoff-Tiefziehverpackungen

Dass PET-Tiefziehverpackungen recyclingfähig sein können, zeigt die Maag GmbH mit ihren kreislauffähigen Einstoff-Tiefziehverpackungen. Diese weisen Hochbarriere-Eigenschaften auf, verbrauchen bis zu 70 Prozent weniger Packmaterial als herkömmliche Tiefziehverpackungen und können die nicht recyclingfähigen PET-Tiefziehverpackungen substituieren (Maag GmbH; Middendorf 2019).

6.2.6 Kosmetikverpackung aus 100 Prozent Post-Consumer Rezyklat

In Bezug auf den Rezyklat-Einsatz haben die Firmen Werner & Mertz, Systec Plastics und EREMA eine Kosmetikverpackung entwickelt, die zu 100 Prozent aus Rezyklaten aus dem Gelben Sack besteht. Die Regranulate müssen hohen Qualitätsanforderungen wie Geruchsneutralität, gesundheitlicher Unbedenklichkeit und einer technischen Eignung genügen, um als Kosmetikverpackung verarbeitet werden zu können. In Bezug auf die Herkunft der Regranulate gestaltet sich die Erreichbarkeit der hohen Qualitätsanforderungen als schwierig. Die drei Unternehmen arbeiten aktuell an einer Weiterentwicklung ihrer Aufbereitungstechnik mit dem Ziel, Produkte in lebensmitteltauglicher Qualität aus Regranulaten aus dem Gelben Sack herzustellen (Werner und Mertz GmbH 2019).

Produkte wie der Standbeutel und die Kosmetikverpackung der Firma Werner und Mertz weisen unterschiedliche Materialeigenschaften auf. Der Standbeutel muss flexibel und transparent, die Kosmetikverpackung geruchsneutral und fest sein.

6.2.7 Kunststoff-Regranulate mit spezifischen Eigenschaften

Das Unternehmen Adis Plastics UG hat sich auf die Einstellung der spezifischen Eigenschaften von Kunststoffregranulaten spezialisiert. Dafür werden die Kunststofffraktionen analysiert und je nach geforderten Produkteigenschaften kombiniert. Die kombinierten Kunststofffraktionen werden im Anschluss zu Mahlgut zerkleinert und können zu Produkten mit gewünschten Eigenschaften weiterverarbeitet werden (Adis Plastics UG o.J.).

6.3 Initiativen und Forschungsprojekte

Im Folgenden werden zwei Projekte vorgestellt, die zeigen, dass der Einsatz von Kunststoff-Regranulaten aus dem Post-Consumer Bereich möglich und ungefährlich ist.

6.3.1 Hamburgs Wertstoff Innovative

Im Frühjahr 2019 wurde Hamburgs Wertstoff Innovative von fünf Projektpartnern gegründet, um eine geschlossene Wertschöpfungskette für Kunststoffe aus dem Gelben Sack und der gelben Tonne zu errichten. Die Teilnehmer der Initiative wollten zeigen, dass ein Recyclingkreislauf auf lokaler Ebene möglich ist. Das Ergebnis des Recyclingkreislaufes ist eine aus 100 Prozent recyceltem Plastik bestehende Waschmittelflasche. Als Ausgangsstoff dient die Kunststofffraktion des Hamburger LVP-Abfalls. Die Hamburger Städtereinigung sammelt den Abfall aus der Gelben Tonne und dem Gelben Sack als erstes Glied in der Verwertungskette ein und liefert ihn zu einer LVP-Sortieranlage. Dort wird der LVP-Abfall sortiert, der für das Projekt wichtige PE-HD Anteil zu Ballen gepresst und zerkleinert. Im Anschluss werden die zerkleinerten Flakes nach Farben sortiert, gereinigt und zu Regranulaten aufbereitet. Das Regranulat wird von einem kunststoffverarbeitenden Betrieb zu einer Waschmittelflasche verarbeitet. Die technische Universität Hamburg überwacht und prüft alle Prozessschritte und erarbeitet Optimierungsvorschläge für die Sortier- und Recyclingprozesse.

Mit ihrem Projekt zeigen die Hamburger Projektpartner, dass eine geschlossene Wertschöpfungskette auf regionaler Ebene möglich ist (Unilever Deutschland Holding GmbH 2021).

6.3.2 Rezyklat Initiative

Die Integration von PET-Regranulat aus dem Gelben Sack gestaltet sich aufgrund einer größtenteils nicht vorhandenen Sortierkapazität der LVP-Sortieranlagen schwieriger. Zur Herstellung von Reinigungs- und Spülmittelflaschen der Marke Frosch setzt die Werner und Mertz Rezyklat Initiative 100 Prozent PET-Regranulat ein. Für die Integration von PET-Regranulat aus dem Gelben Sack sortiert die Initiative in einen zusätzlichen Sortierschritt (vgl. Kapitel 6.1.1.) die PET-Fraktion aus dem LVP-Abfallstrom. Aktuell stammen 20 Prozent des

Regranulates aus dem Gelben Sack, 80 Prozent werden aus PET-Pfandflaschen hergestellt. Die Initiative plant für die nächsten Jahre eine Erhöhung des prozentualen Anteiles von Regranulaten aus dem Gelben Sack (Dehoust o.J.).

7 Diskussion und Vorschläge zur Optimierung des Recyclingprozesses

Um die vom Verpackungsgesetz vorgeschriebene werkstoffliche Verwertungsquote von 58,5 Prozent für Kunststoffverpackungen erreichen zu können, bedarf es einer genaueren Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette. Im Zuge dieser Betrachtung lassen sich für die einzelnen Glieder der Wertschöpfungskette Optimierungsvorschläge erarbeiten.

7.1 Optimierungsvorschläge zur rechtlichen Situation

Das Verpackungsgesetz betrifft alle Händler, Hersteller und Importeure, die Verpackungen auf dem deutschen Markt in Umlauf bringen. Durch die Verpflichtung zur Lizenzierung der in Umlauf gebrachten Verpackungen soll sichergestellt werden, dass diese in einem möglichst hohen Umfang gesammelt und werkstofflich verwertet werden können. Die Lizenzgelder beziehen sich dabei auf das Gewicht, die Materialart und die Menge der in Verkehr gebrachten Verpackungen. Die Recyclingfähigkeit der in Umlauf gebrachten Verpackung soll nach § 21 Absatz 1 VerpackG bei der Bemessung der Verpackungsentgelte berücksichtigt werden. In der Praxis wird dies nicht von den Dualen Systemen umgesetzt (Glaz 30.11.2020). Da die Dualen Systeme gewinnorientierte Marktteilnehmer sind, die in Konkurrenz zueinanderstehen, sind die in § 21 Absatz 1 vorgeschriebenen Anreize an Unternehmen, die recyclinggerechte Verpackungen herstellen, nicht gegeben. So können die Lizenzgebühren von Multilayer-Verpackungen, welche selbst mit innovativen Methoden nicht werkstofflich recycelt werden können, teilweise günstiger sein, als die für recyclinggerechte Verpackungen (Lobbe Entsorgung West GmbH & Co KG und Lobbe Industrieservice GmbH & Co KG 2020). Experten schlagen daher einen Fond vor, aus dem Unternehmen Anreize in Form von finanziellen Mitteln erhalten, sofern sie recyclinggerechte Verpackungen auf den deutschen Markt bringen. Durch diese wirtschaftlichen Anreize ist es möglich, Produzenten von Kunststoffverpackungen zur Gestaltung von recyclinggerechten Produkten anzuregen. Der Fond soll anteilig jeweils von den Dualen Systemen finanziert werden (Glaz 30.11.2020). Zur Beurteilung der Recyclingfähigkeit kann der Bewertungskatalog zur Recycelfähigkeit des Institutes cyclos-HTP herangezogen werden (Institut cyclos-HTP GmbH 2019).

In § 4 Absatz 4 VerpackG wird die Steigerung der Wiederverwendbarkeit und der Einsatz von Rezyklaten nicht weiter konkretisiert. Durch die fehlende Definition konkreter Verhaltensregeln in der Rechtspraxis sind Verpackungshersteller, die für das Recycling ungeeignete

Verpackungen vertreiben, nicht sanktionierbar (Schüler 2018). Die Integration des Bewertungskataloges in das VerpackG würde einen gesetzlichen Rahmen schaffen. Auch vor dem Hintergrund der Einführung der neuen EU-weiten Berechnungsmethode für die Recyclingquote, sind schärfere Rahmenbedingungen unabdingbar. Durch die neue Berechnungsmethode wird die Recyclingquote zukünftig - sollten keine größeren Anteile recycelt werden - geringer ausfallen. In einem Vergleich der Berechnungsmethoden für das Bezugsjahr 2016 errechneten Obermeier und Lehmann (2018) eine Recyclingquote für Siedlungsabfälle von 67 Prozent. Gemäß der neuen Berechnungsmethode ergibt sich eine Recyclingquote von 49 Prozent für das Jahr 2016. Bezüglich des Recyclings von Kunststoffverpackungen ist mit einer ähnlichen Tendenz zu rechnen. Die Einhaltung der Recyclingquoten wird durch den niedrigen Ölpreis und steigende Fixkosten (Löhne, Energiepreise und Entsorgungskosten) weiter erschwert (Wieczorek 2019).

Durch eine sortenreine Trennung der Abfälle an der Anfallstelle können Endverbraucher einen Beitrag zur Erfüllung der Recyclingquote leisten. Um der Bevölkerung den Nutzen einer getrennten Sammlung von Abfällen näherzubringen, verpflichtet das VerpackG die Dualen Systeme den privaten Endverbrauchern regelmäßig in angemessenem Umfang über den Sinn und Zweck der getrennten Sammlung von Verpackungsabfällen, die hierzu eingerichteten Sammelsysteme und die erzielten Verwertungsergebnisse zu informieren (§ 14 Absatz 3 Satz 1-2 VerpackG). Eine hohe Fehlwurfquote von teilweise bis zu 50 Prozent weist darauf hin, dass die Öffentlichkeitsarbeit seitens der Systembetreiber und der kommunalen Abfallberatung ausgebaut werden muss. Das Trennverhalten der Bürger hat sich nach einem Experten der Lobbe GmbH über die letzten Jahre verschlechtert. Über die Einführung der Veröffentlichung von Verwertungsergebnissen könnten die Verbraucher über den Erfolg einer sortenreinen Getrenntsammlung in Kenntnis gesetzt werden (Ebbing 2020). Eine weitere Methode zur Bewusstseinsänderung der Verbraucher ist die Integration von Umweltbildung in den Lehrplan von Grundschulen. Dies wird bereits erfolgreich in Indonesien umgesetzt (Wilts et al. 2020).

Neben der durch die sortenreine getrennte Erfassung gestiegenen Verfügbarkeit von Rezyklaten könnte die Integration von Qualitätsmaßstäben für Rezyklate in das Verpackungsgesetz zu einer weiteren Verbesserung der Recyclingsituation führen. Rezyklate werden infolge der teilweise enthaltenden unbekanntem Additive nur vereinzelt für die Herstellung von Verpackungen eingesetzt (vgl. Kapitel 6.2.). Durch die Integration von Auskünften über die verwendeten Additive und prozentualen Angaben von Additivkonzentrationen erhalten Verpackungshersteller einen Überblick über die Zusammensetzung der Rezyklate. Aufgrund der Sicherstellung der Zusammensetzung der

Rezyklate durch Qualitätsmaßstäbe können Unternehmen diese sicher in ihren Produkten verarbeiten.

Um den Einsatz von Rezyklaten zu fördern wurde in Großbritannien die *Plastic Tax* eingeführt. Ab April 2020 müssen kunststoffverarbeitende Unternehmen 200 Pfund pro Tonne zahlen, wenn nicht mindestens 30 Prozent Rezyklat in neue Kunststoffprodukte eingearbeitet werden (Langer 15.05.2020). Dies führte zu einem Einstieg der Petrochemie ins Recyclinggeschäft. Eine ähnliche Steuer würde sich in der Bundesrepublik positiv auf den Recyclingmarkt auswirken.

In Bezug auf die Herstellung und Verarbeitung von Rezyklaten könnten die angesprochenen gesetzlichen Änderungsvorschläge in Verbindung mit einer EU-weiten Rezyklat-Einsatzquote zu einer Verbesserung der Situation recycelnder Unternehmen führen. Gesetzliche Rahmen führen, wie auch beim Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) zu Investitionssicherheiten. In der Vergangenheit hat das EE-Gesetz dazu geführt, dass Investitionen im Bereich der erneuerbaren Energien getätigt wurden. Im Zuge dessen ist der Preis für den Ökostrom teilweise unter dem Preis des Normalstroms gefallen. Experten vermuten bei der Integration von stärkeren gesetzlichen Rahmenbedingungen eine ähnliche Wirkung in Bezug auf Rezyklate (Langer 15.05.2020). Da viele Länder die für eine EU-weite Rezyklat-Einsatzquote notwendige Technologie und Infrastruktur erst in ihre Recyclingprozesse integrieren müssen, dürfte diese Quote zu Beginn nicht mehr als 10 Prozent betragen (Thor 02.12.2020). Eine kontinuierliche Steigerung der Rezyklat-Einsatzquote würde sich neben einer steigenden Ressourceneffizienz auch aus außenpolitischer Sicht als vorteilhaft erweisen. Der Bedarf an Neukunststoffen würde sinken und in der Folge die Abhängigkeiten von Kunststoffproduzenten.

7.2 Erfassung und Sortierung

Die sortenreine Erfassung von Abfällen ist eine Voraussetzung für die Herstellung hochwertiger Rezyklat-Qualitäten. Die in Deutschland vorherrschenden Erfassungssysteme weisen dabei starke qualitative Unterschiede in Bezug auf den Verschmutzungsgrad der einzelnen Wertstofffraktionen auf. Das zeigt eine Analyse der Lobbe GmbH in Kooperation mit der DSD GmbH. Für die Analyse wurden die Input-Qualitäten unterschiedlicher Vertragsgebiete analysiert. Eine Großstadt wechselte im Jahr 2016 vom Erfassungssystem Gelber Sack zum Erfassungssystem Wertstofftonne. Im Zuge dessen stieg der Sortierrestanteil innerhalb eines Jahres von 29 Prozent auf 54 Prozent. Damit ist die Realisierung von Recyclingquoten von über 50 Prozent faktisch unmöglich (Wieczorek 2019). Es wird deutlich, dass bei einer geringeren Vermischung mit anderen Abfallfraktionen Kunststoffabfälle besser recycelt werden können. Neben den regional unterschiedlichen

Erfassungsqualitäten beschreiben Alassali et al., dass die Sortier- und Recyclingsysteme fragmentiert, nicht vorhanden oder technisch unterschiedlich entwickelt sind (Alassali et al. 2019). Ein bundesweiter Informationsaustausch über neue technische Entwicklungen und Prozesse würde maßgeblich zum Erreichen der Recyclingquote beitragen. Die hohen Kosten für das hochwertige Recycling könnten aufgrund der gemeinsamen Entwicklung effizienterer Sortiertechnik gesenkt werden. Die Bereitschaft der Industrie Informationen und Daten über neue Forschungsentwicklungen auszutauschen, ist in der Regel jedoch nicht gegeben (Alassali et al. 2019).

Die Betreiber von LVP-Sortieranlagen stehen in einem Zielkonflikt. Einerseits wird das Entgelt, das von den Dualen Systemen für die Sortierung der Materialfraktionen bezogen wird, nach dem Gewicht des Materials, welches am Input der Sortieranlage gemessen wird, bestimmt. Die Sortierbetriebe sind daher bestrebt, eine möglichst große Menge zu sortieren. Das führt teilweise zu Überladungen der Bänder und einem höheren Sortierrest, der energetisch verwertet wird. Andererseits müssen sie für die Erfüllung der Recyclingquote ein möglichst hohes Volumen von reinen Materialfraktionen bereitstellen. Würde die Bemessung der Entgelte anhand der Qualitäten des Outputs von Sortieranlagen erfolgen, könnten die Sortierbetriebe wirtschaftlich arbeiten und gleichzeitig die Recyclingquote erfüllen.

Sowohl die steigende Anzahl nicht trennbarer Materialfraktionen als auch die Materialvielfalt von Kunststoffleichtverpackungen verkomplizieren eine kostengünstige und hochwertige Sortierung (Alassali et al. 2019). Da innovative Technologien hauptsächlich im Bereich der Flake Sortierung eingesetzt werden, gehen komplexe Verpackungen, die schon zu Beginn der Sortierung aussortiert werden, dem Recyclingprozess verloren. Ohne die Integration von Prozessen zur Sortierung der komplexeren Verpackungen wie PET-Schalenverpackungen oder schwarz gefärbten Kunststoffen können die Recyclingquoten nicht erreicht werden (Dehoust o.J.). Durch die Entwicklung innovativer Technologien, die in die ersten Schritte des Sortierprozesses integriert werden können, ließe sich die Fraktion des Sortierrestes zur energetischen Verwertung verringern. Die Anforderungen an neue Technologien sind hoch: sie müssen sowohl hohe Durchsatzleistungen als auch hohe Sortiergenauigkeiten aufweisen (Martens und Goldmann 2016).

Systeme, die auf der Basis von Röntgenstrahlung arbeiten, sind vielversprechende Alternativen zu traditionellen Sortiermethoden. Diese kurzwellige elektromagnetische Strahlung kann Materialien unabhängig von deren Verschmutzungsgrad und Farbe detektieren. Die Detektion erfolgt über die atomare Zusammensetzung und der damit einhergehenden spezifischen Dichte der durchstrahlten Abfallfraktionen. Die durch die Abfallfraktionen abgeschwächte Strahlung wird von bildgebenden Zeilensensoren aufgenommen und ausgewertet. Bezüglich der LVP-Sortierung liegt das potenzielle

Einsatzgebiet von Röntgensortierern in der materialspezifischen Detektion von stark verschmutzten oder dunklen Kunststoffen (Martens und Goldmann 2016). In Verbindung mit selbstlernender (AI-)Technologie kann die Effizienz der Röntgensortierer weiter gesteigert werden.

Eine weitere Möglichkeit die Sortierung von LVP-Abfällen effektiver zu gestalten ist die Integration von Kennzeichnungssystemen (vgl. Kapitel 6.2.). Wasserzeichen oder Marker, welche die einzelnen Materialfraktionen kennzeichnen, erleichtern im Sortierprozess die Zuordnungen der einzelnen Materialfraktionen und führen zu einer Reduktion des Sortierrestes.

Die Ergänzung durch triboelektrische Trennverfahren könnte die Sortiergenauigkeit der LVP-Sortieranlagen erhöhen. Bei diesen Verfahren werden die Kunststoffoberflächen durch die Reibung der Kunststoffe aneinander oder an speziellen Oberflächen so aufgeladen, dass sie in einem folgenden Sortierprozess in Abhängigkeit der Oberflächenladung abgetrennt werden können. Die mit konventionellen Trennprozessen nicht voneinander separierbaren Kunststoffgemische können dadurch in sortenreine, hochwertige Kunststofffraktionen umgewandelt werden (Thomé-Kozmiensky und Goldmann 2009). Durch die Integration effizienterer Sortierverfahren steigt die theoretisch mögliche Recyclingquote. Eine selbst lernende Recyclingquote, die sich am aktuellen Stand der Technik orientiert und sich anhand der gewonnenen Informationen selbst nach oben korrigiert, wäre ein passendes Instrument zur Verwirklichung der EU-weiten Recyclingquote (Thiel et al. 2018).

7.3 Hemmnisse und Steigerungspotenziale des Rezyklat-Einsatzes

Kunststoff-Rezyklate werden nur untergeordnet in neue Kunststoffprodukte integriert und finden hauptsächlich in der Bauindustrie und der Landwirtschaft Anwendung. Die teilweise hochwertigen Rezyklate werden daher größtenteils zu geringerwertigen Endprodukten verarbeitet. Die Gründe dafür sind vielfältig. Akzeptanzprobleme der Verbraucher bezüglich Graufärbungen von Produkten und Informationslücken der kunststoffverarbeitenden Unternehmen hinsichtlich der technisch erreichbaren Rezyklat-Qualitäten führen zur Vermeidung des Einsatzes von Sekundärmaterial (IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. 2019).

Neben den genannten Gründen führen niedrige Rohölpreise zu einer hohen Preisdifferenz zwischen Neuware und Sekundärmaterial. In Verbindung mit Subventionen für Mineralölprodukte gestaltet sich der Einsatz von Kunststoff-Rezyklaten für kunststoffverarbeitende Unternehmen unökonomisch (Roth 2020). Durch die teilweise fehlende Bereitschaft der Endkonsumenten für hochwertig aufbereitete Rezyklate einen

Mehrpreis zu bezahlen, wird hauptsächlich Neuware verarbeitet. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft und des Ressourcenschutzes muss es eine Entkopplung des Preises für Neukunststoffe vom Rohölpreis geben (VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. August 2020).

Damit Rezyklate in Lebensmittelverpackungen eingesetzt werden dürfen, müssen diese höchste Reinheiten in Lebensmittelkontaktqualität besitzen. Bei Kunststoff-Rezyklaten, deren Herkunft meist unbekannt ist, besteht die Gefahr, dass diese durch Chemikalien kontaminiert wurden. Hersteller von Lebensmittelverpackungen verwenden daher vorzugsweise Kunststoffneuware. Lediglich die durch eine sortenreinen Erfassung gesammelten PET-Getränkeflaschen stellen eine Ausnahme dar (Thiel et al. 2018). Für den Einsatz der erfassten PET Flaschen als Sekundärrohstoffe für Lebensmittelverpackungen sind sogenannte *super-clean* Recyclingprozesse erforderlich. Aufgrund der erhöhten Kosten und der technischen Herausforderung verbleiben nur circa ein Drittel der Rezyklat-Menge im Bottle-to-Bottle Kreislauf. 65 Prozent der PET-Rezyklat-Menge werden genutzt, um Folien, textile Fasern oder Non-Food Flaschen herzustellen (Thiel et al. 2018).

Dieselben Anforderungen an die Qualität der Kunststoff-Rezyklate werden zunehmend auch an Rezyklate für die Anwendung als Nicht-Lebensmittelverpackung gestellt. Durch den Einsatz von Rezyklaten aus dem Gelben Sack sind die erhöhten Anforderungen an die Reinheit der Kunststoff-Rezyklate meist nicht erreichbar. Die getrennte Erfassung von PET-Flaschen zeigt, dass eine sortenreine Erfassung zu höheren Recyclingquoten und in der Folge zu höheren Rezyklat-Einsatzquoten führt. Die Einführung einer getrennten Erfassung der Kunststofffraktion(-en) ist daher eine zu diskutierende Alternative.

Dass sich Rezyklate, die keine Lebensmittelqualität besitzen, dennoch für den Einsatz von Verpackungen eignen, zeigt die Firma Werner und Mertz mit ihrer Rezyklat-Initiative. Das Unternehmen setzt für die Herstellung einer Spülmittelflasche aktuell 20 Prozent Rezyklat aus dem Gelben Sack und 80 Prozent Rezyklat aus der PET-Getrenntsammlung ein (Dehoust o.J.). Die Spülmittelflaschen aus Rezyklaten unterscheiden sich kaum von Spülmittelflaschen, die aus Neukunststoffen hergestellt wurden. Dies zeigt, dass das größte Hemmnis für den Einsatz von Kunststoff-Rezyklaten in den Vorbehalten der Hersteller bezüglich der qualitativen und technischen Eigenschaften des Recyclingmaterials liegt (Thiel et al. 2018). Die Vorbehalte der Hersteller liegen vor allem an einem Informationsdefizit über die erreichbaren Qualitäten von Kunststoff-Rezyklaten. Viele Hersteller verbinden den Rezyklat-Einsatz mit Produkten minderer Qualität, wie beispielsweise recycelten Parkbänken. Durch eine Aufklärungskampagne der Dualen Systeme könnten die Hersteller über die erreichbaren Rezyklat-Qualitäten informiert werden und diese verstärkt in ihre Produktion integrieren. Die

Verwendung von Gütesiegeln bei Recyclingpapier führte in der Vergangenheit zu einer Verbesserung der Akzeptanz bezüglich des durch Verfärbungen oder anderen Qualitätseinschränkungen gekennzeichneten Produktes. Bei der Integration von Gütesiegeln für Recyclingkunststoffe erhoffen sich Experten ebenso eine Akzeptanzsteigerung (IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. 2019). Aktuell können Kunststoffe, die einen Post-Consumer Rezyklat-Anteil von über 80 Prozent aufweisen mit dem Gütesiegel „Blauer Engel“ zertifiziert werden (RAL gGmbH Januar 2019).

Eine stärkere Nachfrage an Produkten aus Recyclingmaterial seitens der öffentlichen Beschaffung würde die Popularität dieser Produkte steigern. Ein positiver Nebeneffekt der öffentlichen Beschaffung von recycelten Produkten wäre ein Wachstum des Marktes für Rezyklate. In der Folge würde die Infrastruktur für Rezyklate ausgebaut werden und die Preise für Rezyklate sinken (Roth 2020).

Neben den genannten Hemmnissen führen produktionsseitige Hemmnisse zu einem geringen Einsatz von Rezyklaten in neue Produkte. Ein zu hoher Materialdurchsatz in den Sortieranlagen führt neben einem großen Kornspektrum und dem Verzicht einer manuellen Nachsortierung zu hohen Aufbereitungs- und Verwertungsverlusten (Thiel et al. 2018). Trotz des hohen Recyclingpotenzials von Rezyklaten mangelt es aktuell an Investitionen in eine weitergehende Forschung bezüglich der Verringerung von Degradationsprozessen.

7.4 Design-for-Recycling

Das Designen einer Verpackung ist anspruchsvoll. Dabei muss auf die Schutzbedürftigkeit des Füllgutes (Licht, Sauerstoff, etc.), dessen Beschaffung und auf die Möglichkeit, selbst hochwertig recycelt werden zu können, eingegangen werden. Die Herstellung darf nicht zu teuer und die Verpackungen müssen gut transportierbar sein. Sie müssen gesetzlichen Anforderungen entsprechen und den Konsumenten zum Kauf anregen (Woidasky et al.). Das Design-for-Recycling steht mit vielen Anforderungen im Zielkonflikt und wird daher meist vernachlässigt. Es ist jedoch in Bezug auf die vom Gesetzgeber geforderte Recyclingquote von großer Bedeutung. Um ein ökonomisch profitables Recycling betreiben zu können, ist das Design-for-Recycling der am Input einer LVP-Sortieranlage ankommenden Verpackungen ein wichtiger Aspekt (Thomé-Kozmiensky und Goldmann 2009). Neue Entwicklungen hinsichtlich aktiver Verpackungen, die dem Lebensmittel verschiedene Stoffe wie zum Beispiel Sauerstoff entziehen (Verbraucherzentrale 05.05.2020) oder Verpackungen mit antimikrobiellen Eigenschaften (Opitz und Bley 2004), hemmen den Sortierprozess mit bewährten Sortiertechniken. Inhaltsstoffe, die sich in der Polymermatrix der Kunststoffverpackungen befinden (Weichmacher, Farben, etc.), sind häufig der Grund eines Downcycling oder einer energetischen Verwertung (Thomé-Kozmiensky und Goldmann 2009). Die steigende Menge

an Mischkunststoffverpackungen erschweren eine sortenreine Sortierung ebenso wie steigende Qualitätsanforderungen an Rezyklate (Allassali et al. 2019). Um die Sortierung der Verpackungen zu erleichtern, bedarf es teilweise nur geringen Veränderungen am Design der Verpackung. Kleinere Banderolen bewirken durch eine geringer verschattete Fläche eine bessere Sortierfähigkeit der Produkte (Christiani 2017). Eine helle Farbgebung der Produkte führt aufgrund der traditionellen Trennmethode über NIR-Spektrometer zu einer besseren Sortierbarkeit der Verpackungen.

Die Maag GmbH zeigt mit ihren Einstoff-PET-Schalenverpackungen, dass die Substitution von Mischkunststoffverpackungen durch Einstoff-Lösungen sowohl Ressourcen spart, als auch vergleichbare Barriereigenschaften erreichbar sind (vgl. Kapitel 6.2.5.). Laut Maag Geschäftsführer Ansgar Schonlau ist der Anteil der Verbundverpackungen durch die Substitution von Einstoff-Lösungen von 40 Prozent auf unter 10 Prozent reduzierbar (Schonlau 2020). Ist eine Einstoff-Lösung nicht umsetzbar, kann die Verpackung so designt werden, dass die verschiedenartigen Materialien leicht voneinander trennbar sind. Diesbezüglich können Verpackungen so gestaltet werden, dass der Endnutzer die einzelnen Komponenten trennen muss, um an das geschützte Produkt zu gelangen. Eine sortenreine Trennung erfolgt dadurch bereits beim Verbraucher. Durch eine verstärkte Fokussierung auf das recyclinggerechte Verpackungsdesign können circa 18 Prozent der Kunststoffverpackungen potenziell so verbessert werden, dass eine Recyclingfähigkeit erreicht werden kann (Lebensmittel Zeitung 2016).

Im Zuge des Druckes der öffentlichen Kunststoffdiskussion haben einige Unternehmen den Kunststoffanteil in ihren Produkten reduziert. Diese Reduktion führt dazu, dass zum Erhalt der Stabilitätseigenschaften der Produkte andere Materialien wie beispielsweise Aluminiumfolien eingesetzt werden. In der Folge wird die Plastikverpackung im Sortierprozess von Wirbelstromabscheidern als NE-Metall aussortiert und geht dem Recyclingkreislauf verloren. Die Reduktion von Kunststoffen führt in einigen Produkten daher zu einer ökologisch ungünstigeren Situation. Hieraus resultiert, dass Kunststoffe, die richtig verarbeitet und im Kreislauf geführt werden, ökologischer sind, als Versuche Kunststoffe zu reduzieren.

Die erwähnte öffentliche Kunststoffdiskussion hat neben der Reduktion von Kunststoffanteilen in Produkten zu einer Intensivierung der Entwicklung von biologisch abbaubaren Kunststoffen beigetragen. Diese Entwicklung wird von kunststoffrecycelnden Unternehmen kritisch bewertet. Biologisch abbaubare Kunststoffe besitzen eine höhere Komplexität bezüglich eines Recyclings, sind teurer als recycelte oder Neukunststoffe und weisen eine größere Affinität zur Feuchtigkeitsaufnahme auf. Die Herstellung der biologisch abbaubaren Kunststoffe erfolgt linear. Im Gegensatz zu einer zirkulierenden Wertschöpfungskette werden bei einem

linearverlaufenden System die produzierten Güter nach der Nutzungsphase thermisch verwertet oder deponiert. Darüber hinaus muss der Abbau der Verpackung ohne Kontaminationen des verpackten Produktes verlaufen. Ein weiterer Nachteil der biologisch abbaubaren Kunststoffe ist die fälschliche Vermittlung der Abbaubarkeit unter Bedingungen, wie sie beispielsweise in heimischen Komposten herrschen. Dagegen bestehen bei der industriellen Kompostierung Bedingungen, unter denen die biologisch abbaubaren Kunststoffe abgebaut werden können (Umweltbundesamt 2020). Biologisch abbaubare Kunststoffverpackungen sind daher lediglich ergänzend für kurzlebige Konsumgüter einsetzbar (Linganiso 2018).

Um die Recyclingfähigkeit von Verpackungen sichtbar zu machen, haben einige Entsorger eine Recycling-Ampel veröffentlicht. Diese soll die Konsumenten über die Recyclingfähigkeit von Kunststoffprodukten aufklären. Das grüne Symbol steht dabei für eine gute Recyclingfähigkeit. Eine gelbe Ampel signalisiert dem Konsumenten eine eingeschränkte Recyclingfähigkeit. Schwer recycelbare Verpackungen werden mit einer roten Ampel gekennzeichnet (Stadtreinigung Hamburg AöR 2019).

7.5 Zukünftige Probleme

Aufgrund der geringen Menge von recyceltem Kunststoffmaterial im LVP-Abfall spielen Degradationseffekte von Kunststoff-Rezyklaten aktuell eine untergeordnete Rolle. Eine prozentuale Steigerung von recycelten Kunststoffen im LVP-Abfall wird sich in Zukunft jedoch stärker auf die Eigenschaften der Kunststoff-Rezyklate auswirken (Schneider 02.12.2020). Vertiefende Untersuchungen der Degradationseffekte von Kunststoffen aus dem LVP-Abfall könnten zu einem besseren Verständnis der zu erwartenden Eigenschaftsänderungen der Regranulate führen. Daraus abgeleitet, kann die Wirkung von Additiven zur Stabilisation der Eigenschaften von Rezyklaten erforscht werden. Durch die Integration von stabilisierenden Additiven können diese Degradationseffekte möglicherweise auf einem niedrigen Niveau gehalten werden.

Das Ziel der EU-Kommission bis zum Jahr 2025 10 Millionen Tonnen Recyclingkunststoff in neuen Produkten zu verwenden, wird von Experten als zu ambitioniert bewertet. Aktuell gibt es europaweit circa 1000 kunststoffrecycelnde Unternehmen. Diese sind überwiegend mittelständisch geprägt. In Verbindung mit einer unzureichenden Infrastruktur gilt das Erreichen des Ziels als eine zusätzliche Herausforderung für recycelnde Unternehmen (Langer 15.05.2020). Der Anteil Verbundverpackungen zulasten des EU-Zieles weiter zunehmen. Nur durch schärfere gesetzliche Rahmensetzungen (vgl. Kapitel 7.1.) und Subventionen an kunststoffrecycelnde Betriebe lassen sich größere Mengen von Kunststoffregranulaten herstellen und in neue Produkte integrieren.

8 Fazit

Der größte Vorteil von Leichtverpackungen aus Kunststoffen gegenüber Verpackungen aus anderen Materialien ist die Möglichkeit einer hohen werkstofflichen Recyclingquote. Das Recycling von Kunststoffen benötigt lediglich 40 Prozent der Energie, die bei der Produktion von Kunststoffneuware eingesetzt wird. Die über den Recyclingprozess gewonnenen Kunststoff-Rezyklate tragen neben einer höheren Ressourceneffizienz zur Entlastung der Umwelt bei. Die Recyclingquote der Kunststoffleichtverpackungsabfälle in Deutschland von 42,1 Prozent weist darauf hin, dass das Recyclingpotenzial nicht vollständig ausgeschöpft ist. Im Folgenden werden Optimierungspotenziale des Gesetzgebers, der Entsorger, der Produzenten und der Bürger vorgestellt.

8.1 Optimierungspotenzial hinsichtlich rechtlicher Regelungen

Mit der Einführung der getrennten Erfassung von LVP-Abfällen in Deutschland wurde eine gute Grundlage für ein flächendeckendes Recycling von Kunststoffleichtverpackungen geschaffen. Im Rahmen des *Circular Economy Action Plans* der EU-Kommission ist das Recycling von Kunststoffen aufgrund einer Energieersparnis von 60 bis 90 Prozent gegenüber der Herstellung von Kunststoffneuware und einer sinkenden Rohstoffabhängigkeit die zu bevorzugende Verwertungsform (Widmann 19.11.2020; Alassali et al. 2019). Die Differenz der Energieeinsparungen von 40 Prozent ergibt sich aus unterschiedlichen Literaturquellen. Für die Umsetzung des *Circular Economy Action Plans* wird in der EU-Verpackungsrichtlinie eine Recyclingquote von Kunststoffen vorgegeben. Bis zum Jahr 2025 müssen die Mitgliedsländer der EU 50 Prozent des Kunststoffabfalls recyceln. Die Verpackungsrichtlinie wird durch das Verpackungsgesetz (VerpackG) in deutsches Recht umgesetzt. Bis zum Jahr 2022 soll in Deutschland nach dem VerpackG eine Kunststoffrecyclingquote von 63 Prozent erreicht werden. Für das Erreichen des Ziels sieht sich die Kunststoffrecyclingbranche mit großen Herausforderungen konfrontiert.

Aktuell liegt der vom Gesetzgeber vorgegebene Fokus auf der Verarbeitung der Input-Mengen der Sortieranlagen. Das führt häufig zu einer Überladung der Transportbänder und in der Folge zu einer Verringerung der Sortierleistung. Eine Fokussierung auf die Qualität der Output-Menge würde neue Prozessabläufe und bereits verfügbare Technologien bedingen, welche zu einer Reduzierung von Sortierresten und zu einer steigenden Ressourceneffizienz führen.

Durch verschärfte gesetzliche, EU-weit geltende Rahmenbedingungen können bezüglich des Kunststoffrecyclings langfristige Investitionssicherheiten geschaffen werden. Die Entwicklungen von neuen Recyclingtechnologien und recyclinggerechten Verpackungen würden zunehmen und das Kunststoffrecycling in Zukunft ökonomischer gestalten. Qualitätsstandards für Rezyklate würden Unternehmen Sicherheiten über die Zusammensetzungen der Kunststoff-Rezyklate geben, in der Folge deren Einsatz fördern und

einheitliche Wettbewerbsbedingungen schaffen. Für die Gewährleistung der Rezyklat-Qualitäten ist es notwendig, Degradationsprozesse langfristig zu untersuchen, deren Auswirkungen zu ermitteln und gegenläufige Maßnahmen zu entwickeln. Um den Rezyklat-Einsatz ökonomisch zu gestalten, muss es eine Entkopplung des Preises für Neukunststoff vom Rohölpreis geben. Durch die Einführung einer Steuer auf Neukunststoffe würde die Verwendung von Rezyklaten eine ökonomische Alternative darstellen. Alternativ ist das Konzept der *Plastic Tax* in Großbritannien zu berücksichtigen. Im Zuge der *Plastic Tax* müssen Unternehmen, die Kunststoffprodukte auf den britischen Markt bringen, eine Steuer bezahlen, sobald deren Produkte nicht mindestens einen Rezyklat-Anteil von 30 Prozent aufweisen.

Sortiertechnik, die schwarze Kunststoffe nach Fraktionen sortieren kann, ist technisch verfügbar, wird jedoch aufgrund einer fehlenden Nachfrage für schwarze Rezyklate kaum in LVP-Sortieranlagen integriert (Reichenbach 2020). Eine generelle Einsatzquote für Rezyklate würde die diesbezügliche Nachfrage erhöhen und eine gründlichere und breiter gefächerte Sortierung ermöglichen.

Ein weiterer Aspekt ist die Erfassung der Wertstoffe in den Haushalten. Es hat sich herausgestellt, dass der Gelbe Sack und die Gelbe Tonne sortenreinere Fraktionen aufweisen als die Wertstofftonne (Wieczorek 2019). Andererseits könnte langfristig die Einführung einer Getrenntsammlung von Kunststofffraktion(en) zu sortenreineren Abfallströmen führen, welche auch effektiver recycelt werden könnten.

8.2 Optimierungspotenzial der Entsorger

Durch die Schaffung einer transparenten Entwicklungskultur und einen uneingeschränkten Informationsaustausch zwischen den recycelnden Unternehmen kann die Gesamtsituation der Kunststoffrecyclingbranche verbessert werden. Mit der Integration zusätzlicher Sortierschritte, für beispielsweise PET-Einwegartikel und schwarzen Kunststoffen aus dem LVP-Abfallstrom können Betreiber von LVP-Sortieranlagen einen Beitrag zum Erreichen einer höheren Recyclingquote leisten. Da die dafür notwendigen finanziellen Mittel teilweise das Budget der Sortieranlagen übersteigen, sollten der Bund oder die Länder diese Investitionen durch Förderungen unterstützen.

Über die Lizenzierung der Produkte bei den Dualen Systemen könnten diese über den Bewertungskatalog des Instituts cyclos-HTP die Recyclingfähigkeit der Produkte ermitteln. Durch die Integration der Recyclingfähigkeit eines Produktes in die Bemessung der Lizenzierungskosten würden Unternehmen wirtschaftliche Anreize erhalten, um das Produkt hinsichtlich der Recyclingfähigkeit zu designen. Aktuell erhalten Unternehmen, die recyclingfähige Verpackungen auf den Markt bringen keine Anreize von den Dualen Systemen (Glaz 30.11.2020). Die Eröffnung eines Fonds, aus dem diese Unternehmen Anreize erhalten und der durch die Dualen Systeme finanziert wird, ist eine Alternative zur bisherigen Praxis.

Die Integration von Gütesiegeln oder Ampeln, welche die Recyclingfähigkeit der Verpackungen anzeigen helfen Verbrauchern recycelbare Verpackungen zu erkennen.

8.3 Optimierungspotenzial der Hersteller von Kunststoffleichtverpackungen

Für die Verwirklichung einer zirkulären Kreislaufwirtschaft von Kunststoffen aus dem LVP-Abfall reichen eine Umstrukturierung von LVP-Sortieranlagen zu effizienteren Prozessabläufen und die Integration von Bester verfügbarer Technik nicht aus. Produzenten von Leichtverpackungen haben über das Verpackungsdesign einen wesentlichen Einfluss auf die Recyclingfähigkeit ihrer Produkte. Durch die Substitution von Verbundmaterialien durch Einstoff-Lösungen kann der Sortierrestanteil minimiert und das Produkt einer hochwertigen Verwertung zugeführt werden. Ist eine Einstoff-Lösung nicht umsetzbar, können leicht voneinander trennbare Komponenten den Sortierprozess erleichtern. Durch die Einstoff-Lösung kann es zu einem höheren Kunststoffeinsatz kommen. Da Produkte, die aus nur einem Kunststoff bestehen, eine höhere Recyclingfähigkeit als Verbundstoffe aufweisen, ist es ökologisch sinnvoller die Einstoff-Lösungen zu verwenden.

8.4 Optimierungspotenzial der Bürger

Durch einen verstärkten Konsum recyclinggerechter Verpackungen und einer Bewusstseinsänderung gegenüber dem Leichtverpackungsabfall können Verbraucher über ihr Konsumverhalten zum Erreichen der Recyclingquote beitragen.

Das Trennverhalten der Bevölkerung hat einen Einfluss auf die Recyclingfähigkeit der Produkte. Bis zu 30 Prozent des Input-Materials in Sortieranlagen sind Fehlwürfe, die dem werkstofflichen Recycling nicht zugeführt werden können (Feil 2020). Die hohe Fehlwurfquote zeigt, dass die Dualen Systeme ihre vorgeschriebene Aufklärungsarbeit bezüglich des Sortier- und Trennverhaltens der Bürger ausbauen müssen. Fehlendes Wissen über die Sortierung und ein Unverständnis über die Sinnhaftigkeit der Getrenntsammlung sind Gründe für die hohe Fehlwurfquote.

Glossar

Abfälle	Stoffen, derer sich der Besitzer entledigt hat und Stoffe, die in einem Produktionsprozess anfallen und nicht als das Produkt selbst dargestellt werden.
Beseitigung	Ablagerung auf der Deponie.
Downcycling	Wiederverwendung für geringwertigere Endprodukte
Energetische Verwertung	Die Energetische Verwertung umfasst sowohl die Verwertung in Müllverbrennungsanlagen als auch die Verwertung von Ersatzbrennstoffen.
Entsorgung	Die Entsorgung umfasst die Verwertung und die Beseitigung von Abfällen
Granulat	Zubereitung aus festen und trockenen Körnern.
Kunststoffneuware	Als Kunststoffneuware (auch: Neuware) werden durch Polymerisation hergestellte Formmassen (z.B. Granulat, Pulver) bezeichnet, die an die weiterverarbeitende Industrie vertrieben werden. Sekundärrohstoffe sind hier nicht inkludiert.
Kunststoff-Rezyklat	Kunststoff-Rezyklat wird aus dem Recycling von Post-Industrial oder Post-Consumer-Abfällen gewonnen. Die Aufbereitung zu Rezyklat erfolgt in Form von Regranulaten, Agglomeraten, Compounds oder Regeneraten. Das hergestellte Rezyklat findet erneut Einsatz in der Verarbeitung zu Kunststoffprodukten.
Kunststoffverarbeitung	Verarbeitung von Kunststoffen als Neuware oder Rezyklat zu Produkten.
Littering	Wegwerfen oder Liegenlassen kleiner Mengen Siedlungsabfall, ohne dabei die bereitstehenden Entsorgungsstellen zu benutzen.
Photooxidation	Photooxidationen sind Oxidationsreaktionen, die durch Licht ausgelöst werden.
Polyaddition	Die Polyaddition ist eine Form der Polymerbildung. Für gewöhnlich werden zwei verschiedene Monomere verwendet, die in

	unabhängigen Einzelreaktionen über die Bildung von reaktiven Oligomeren Polymere aufbauen.
Polykondensation	Die Polykondensation ist neben der Polyaddition eine weitere Form der Polymerbildung. Im Gegensatz zur Polyaddition werden bei der Polykondensation ein oder mehrere Nebenprodukte wie Wasser oder Ammoniak frei.
Polymerisation	Die Polymerisation ist eine Kettenwachstumsreaktion, bei der ungesättigte organische Verbindungen unter Auflösung der Mehrfachbindungen der Monomere zu Polymeren verknüpft werden. Dabei entstehen keine Nebenprodukte.
Polyolefine	Polyolefine sind der Sammelbegriff für Kunststoffarten, die Polyethylen – PE-LD (Polyethylen Low-Density), PE-LLD (Polyethylen Linear Low Density), PE-HD (Polyethylen High Density) – und Polypropylen (PP) enthalten.
Post-Consumer-Abfälle	Endverbraucherabfälle, die nach dem Gebrauch sowohl aus den gewerblichen als auch den haushaltsnahen Endverbraucher-Bereichen anfallen. Die Abfälle weisen häufig einen gewissen Verschmutzungs- und/oder Vermischungsgrad auf.
Post-Industrial-Abfälle	Post-Industrial-Abfälle sind Produktionsabfälle, die in der Regel sortenrein/typenrein anfallen und deren Inhaltsstoffe dem Verwender weitestgehend bekannt sind.
Recycling	Jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Die stoffliche und die energetische Verwertung fallen unter den Recyclingbegriff.
Regranulat	Granulat, welches aus Sekundärrohstoffen besteht.

Restentleerte Verpackungen	Verpackungen, deren Inhalt bestimmungsgemäß ausgeschöpft worden ist (§ 3 Absatz 6 VerpackG).
Rezyklat	Sekundäre Rohstoffe, die durch die Verwertung von Abfällen gewonnen worden sind oder bei der Beseitigung von Abfällen anfallen und für die Herstellung von Erzeugnissen geeignet sind (§ 3 KrWG).
Rohstoffliche Verwertung	Die Rohstoffliche Verwertung (chemische Verwertung) ist die Umwandlung kunststoffhaltiger Abfallfraktionen zu Monomeren oder zur Herstellung neuer Materialien durch Änderung der chemischen Struktur der betreffenden Abfallfraktionen durch Cracking, Vergasung oder Depolymerisation, mit Ausnahme von Energierückgewinnung und Verbrennung.
Sekundärrohstoff	Rohstoff, der aus Abfällen oder Produktionsrückständen gewonnen wird. Er kann Primärrohstoffe ersetzen.
Verwertung	Die Verwertung beinhaltet sowohl die stoffliche Verwertung (Recycling) als auch die energetische.
Werkstoffliche Verwertung	Verarbeitung der einzelnen Kunststofffraktionen zu Sekundärrohstoffen oder Produkten ohne signifikante Veränderung der chemischen Struktur des Materials.

Literaturverzeichnis

Adis Plastics UG (o.J.): Adis Plastics. Nierstein. Online verfügbar unter <https://www.adis-plastics.de/>, zuletzt geprüft am 14.01.2021.

Alassali, Ayah; Löhn, Sarah; Picuno, Caterina; Kuchta, Kerstin (2019): Recyclingfähigkeit von Kunststoffen. In: Hans-Peter Obladen und Michael Meetz (Hg.): Betriebswirtschaftliche Strategien für die Abfallwirtschaft und Stadtreinigung. Berlin, 05.-06.12.2019. Kassel: kassel university press GmbH, S. 7–15.

Al-Salem, S. M.; Lettieri, P.; Baeyens, J. (2009): Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 29 (10), S. 2625–2643. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.06.004.

Aurrekoetxea, J.; Sarrionandia, M. A.; Urrutibeascoa, I.; Maspoch, M. Ll. (2001): Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic polypropylene. In: *Journal of Materials Science* 36 (11), S. 2607–2613. DOI: 10.1023/A:1017983907260.

Bisinella, Valentina; Albizzati, Paola Frederica; Fruergaard Astrup, Thomas; Damgaard, Anders (2018): Life Cycle Assessment of grocery carrier bags. Environmental project no. 1985. Hg. v. The Danish Environmental Protection Agency. Kopenhagen. Online verfügbar unter <https://www.thisisplastics.com/wp-content/uploads/Denmark-LCA.pdf>, zuletzt geprüft am 27.01.2021.

Bruckschen, A. (2019): 9 Monate Verpackungsgesetz - Erste Erfahrungen aus Sicht der privaten Entsorgungswirtschaft. Würzburger Verpackungsforum. BDE – Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V. Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH. Würzburg, September 2019. Online verfügbar unter http://www.witzenhausen-institut.de/images/downloads_tagungen/verpackungsforum_2019_buckschen.pdf, zuletzt geprüft am 20.11.2020.

Bücklein, Tobias (2020): Mein GELBER SACK wird RECYCELTE (Teil 2). Mit Tobias Bücklein (Dieserdad). Tobias Bücklein. Deutschland, 11:10.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hg.) (o.J.): Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen. Verpackungsverordnung. Online verfügbar unter <https://www.bmu.de/gesetz/verordnung->

ueber-die-vermeidung-und-verwertung-von-verpackungsabfaellen/, zuletzt aktualisiert am 04.11.2020.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (04.08.2020): Verpackungen gesamt. Verbrauch, Verwertung, Quoten 1991 bis 2018 (in Kilotonnen). Berlin. Regine Zylka, poststelle@bmu.bund.de. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/datentabelle_verbrauch_verwertung_quoten_bf.pdf, zuletzt geprüft am 13.10.2020.

Bundesumweltministerium (BMU) (2018): Nein zur Wegwerfgesellschaft: 5-Punkte-Plan des Bundesumweltministeriums für weniger Plastik und mehr Recycling. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/5_punkte_plan_plastik_181123_bf.pdf, zuletzt geprüft am 02.10.2020.

Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (2020): Kennzeichnung / Identifizierung von Kunststoffen. Version 18. Online verfügbar unter https://www.laga-online.de/documents/kik_bericht_18_1591617236.-v_06022020f, zuletzt geprüft am 14.01.2021.

bvse (2018): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft: Einblicke und Aussichten 2018. Hg. v. BDE – Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V., ITAD – Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V., VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., BDSV – Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V., PlasticsEurope Deutschland e. V., VHI – Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie e.V., et al. bvse. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bvse.de/images/pdf/Nachrichten_2018/Statusbericht_2018_Ansicht_und_Druck.pdf, zuletzt geprüft am 02.10.2020.

bvse (2020): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung e.V., Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V., PlasticsEurope Deutschland e. V., Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser und Rohstoffwirtschaft e.V., Interessengemeinschaft Deutsche Deponiebetreiber e.V., Verband Deutscher Metallhändler e.V., et al. Online verfügbar unter https://statusbericht-kreislaufwirtschaft.de/wp-content/uploads/2020/11/2020_Statusbericht_mobil.pdf, zuletzt geprüft am 09.12.2020.

Christiani, Joachim (2017): Recyclingfähigkeit von Kunststoffverpackungen – Status und Potenziale. Dialogforum Kreislaufwirtschaft. Institut cyclos-HTP GmbH. Berlin, 10.2017. Online verfügbar unter https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/veranstaltungen/171025-nabu-04_recyclingfaehigkeit_von_kunststoffverpackungen_joachim_christiani.pdf, zuletzt geprüft am 16.12.2020.

Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH (2012): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2011. Kurzfassung. Hg. v. BKV GmbH, PlasticsEurope Deutschland e. V., IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. und bvse – Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. Alzenau. Online verfügbar unter <https://www.plasticseurope.org/de/resources/publications/201-studie-zu-produktion-verarbeitung-und-verwertung-von-kunststoffen-deutschland-2011-kurzfassung>, zuletzt geprüft am 20.01.2021.

Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH (2014): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2013. Kurzfassung. Hg. v. BKV GmbH, PlasticsEurope Deutschland e. V., IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. und bvse – Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. Alzenau. Online verfügbar unter https://www.bkv-gmbh.de/uploads/tx_news/Consultic-Studie2013__Kurzfassung_.pdf, zuletzt geprüft am 20.01.2021.

Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH (2016): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015. Kurzfassung. Hg. v. BKV GmbH, PlasticsEurope Deutschland e. V., IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. und bvse – Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. Alzenau. Online verfügbar unter https://www.rigk.de/Editors/RIGK/Dateien/Downloads/InformationMerkblaetter/Consultic_Studie_2015_Produktion__Verarbeitung_und_Verwertung_von_Kunststoffen_in_Deutschland_2015.pdf, zuletzt geprüft am 20.01.2021.

Conversio Market & Strategy GmbH (2018): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017. Kurzfassung. Hg. v. Plastics Europe Deutschland e.V., Arbeitsgemeinschaft PVC und UMWELT e.V., Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V., Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V., Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., Kunststoffrohrverband e.V., Verband

Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V., Industrieverband Halbzeuge und Konsumprodukte aus Kunststoff e.V., Verband Technische Kunststoff-Produkte e.V., Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., Fachverband Schaumkunststoffe und Polyurethane e.V., Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie. Mainaschaff. Online verfügbar unter https://www.bvse.de/images/pdf/kunststoff/2018/Kurzfassung_Studie_Stoffstrombild_2017.pdf, zuletzt geprüft am 02.10.2020.

Conversio Market & Strategy GmbH (2020): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019. Hg. v. BKV GmbH und Plastics Europe Deutschland e.V., Arbeitsgemeinschaft PVC und UMWELT e.V., Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V., Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V., Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., Kunststoffrohrverband e.V., IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., Verband der chemischen Industrie e.V., VDMA Kunststoff- und Gummimaschinen, Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V., Industrieverband Halbzeuge und Konsumprodukte aus Kunststoff e.V., Verband Technische Kunststoff-Produkte e.V., Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., Fachverband Schaumkunststoffe und Polyurethane e.V., Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie. Conversio Market & Strategy GmbH. Mainaschaff. Online verfügbar unter <https://www.plasticseurope.org/de/resources/publications>, zuletzt geprüft am 14.10.2020.

Cui, Jirang; Forssberg, Eric (2003): Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. In: *Journal of Hazardous Materials* 99 (3), S. 243–263. DOI: 10.1016/S0304-3894(03)00061-X.

Dehoust, G. (o.J.): Vergleich und Gegenüberstellung verschiedener Recyclingverfahren bezüglich ihrer Aufwendungen und ihrem Nutzen. Die PET-Recyclat-Initiative von Werner & Mertz. Vorläufige Layoutfassung. Öko-Institut e. V. Online verfügbar unter <https://wir-fuer-recyclat.de/wp-content/uploads/2020/08/Vorlayout-%C3%96koinstitut.pdf>, zuletzt geprüft am 13.01.2021.

Deutscher Bundestag (01.06.2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG, vom 20.07.2017. In: <http://www.gesetze-im-internet.de/>. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/KrWG.pdf>, zuletzt geprüft am 04.11.2020.

Dornbusch, H.-J.; Hannes, L.; Santjer, M.; Böhm, C.; Wüst, S.; Zwisele, B. et al. (2020): Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in

Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwendbaren Materialien. Abschlussbericht. Texte 113/2020. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_113-2020_analyse_von_siedlungsrestabfaellen_abschlussbericht.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.2021.

DSD – Duales System Holding GmbH & Co. KG (2020a): Verpackungsdesign – Recyclbarkeit ist mit Design for Recycling planbar! Was genau erleichtert das Recycling einer Verpackung? Köln. Online verfügbar unter <https://www.gruenerpunkt.de/de/nachhaltige-verpackungen/ueber-design4recycling.html>, zuletzt geprüft am 20.11.2020.

DSD – Duales System Holding GmbH & Co. KG (Hg.) (2020b): Kunststoffrecycling lohnt sich immer. Gelber Sack – was kommt rein? Online verfügbar unter <https://www.gruenerpunkt.de/de/kunststoffrecycling-gelber-sack.html>, zuletzt aktualisiert am 02.11.2020.

Ebbing, J. (2020): Recycling von Kunststoffen aus dem Leichtverpackungsabfall. Gernsheim, 02.11.2020. E-Mail an A. Turuc.

Edwards, Chris; Meyhoff Fry, Jonna (2011): Life cycle assessment of supermarket carrierbags. A review of the bags available in 2006. Report:SC030148. Bristol: Environment Agency (Environment Agency science report). Online verfügbar unter https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/291023/scho0711buan-e-e.pdf, zuletzt geprüft am 26.01.2021.

Ehrenstein, Gottfried W.; Pongratz, Sonja (2007): Beständigkeit von Kunststoffen. München: Hanser (Edition Kunststoffe). Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/isbn/9783446218512>.

Europäische Kommission (o.J.): Europäischer Aufbauplan. Finanzierung des langfristigen EU-Haushalts sowie von NextGenerationEU. Brüssel. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_de#grtes-konjunkturpaket-allerzeiten, zuletzt geprüft am 08.01.2021.

Europäische Kommission (2018a): A european strategy for plastics in a circular economy. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/plastics-strategy-brochure.pdf>, zuletzt geprüft am 05.10.2020.

Europäische Kommission (2018b): Eine europäische Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft. Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Brüssel. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_3&format=PDF, zuletzt geprüft am 07.01.2021.

Europäische Union (04.06.2018): RICHTLINIE (EU) 2018/851 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES, vom 30.05.2018. In: EUR-Lex. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0851&from=DE>, zuletzt geprüft am 02.10.2020.

Europäische Union (12.06.2019): Richtlinie (EU) 2019/904, vom 05.06.2019. In: EUR-Lex. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32019L0904>, zuletzt geprüft am 14.10.2020.

Falter, W.; Keller, A.; Nickel, J.-P.; Meincke, H. (Hg.) (2017): Chemie 4.0 - Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch. Endbericht. Deloitte; Verband der chemischen Industrie e.V. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/services/publikationen/broschueren-faltblaetter/vci-deloitte-stuide-chemie-4-punkt-0-langfassung.jsp>, zuletzt geprüft am 26.10.2020.

Feil, Alexander (2020): Standardisierte Verpackungen – eine Lösung für mehr Recycling von Kunststoffen? Circular Economy – Marktakzeptanz durch Wissens- und Technologietransfer. DIN-Deutsches Institut für Normung e. V., 28.10.2020.

Feil, Alexander; Coskun, Erdogan; Bosling, Marcel; Kaufeld, Sebastian; Pretz, Thomas (2019): Improvement of the recycling of plastics in lightweight packaging treatment plants by a process control concept. In: *Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 37 (2), S. 120–126. DOI: 10.1177/0734242X19826372.

Frounchi, M. (1999): Studies on Degradation of PET in Mechanical Recycling. *Macromol. Symp.* 144, 465-469 (1999). Hg. v. WILEY-VCH Verlag GmbH. Weinheim. Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/masy.19991440142>, zuletzt geprüft am 11.11.2020.

FSKZ Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e.V. (o.J.): Thermo-oxidative Alterung von Polyolefinen. Unter Mitarbeit von M. Wenzel und B. Gerets. Würzburg.

Online verfügbar unter

<https://www.skz.de/de/forschung/geschaeftsfelder/bauteileigenschaften/neuer-ordner/2972.Thermo-oxidative-Alterung-von-Polyolefinen.html#:~:text=Polyolefine%20und%20darunter%20vor%20allem,oder%20gar%20100%20Jahren%20gestellt.,> zuletzt geprüft am 11.11.2020.

Glaz, T. (30.11.2020): Recyclingsituation in Deutschland. Interview mit A. Turuc.

Götz, M. (16.11.2020): Sortierung von LVP. Interview mit A. Turuc. Gernsheim.

Günther, S.; Vogt, M. (2018): Europas modernste LVP Sortieranlage. In: *Umwelt Magazin*, S. 20–23. Online verfügbar unter https://www.sutco.de/fileadmin/news/pdf/2018-08--lvp_anlage_gernsheim_umweltmagazin/UmweltMagazin_07-08_2018_UMW_07-08-2018.pdf, zuletzt geprüft am 02.11.2020.

Henkel AG & Co. KGaA (2019): Henkel führt recycel-bare schwarze Plastik-verpackungen ein. Zusammenarbeit mit Ampacet zur Förderung einer Kreislaufwirtschaft. Düsseldorf. Online verfügbar unter <https://www.henkel.de/presse-und-medien/presseinformationen-und-pressemappen/2019-05-03-henkel-fuehrt-recyclbare-schwarze-plastikverpackungen-ein-937134>, zuletzt geprüft am 14.01.2021.

Henkel AG & Co. KGaA (2020): Henkel ist Vorreiter der digitalen Wasserzeichen-Technologie mit neuer Vernel-Produktreihe. „HolyGrail 2.0“-Pilotprojekt zur Förderung von hochwertigem Verpackungsrecycling. Düsseldorf. Online verfügbar unter <https://www.henkel.de/presse-und-medien/presseinformationen-und-pressemappen/2020-09-08-henkel-ist-vorreiter-der-digitalen-wasserzeichen-technologie-mit-neuer-vernel-produktreihe-1112252>, zuletzt geprüft am 14.01.2021.

Hischier, Roland (2014): Ökobilanz von Tragetaschen. Schlussbericht. Version (2014). Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research. Sankt Gallen. Online verfügbar unter <https://www.empa.ch/documents/56122/458579/Oekobilanz-Tragetaschen.pdf/490f9506-a9d1-4ad8-ac56-e797cc39246a?version=1.1>, zuletzt geprüft am 27.01.2021.

Hopmann, C.; Michaeli, W. (2017): Einführung in die Kunststoffverarbeitung. 8., aktualisierte Auflage. München: CARL HANSER Verlag GMBH.

IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. (2019): Wie können wir Recyclate aus Kunststoffverpackungen verstärkt im Kreislauf führen? Stellungnahme der IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. im Rahmen des öffentlichen Fachgesprächs des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit des Deutschen Bundestags am 10. April 2019. Bad Homburg. Online verfügbar unter https://www.bundestag.de/resource/blob/633596/9fbdfddad6c3865f86ccae554f5b64f5/19-16-186-B_Fachgespraech_Recyclate_Dr-Isabell-Schmidt-data.pdf, zuletzt geprüft am 10.11.2020.

Institut cyclos-HTP GmbH (2019): Prüfung und Testierung der Recyclingfähigkeit. Anforderungs- und Bewertungskatalog des Institutes cyclos-HTP zur EU-weiten Zertifizierung (CHI Standard). Fassung 4.0. Aachen. Online verfügbar unter <https://www.cyclos-htp.de/publikationen/a-b-katalog/>, zuletzt geprüft am 15.01.2021.

Jin, Huiying; Gonzalez-Gutierrez, Joamin; Oblak, Pavel; Zupančič, Barbara; Emri, Igor (2012): The effect of extensive mechanical recycling on the properties of low density polyethylene. In: *Polymer Degradation and Stability* 97 (11), S. 2262–2272. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.039.

Kartalis, C.N; Papaspyrides, C.D; Pfaendner, R. (2000): Recycling of post-used PE packaging film using the restabilization technique. In: *Polymer Degradation and Stability* 70 (2), S. 189–197. DOI: 10.1016/S0141-3910(00)00106-3.

Kuchta, K. (2019): Recyclingfähigkeit von Kunststoffen. Kuchta, K. Abfallwirtschaftsgipfel 2019. Online verfügbar unter https://www.srh-events.hamburg/export/sites/hamburg_trend/weitere-veranstaltungen/.galleries/2019/vortraege/awg2019_kuchta.pdf, zuletzt geprüft am 05.10.2020.

La Mantia, F. P. (1998): The Role of Additives in the Recycling of Polymers. Hg. v. WILEY-VCH Verlag GmbH. Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Processi e dei Materiali, Università di Palermo. Weinheim (Macromol. Symp., 135, 157-165).

Langer, Alexander (15.05.2020): Kunststoffrecycling. Folge 15. Interview mit Christian Schiller.

Lazarevic, David; Aoustin, Emmanuelle; Buclet, Nicolas; Brandt, Nils (2010): Plastic waste management in the context of a European recycling society: Comparing results and

uncertainties in a life cycle perspective. In: *Resources, Conservation and Recycling* 55 (2), S. 246–259. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.09.014.

Lebensmittel Zeitung (2016): Beim Entwurf ans Wiederverwerten denken. Recyclingfähigkeit. In: *Lebensmittel Zeitung*, 23.09.2016. Online verfügbar unter <https://www.lebensmittelzeitung.net/handel/Recyclingfaehigkeit-Beim-Entwurf-ans-Wiederverwerten-denken-125344>, zuletzt geprüft am 18.01.2021.

Linganiso, Linda Zikhona (2018): "Waste-to-Profit" (W-t-P). Hauppauge: Nova Science Publishers Incorporated (Environmental Remediation Technologies, Regulations and Safety). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5316275>.

Lobbe Entsorgung West GmbH & Co KG und Lobbe Industrieservice GmbH & Co KG (2020): Kreislaufwirtschaft made in NRW. Iserlohn. Sabine Günther, Stenglingser Weg 4 – 12, D-58642 Iserlohn. Online verfügbar unter <https://www.lobbe.de/kreislaufwirtschaft-made-in-nrw/>, zuletzt geprüft am 02.10.2020.

Lucht, Alena; Weber, Hannah Sophia; Widderich, Fee (2018): Chemikalien in Plastik. Eine Gefahr für Mensch und Meer. Baltic Environmental Forum 2018. Hamburg. Online verfügbar unter https://www.bef-de.org/wp-content/uploads/2019/06/2018-12_CHEM_MANAGEM_ChemikalienInPlastik_2ndEd.pdf.

Maag GmbH: Recyclingfähige Einstoff-Hochbarriere Verpackungen zum Schutz Ihrer Ware und der Umwelt! Maag | pro-tect barrier. Portfolio. Iserlohn. Online verfügbar unter <https://maag.de/images/portfolio/circular/Maag-pro-tect-barrier-DE.pdf>, zuletzt geprüft am 14.01.2021.

Martens, Hans (2011): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10422276>.

Martens, Hans; Goldmann, Daniel (2016): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Maschinenbau-Wissen.de (Hg.) (2021): Kunststoffaufbereitung - Aufbereitung von Thermoplasten. Sämtliche Aufgaben der Aufbereitung eines Kunststoff in einer kontinuierlichen Aufbereitungsanlage. Online verfügbar unter <https://www.maschinenbau->

wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/399-kunststoff-aufbereitung, zuletzt aktualisiert am 14.01.2021.

Middendorf, E. (2019): So wenig Kunststoff wie möglich? In: *neue verpackung*, 18.09.2019 (09.2019). Online verfügbar unter <https://www.neue-verpackung.de/64873/so-wenig-kunststoff-wie-moeglich/>, zuletzt geprüft am 14.01.2021.

Müllers, S. (2019): Was ist der Unterschied zwischen einem „Bringsystem“ und einem „Holsystem“ in der Abfallwirtschaft? Online verfügbar unter <https://www.biotonnefuerrier.de//was-ist-der-unterschied-zwischen-einem-bringsystem-und-einem-holsystem-in-der-abfallwirtschaft/>, zuletzt geprüft am 05.11.2020.

Obermeier, T.; Lehmann, S. (Hg.) (2019): Recycling und Rohstoffe. Recyclingquoten – Wo stehen Deutschland, Österreich und die Schweiz mit dem neuen Rechenverfahren im Blick auf EU-Ziele? Unter Mitarbeit von Thiel, S., Holm, O., Thomé-Kozmiensky, E., Goldmann, D., Friedrich, B. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag (12).

Opitz, T.; Bley, Th. (2004): Verbundprojekt: Aktive Verpackung mit antimikrobiellen - Teilprojekt 3. Toxikologische Bewertung von aktiven Verpackungen mit antimikrobiellen Eigenschaften. Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik. Berlin. Online verfügbar unter https://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/31666_-_Abschlussbericht.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2020.

PlasticsEurope Deutschland e. V. (2019): Plastics - the Facts 2019. An analysis of European plastics production, demand and waste data. Kurzfassung. Online verfügbar unter <https://www.plasticseurope.org/de/resources/market-data>, zuletzt geprüft am 14.10.2020.

Polysecure GmbH (2019): Die Recycling-Revolution TBS. Tracer-Based-Sorting sorgt für Ordnung im Abfallstrom. Freiburg. Jochen Mößlein, info@polysecure.eu. Online verfügbar unter <https://www.polysecure.eu/sortieren/>, zuletzt geprüft am 12.10.2020.

RAL gGmbH (Januar 2019): Blauer Engel. Das Umweltzeichen. Produkte aus Recyclingkunststoffen (DU-UZ 30a). Bonn, umweltzeichen@ral.de. Online verfügbar unter <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%2030a-201901-de%20Kriterien-2020-09-28.pdf>.

Reclay Holding GmbH (2016): Verpackungslizenzierung leicht gemacht. Köln, group@reclay-group.com. Online verfügbar unter <https://www.reclay->

group.com/de/images/Content/Presse/broschueren/Verpackungslizenzierung_07_2016.pdf, zuletzt geprüft am 30.10.2020.

Reichenbach, S. (2020): LVP Sortieranlage in Ölbronn, 26.11.2020. E-Mail an A. Turuc.

Roth, S. (2020): Hemmnisse für den Rezyklat-Einsatz, 07.12.2020. E-Mail an A. Turuc.

Rudolph, Natalie; Kiesel, Raphael; Aumnate, Chuanchom (2020): Einführung Kunststoffrecycling. Ökonomische, ökologische und technische Aspekte der Kunststoffabfallverwertung. München: Hanser.

Sartorius, I. (2020): Geschäftsbericht 2019. PlasticsEurope Deutschland e. V. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <https://www.plasticseurope.org/de/resources/publications>, zuletzt geprüft am 14.10.2020.

Sasse, Frank; Emig, Gerhard (1998): Chemical Recycling of Polymer Materials. In: *Chem. Eng. Technol.* 21 (10), S. 777–789. DOI: 10.1002/(SICI)1521-4125(199810)21:10<777::AID-CEAT777>3.0.CO;2-L.

Schneider, C. (02.12.2020): Kunststoffrecycling. Interview mit A. Turuc. Eisfeld.

Schonlau, A. (2020): Unter welchen Voraussetzungen entscheiden sich Unternehmen für ein recyclingfreundliches Design? Dialogforum Kreislaufwirtschaft. Nabu e.V., 26.11.2020. Online verfügbar unter <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/veranstaltungen/201207-nabu-kreislaufwirtschaft-vortrag-ansgar-schonlau-maag.pdf>.

Schüler, K. (2015): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2012. Texte 50/2015. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_50_2015_verpackungsabfaelle_2012.pdf, zuletzt geprüft am 06.01.2021.

Schüler, K. (2018): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2016. UBA-Texte 58/2018. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/aufkommen_und_verwertung_von_verpackungsabfaellen_in_deutschland_im_jahr_2016_final., zuletzt geprüft am 02.10.2020.

Schüler, K. (2019): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2017. Abschlussbericht. TEXTE 139/2019. Hg. v. Umweltbundesamt.

Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/2019_11_19_aufkommen_u_verwertung_verpackungsabfaelle_2017_final.pdf, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Siesler, Heinz W.; Ozaki, Yukihiro; Kawata, Satoshi; Heise, Herbert M. (2002): Near-infrared spectroscopy. Principles, instruments, and applications. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.

Stadtreinigung Hamburg AöR (2019): Einkaufsguide Verpackungen. Die Ampel für nachhaltigen Konsum und besseres Recycling. Hamburg, info@stadtreinigung.hamburg.de. Online verfügbar unter <https://www.stadtreinigung.hamburg/einkaufsguide/#20>, zuletzt geprüft am 05.10.2020.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019): Umwelt. Abfallentsorgung. 2017. Wiesbaden, www.destatis.de/kontakt. Online verfügbar unter

<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft->

[Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallentsorgung-2190100177004.pdf?__blob=publicationFile&v=2](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallentsorgung-2190100177004.pdf?__blob=publicationFile&v=2), zuletzt geprüft am 06.10.2020.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (03.2020): Pro Kopf 68 Kilogramm Verpackungsmüll im Jahr 2018. 5,7 Millionen Tonnen Verkaufsverpackungen bei privaten Haushalten eingesammelt. Wiesbaden. Online verfügbar unter

https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/03/PD20_103_321.html;jsessionid=ABF3F8C25BDA01791C5BCB1E6D910FD9.internet8732, zuletzt geprüft am 05.10.2020.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (01.07.2020): Umwelt. Abfallbilanz (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen),

www.destatis.de/kontakt. Online verfügbar unter

<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft->

[Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.pdf?__blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 27.10.2020.

Steinert GmbH (2021): NIR-Sortieraggregat mit Hyper Spectral Imaging-Kameratechnik.

State of the Art – kamerabasierte NIR-Technologie für noch bessere Sortierergergebnisse. Köln.

Online verfügbar unter <https://steinertglobal.com/de/magnete-sensorsortierer/sensorsortierung/nir-sortiersysteme/unisort-pr/>.

Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister (2020): Vorläufig zuzuordnende Marktanteile der Systeme für das zweite Quartal 2020. auf Basis der Zwischenmeldung vom 15. März 2020 mit Stichtag der Mengenerhebung 05. März 2020. Osnabrück. Online verfügbar unter https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Marktanteile/Marktanteile_der_Systeme_fuer_das_zweite_Quartal_2020.pdf, zuletzt geprüft am 05.10.2020.

Strömberg, Emma; Karlsson, Sigbritt (2009): The design of a test protocol to model the degradation of polyolefins during recycling and service life. In: *J. Appl. Polym. Sci.* 112 (3), S. 1835–1844. DOI: 10.1002/app.29724.

Thiel, Stephanie; Thomé-Kozmiensky, Elisabeth; Goldmann, Daniel (Hg.) (2018): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.

Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, Daniel (2009): Recycling und Rohstoffe. Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.

Thor, M. (02.12.2020): Kunststoffrecyclinganlage Eisfeld. Interview mit A. Turuc. Eisfeld.

Umweltbundesamt (2018): Verpackungen. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/verpackungen#undefined>, zuletzt aktualisiert am 11.01.2021.

Umweltbundesamt (2019): Ressourcenschonung durch Steigerung der Sortiereffizienz bei der Aufbereitung von Verpackungsabfallgemischen. Kurzbeschreibung. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltinnovationsprogramm.de/projekte/ressourcenschonung-durch-steigerung-der-sortiereffizienz-bei-der-aufbereitung-von>, zuletzt aktualisiert am 02.11.2020.

Umweltbundesamt (2020): Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe. Häufig gestellte Fragen - FAQ. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/biobasierte-biologisch-abbaubare-kunststoffe#33-sind-biologisch-abbaubare-kunststoffe-fur-die-kompostierung-im-garten-geeignet>, zuletzt geprüft am 28.01.2021.

Unilever Deutschland Holding GmbH (Hg.) (2021): Sauber, Hamburg! Flasche aus 100 % recyceltem Plastik aus Hamburg für Hamburg. Hamburgs Wertstoff Initiative. Online verfügbar unter <https://hamburgs-wertstoff-innovative.de/>, zuletzt geprüft am 14.01.2021.

VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (August 2020): Dauerhafter Markt für Recyclate - Kreislaufwirtschaft mit Zukunft. Diskussionspapier. Frankfurt am Main. Dr. Sarah Brückner, sarah.brueckner@vdma.org. Online verfügbar unter https://www.vdma.org/documents/266241/50347120/Diskussionspapier_Dauerhafter%20Markt%20f%C3%BCr%20Rezyklate_1597742445018.pdf/6621a475-d358-025d-e162-73b284d43880, zuletzt geprüft am 17.11.2020.

Verbraucherzentrale (05.05.2020): Aktive Verpackungen: längere Haltbarkeit bei Lebensmitteln. Düsseldorf. Oliver Havlat, gemeinschaftsredaktion@verbraucherzentrale.nrw. Online verfügbar unter <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/lebensmittel/lebensmittelproduktion/aktive-verpackungen-laengere-haltbarkeit-bei-lebensmitteln-7066>, zuletzt geprüft am 12.10.2020.

Verpackungsregister Zentrale Stelle (2020): Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG. Osnabrück. Online verfügbar unter https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Mindeststandard/Mindeststandard_VerpackG_2020.pdf, zuletzt geprüft am 02.10.2020.

Vetter, M.; Schmitt, W. (o.J.): Rohstoffliches Recycling von Kunststoffrohrmaterialien. Online verfügbar unter https://www.vestolit.de/vestolit-de-wAssets/docs/RohstofflichesRecyclingKunststoffrohrmaterialien_KVR.pdf, zuletzt geprüft am 05.11.2020.

Vilaplana, Francisco; Karlsson, Sigbritt (2008): Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review. In: *Macromol. Mater. Eng.* 293 (4), S. 274–297. DOI: 10.1002/mame.200700393.

VinylPlus (Hg.) (2015): PVC-Recycling-Technologien. Brüssel. Online verfügbar unter https://vinylplus.eu/uploads/2015-12-08_Recycling-Technologies-German.pdf, zuletzt geprüft am 07.12.2020.

Werner und Mertz GmbH (2019): Deutscher Verpackungspreis geht gleich zweimal an Projekte der Recyclat-Initiative. Mainz. Online verfügbar unter https://www.werner-mertz.de/Pressecenter/Pressetexte/Detail_8000.html, zuletzt geprüft am 14.01.2021.

Werner und Mertz GmbH (2020a): Patentierter Standbodenbeutel: Der ökologische Alleskönner. Mainz. Online verfügbar unter <https://www.werner-mertz.de/Nachhaltigkeit/Nachhaltiger-Standbeutel/>, zuletzt geprüft am 14.01.2020.

Werner und Mertz GmbH (2020b): Erneuter Meilenstein für den Einsatz nachhaltiger Druckfarben. Nach Offsetdruckfarbsystem nun auch Flexo-Druckfarbsystem für flexible Folien mit Material Health Certificate GOLD der Cradle to Cradle Certified™ Zertifizierung gelungen. Mainz. Online verfügbar unter https://www.werner-mertz.de/Pressecenter/Pressetexte/Detail_8960.pdf, zuletzt geprüft am 14.01.2021.

Widmann, M. (19.11.2020): Jetzt wird auf die Tube gedrückt. Plastik in Verpackungen hat einen miserablen Ruf. Nun trennen sich viele Unternehmen davon - was der Umwelt aber bisweilen mehr schadet als nutzt. Interview mit R. Schneider. Die Zeit.

Wieczorek, Michael (2019): Möglichkeiten und Grenzen moderner LVP - Sortieranlagen. "Aktuelle Entwicklungen in der Kreislaufwirtschaft" 42. Seminar für kommunale Abfallberater im Freistaat Sachsen. Lobbe Entsorgung West GmbH & Co KG und Lobbe Industrieservice GmbH & Co KG. LVR - Entsorgungsgemeinschaft Sachsen e.V. Dresden, 12.06.2019. Online verfügbar unter http://lvr-sachsen.de/fileadmin/downloads/dateien/seminare/kommunale_Abfallberater/42_Seminar-Abfallber_Wieczorek.pdf, zuletzt geprüft am 23.11.2020.

Wilts, H.; Feder, L.; Schinkel, J.; Lauten-Weiss, J.; Azak, G. (2020): Prevention of plastic waste in production and consumption by multi-actor partnerships. Hg. v. PREVENT Waste Alliance. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH. Wuppertal. Online verfügbar unter https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7519/file/7519_Plastic_Waste.pdf, zuletzt geprüft am 18.11.2020.

Woidasky, Jörg; Heyde, Michael; Sander, Immo; Moesslein, Jochen; Fahr, Martin; Richards, Bryce et al.: Hochwertiges Recycling durch Tracer-Nutzung. Mit dem „Tracer-Based-Sorting“-Ansatz sollen Verkaufsverpackungen zielgerichtet aus dem Abfallstrom abgetrennt werden. In: ReSource, 30. Jahrgang 2017, Heft 4, 2017, S. 24-28. Online verfügbar unter <https://www.hs->

pforzheim.de/fileadmin/user_upload/uploads_redakteur/Forschung/INEC/Dokumente/Projekt_e/MaReK/MaReK_2017_Woidasky_Hochwertiges_Recycling_durch_Tracer-Nutzung.pdf, zuletzt geprüft am 12.10.2020.

Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) (30.08.2019): Mindeststandart für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligten Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG. Im Einvernehmen mit dem Umweltbundesamt. Osnabrück. Online verfügbar unter https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Mindeststandard/Mindeststandard_VerpackG_2019.pdf, zuletzt geprüft am 14.10.2020.

Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) (Oktober 2019): Recyclingquoten 2018. Stand Oktober 2018. Osnabrück. Online verfügbar unter https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/Auswertungen/Recyclingquoten_2018__Stand_Oktober_2019_.pdf, zuletzt geprüft am 18.11.2020.

Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) (2020): Vorläufig zuzuordnende Marktanteile der Systeme für das vierte Quartal 2020. Auf Basis der Zwischenmeldung vom 15. September 2020 mit Stichtag der Mengenerhebung 04. Online verfügbar unter https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Marktanteile/Marktanteile_Vorlaeufig_zuzuordnende_Marktanteile_der_Systeme_fuer_das_vierte_Quartal_2020.pdf, zuletzt geprüft am 04.11.2020.

Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) (Dezember 2020): Vorläufig zuzuordnende Marktanteile der Systeme für das erste Quartal 2021. (auf Basis der Zwischenmeldung vom 15. Dezember 2020 mit Stichtag der Mengenerhebung 04. Dezember 2020). Osnabrück. Online verfügbar unter https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Marktanteile/Marktanteile_vorlaeufig_zuzuordnende_Marktanteile_der_Systeme_fuer_das_erste_Quartal_2021.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2021.

Anhang

Zusammenfassungen der geführten Interviews

Interview mit Herrn Glaz (Werner und Mertz GmbH) vom 30.11.2020

Das größte Hemmnis für den Einsatz von Rezyklaten ist der hohe Preis für Rezyklate. Dieser liegt aktuell über dem Preis für Neukunststoffware. Durch die Covid-19 Pandemie hat sich die Preissituation weiter verschlechtert. Neben der Preissituation argumentieren Unternehmen mit Qualitätsverlusten der Produkte, die sich aufgrund des Einsatzes von Rezyklaten ergeben. Von den Dualen Systemen werden keine Anreize für recyclinggerechte Verpackungen und Verpackungen mit einem hohen Rezyklat-Anteil gegeben. Da die Dualen Systeme Unternehmen sind, die in Konkurrenz zueinanderstehen, bedeuten solche Anreize Gewinnverluste. Die Gründung eines Fonds, in den die Dualen Systeme einzahlen müssten, aus dem dann Anreize an Unternehmen ausgezahlt würden, wäre eine effektive Alternative zum Status quo.

Im Rahmen der Rezyklat Initiative werden Spülmittelflaschen der Firma Werner und Mertz zu 100 Prozent aus Rezyklaten hergestellt. Die Rezyklate stammen zu 80 Prozent aus der PET-Getrenntsammlung und zu 20 Prozent aus dem Gelben Sack. Die Firma zeigt durch ihre Initiative, dass aufbereitete Rezyklate eine bessere Qualität besitzen, als teilweise von Unternehmen angenommen wird. Bezüglich der Zusammensetzungen und Reinheit von Rezyklaten existieren keine gesetzlichen Regelungen. Um negative gesundheitliche und ökologische Folgen zu minimieren, werden die Rezyklate in einer Grundanalyse im Labor auf Schadstoffe untersucht, bevor sie als Sekundärrohstoffe eingesetzt werden. Es ist unbekannt, wie sich Additive bei mehrfach aufbereitetem Kunststoff verhalten. Laborversuche zeigen eine Abnahme der Länge der Polymerketten. In der Praxis fehlen jedoch Versuche, die dies bei Kunststoffabfall aus dem LVP-Abfall bestätigen.

Durch die Substitution von Einstoff-Lösungen gegenüber Verbundverpackungen können ökologische und ökonomische Vorteile erzielt werden. Gegenüber Verbundverpackungen benötigen Einstoff-Lösungen größere Kunststoffmengen. Durch die Recyclingfähigkeit der Einstoff-Lösungen können die verwendeten Rohstoffe im Kreis geführt werden. Das Recycling von Kunststoffen spart bis zu 60 Prozent der Energie gegenüber der Neukunststoffproduktion. Es ist ressourceneffizienter und die CO₂ Bilanz ist deutlich besser.

Um eine hohe Recyclingfähigkeit zu erreichen, setzt die Firma Werner und Mertz bei ihrer Spülmittelflasche eine Banderole ein, die sich durch eine Heiß-/Kaltwäsche abwaschen lässt. Die bedruckte Folie wandert in die gemischtfarbige PET-Sektion und kann werkstofflich recycelt werden. Aktuell wird sich mit der Forschung für abwaschbare Folien und biologisch abbaubaren Farbstoffen befasst.

Bei zunehmender Vermischung mit anderen Materialien ordnen Sortieranlagen den einzelnen Fraktionen falsches Material zu. Dadurch reduziert sich das verfügbare Volumen von hochwertig recycelbarem Material. Ein werkstoffliches Recycling bietet sich aufgrund der sortenreinen Erfassung bei PET-Pfandflaschen an. Aktuell werden etwa 30 Prozent wieder zu Flaschen verarbeitet, 40 Prozent werden weiterverkauft.

Interview mit Herrn Götz (Meilo GmbH) vom 16.11.2020

Die über die Dualen Systeme lizenzierten Produkte werden in der LVP-Sortieranlage in 13 verschiedene Fraktionen aufgeteilt. Zu Beginn des Sortierprozesses wird der LVP-Abfall durch einen Langsamläufer und einen Schredder geführt. Es folgen Siebtrommeln, ballistische Separatoren, Magnetscheider, Windsichter, Wirbelstromabscheider und NIR-Spektrometer. Über die NIR-Spektrometer können die einzelnen Kunststofffraktionen erkannt und gezielt ausgeschossen werden. Über eine händische Sortierung werden falsch sortierte Materialien ihren Fraktionen zugeordnet. Nachgeschaltete Ballenpressen komprimieren die einzelnen Stofffraktionen. Knapp die Hälfte des Input-Materials kann keiner Fraktion zugeordnet werden und gelangt als Sortierrest in die energetische Verwertung.

Großflächige Bänderolen auf Kunststoffverpackungen, eine schwarze Färbung der Kunststoffe und mehrschichtige Verpackungen sind vermeidbare Hemmnisse einer LVP-Sortierung. Verpackungen werden nach ökonomischen Vorteilen und zulasten des Design-for-Recyclings konzipiert. Ein Beispiel dafür sind ruß-basierte schwarze Farben, die auf den Verpackungen aufgetragen werden. Diese sind günstiger in der Anschaffung als recyclinggerechte Lösungen und werden daher vorzugsweise eingesetzt.

Durch den öffentlichen Druck reduzieren die Verpackungsproduzenten den Kunststoffanteil der Verpackungen. Dies geht zulasten der Recyclingfähigkeit der Verpackungen, deren Stabilität durch andere Materialien gewährleistet werden muss. Die entstandene Verbundverpackung wird einer falschen Fraktion zugeordnet oder gelangt als Sortierrest in die energetische Verwertung. Gelangt eine Kunststoffverpackung mit einem Aluminiumanteil von mehr als 2 Gewichtsprozent in den Wirbelstromabscheider, wird diese der Aluminiumfraktion zugeordnet. In der Folge wird die Kunststofffraktion dem werkstofflichen Recyclingprozess entzogen und die Recyclingquote sinkt.

Die Folienfraktion ist die größte Stofffraktion, die am Input der LVP-Sortieranlage in Gernsheim einer Verwertung zugeführt wird. Es folgen Weißblech, PP-, PET-, PO-Flex, PE-HD-, Aluverpackungen und Flüssigkartons. Papier und die PS-Fraktion befinden sich seltener im angelieferten LVP-Abfall.

Um eine bessere Output-Qualität zu erreichen, bietet sich die Erfassungsform Gelber Sack an. LVP-Abfall, der über diese Erfassungsform angeliefert wird, ist weniger mit anderen Stoffen vermischt und kann daher besser sortiert werden.

Um eine bessere Recyclingquote zu erhalten, wäre der Einsatz von Einstoff-Verpackungen von Vorteil. Diese würden den Recyclingprozess erleichtern beziehungsweise ermöglichen. Ist dies nicht umsetzbar, könnte das Verpackungsdesign so angepasst werden, dass der Konsument gezwungen ist, die Verpackung in ihre Verpackungsbestandteile zu zerlegen, um an das Produkt zu gelangen.

Interview mit Herrn Thor (systec plastics Eisfeld GmbH) vom 02.12.2020

Die Kunststoffrecyclinganlage in Eisfeld befasst sich hauptsächlich mit der Herstellung von Rezyklaten aus der PE-LD-Fraktion des LVP-Abfalls. Diese Fraktion stammt aus LVP-Sortieranlagen, die Post-Consumer Abfälle verarbeiten. Eine vorgeschaltete Behandlung im Sinne einer Sammlung, Sortierung und Reinigung ist bei Post-Consumer Abfällen notwendig, um Verunreinigungen und Störstoffe auszusortieren und sortenreine Fraktionen zu erzeugen. Die aus den LVP-Sortieranlagen angelieferte PE-LD-Fraktion hat einen Reinheitsgehalt von circa 95 Prozent. Höhere Reinheitsgehalte gestalten sich für die LVP-Sortierbetriebe unwirtschaftlich, da diese über die verarbeitete Input-Menge bezahlt werden. Dies wirkt sich auf die Qualität der Output-Fractionen der LVP-Sortieranlagen aus. Recyclingbetriebe müssen für eine höhere Rezyklat-Qualität weitere Reinigungs- und Aufbereitungsschritte betreiben.

Die Anforderungen an die Rezyklate variieren und erfordern je nach Kundenanforderung Prozessanpassungen. Starke farbliche Unterschiede innerhalb der Kunststofffraktion und Verbundmaterialien begrenzen die Qualität der Rezyklate. Aufgrund gezielter Dosierungsmöglichkeiten in Verbindung mit der Beimischung von Füllstoffen, Additiven und Verstärkungstoffen, durch Entgasung oder durch reaktive Extrusion können Rezyklate erzeugt werden, die in ihrer Erscheinung dem Neugranulat ähneln. Um die Qualität der Rezyklate nachhaltig zu verbessern, müsste die Produktvielfalt eingeschränkt und vermehrt Monomaterial eingesetzt werden. Eine nicht vorhandene Rezyklat-Einsatzquote und das Fehlen von finanziellen Anreizen sind Gründe für eine niedrige Rezyklat-Einsatzquote in Deutschland. Die Einführung einer Rezyklat-Einsatzquote von 5 bis 10 Prozent und eine langsame Erhöhung dieser würde Prozessanpassungen der produzierenden Unternehmen ermöglichen und die Endverbraucher an Verpackungen aus Sekundärrohstoffen gewöhnen.

Interview mit Herrn Schneider (systec plastics Eisfeld GmbH) vom 02.12.2020

Im Rahmen einer Führung wurde die Technik und die Prozessführung der Kunststoffrecyclinganlage der systec plastics Eisfeld GmbH erläutert. Die PE-LD-Fraktion wird über mehrere Schritte aufbereitet und zu PE-LD-Regranulaten verarbeitet. Diese Schritte beinhalten eine optische Eingangskontrolle und das Schreddern und Aussortieren von Störstoffen mittels Überbandmagneten, Windsichtern, Befeuchtern, Einrührern, Friktionswäschern und Trockenpressen. In einer Schwimm- und Sinktrennung werden nicht

aussortierte PE-HD Teilchen vom PE-LD-Strom getrennt. Über einen Schneidverdichter, eine Extruderschnecke, einen Granulierer und eine Zentrifuge werden aus der PE-LD-Fraktion getrocknete PE-LD-Regranulate erzeugt. Eine Alternative zur beschriebenen Regranulierung stellt die Direktverarbeitung dar. Dabei werden die Kunststofffraktionen direkt zu neuen Produkten verarbeitet.

Aufgrund von Verunreinigungen durch PP, welches mit 11 – 12 Massenprozent in PE-LD-Regranulaten vorkommt, werden diese hauptsächlich zu geringerwertigen Endprodukten (Downcycling) wie Parkbänken oder Rasensteinen verarbeitet.

Um die Eigenschaften und die Qualität der Regranulate bestimmen zu können, werden aus den Regranulat-Chargen Stichproben entnommen. Der Umfang der Untersuchung richtet sich nach dem Polymertyp. Polymere aus PE-LD werden auf die Parameter Feuchtegehalt, Dichte, MFR und Schüttgewicht getestet. Aus den Untersuchungen des Labors in Eisfeld geht hervor, dass sich über die letzten Jahre die MFR erhöht hat. Gleichzeitig wird das Material spröder. Dies liegt an einer Umlagerung der Polymerketten während des Extrusionsprozesses und der Nutzungsphase des Produktes. Infolge der geringen Menge von recyceltem Kunststoffmaterial im LVP-Abfall spielen Degradationseffekte von Kunststoff-Rezyklaten aktuell eine untergeordnete Rolle. Eine prozentuale Steigerung von recycelten Kunststoffen im LVP-Abfall wird sich in Zukunft jedoch stärker auf die Eigenschaften der Kunststoff-Rezyklate auswirken.

Degradation ausgewählter Polymere während des Recyclingprozesses

Im Folgenden werden Studien vorgestellt, in denen Degradationserscheinungen der Polymere PET, PE-LD, PE-HD und PP im Zuge des Recyclingprozesses beschrieben werden. Für die Studien wurden die Roh-Polymere mehrfach aufgeschmolzen, um ein werkstoffliches Recycling zu simulieren. Die in der Praxis durch Vermischung mit anderen Materialien auftretenden Verunreinigungen der Polymere wurden hier vernachlässigt.

Degradation von PET während des Aufbereitungsprozesses

Degradationseffekte lassen sich bei PET in Form einer Ermittlung des Molekulargewichtes bestimmen. Grund für die Abnahme des Molekulargewichtes sind Kettenspaltungen während des Extrusionsprozesses. In Abbildung 24 ist eine Abnahme des Molekulargewichtes von reinem PET zu wiederaufbereitetem PET in drei Produktionszyklen zu beobachten (Frounchi 1999). Obwohl die Abnahme der Kettenlänge signifikant ist, werden die mechanischen Eigenschaften nur leicht beeinflusst.

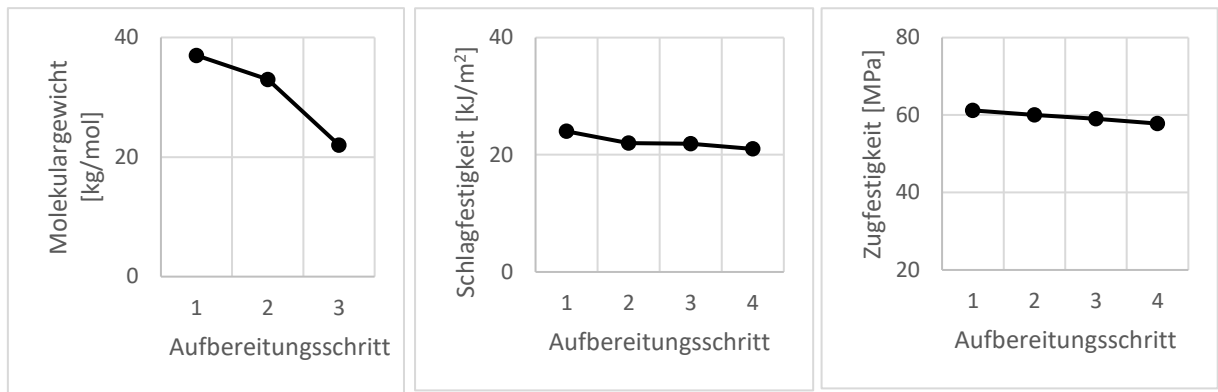


Abbildung 24: Gewichtgemittelttes Molekulargewicht und ausgewählte mechanische Eigenschaften von Roh-PET und wiederaufbereitetem PET in Abhängigkeit der Anzahl der Wiederaufbereitungsschritte (Frounchi 1999)

Die Schlagzähigkeit und die Zugfestigkeit nehmen über drei Extrusionszyklen leicht ab. Um diese Effekte zu minimieren, wird im Wiederaufbereitungsprozess PET-Rohmaterial hinzugegeben. Das Mischungsverhältnis hängt von den gewünschten Produkteigenschaften ab.

In Abbildung 25 (Rudolph et al. 2020) werden das Molekulargewicht und die Schlagfestigkeit in Abhängigkeit verschiedener Mischungsverhältnisse aufgetragen. Das Molekulargewicht des zum zweiten Mal wiederaufbereiteten PET liegt bei 29 kg/mol. Verglichen mit dem Molekulargewicht von wiederaufbereitetem Roh-PET (36 kg/mol) führt ein weiterer Aufbereitungsschritt zu einer Abnahme des Molekulargewichtes um circa 20 Prozent. Die Abnahme der Schlagfestigkeit beträgt bei steigendem Rezyklat-Anteil circa 10 Prozent.

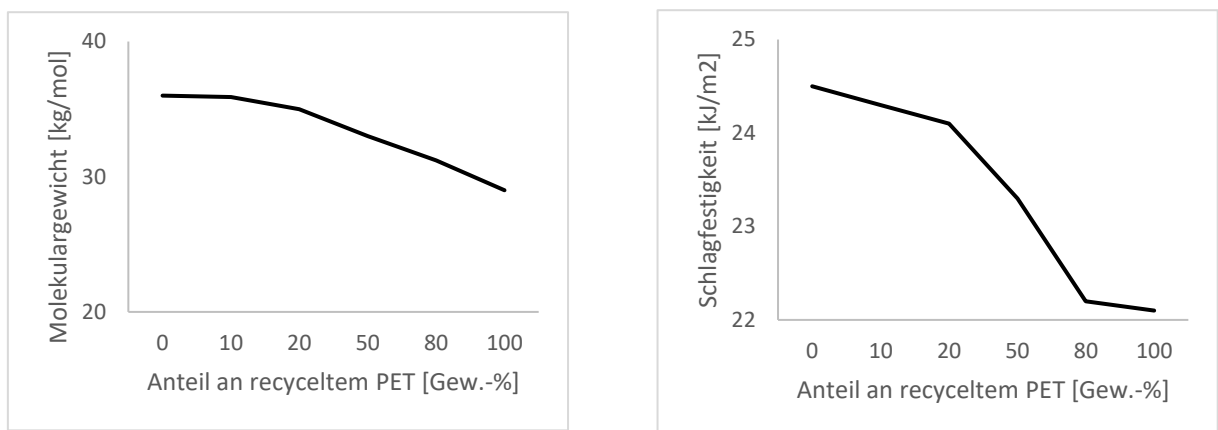


Abbildung 25: Gewichtgemittelttes Molekulargewicht und Schlagfestigkeit von Roh-PET/wiederaufbereitete PET-Mischungen während des ersten Extrusionsprozesses (Frounchi 1999)

Für die Degradation von PET lässt sich zusammenfassen, dass sich Wiederholungen der Extrusionsprozesse geringfügig auf die mechanischen Eigenschaften des PET auswirken. Signifikanter ist die Abnahme des Molekulargewichtes. Eine Abnahme des Molekulargewichtes resultiert in einer Verringerung der Schmelzviskosität. Diese ist die Maßeinheit zur Beurteilung des Fließwiderstandes. Ist der Fließwiderstand zu niedrig, kann

das negative Folgen auf den weiteren Verarbeitungsprozess haben. Werden keine Prozessanpassungen wie eine Verringerung des Einspritzdrucks vorgenommen, wirkt sich dies negativ auf den Streckblasformprozess aus. Aufgrund der nach einem ersten Extrusionsprozess konstant bleibenden mechanischen Eigenschaften eignet sich PET unter Anpassungen der Prozessparameter gut zum werkstofflichen Recycling. Eine konstante Zugabe von bis zu 20 Gewichtsprozent recyceltem PET führt zu Mischungen, die praktisch die Eigenschaften von Roh-PET aufweisen (Frounchi 1999).

Degradationserscheinungen von PP

Isotaktisches PP wird in der Studie von Aurrekoetxea et al. in zehn Wiederholungen in einem Extruder verarbeitet und granuliert. Eine Analyse ergibt, dass das Fehlen von Änderungen in der chemischen Struktur und die Erhöhung des MFR auf Kettenspaltungen zurückzuführen ist. In Abbildung 26 (*links*) bleibt die MFR bis zur vierten Extrusion konstant auf einem Wert. Dies ist auf die Anwesenheit von Stabilisatoren zurückzuführen. Die nach dem 4. Extrusionsprozess ansteigende MFR weist darauf hin, dass der vorherige Prozess den Stabilisator, der zur Verhinderung des Abbaus erforderlich ist, erschöpft ist. Eine insgesamt steigende MFR korreliert mit Kettenbrüchen aufgrund von thermischer Degradation im Extrusionsprozess. Die beobachtete Verringerung des Molekulargewichts durch die MFR erhöht die Beweglichkeit und die Faltbarkeit der Ketten, was einen höheren Kristallinitätsgrad ermöglicht. In Abbildung 26 (*rechts*) ist eine Abnahme der Halbwertszeit der Kristallisation mit steigender Anzahl an Wiederaufbereitungsprozessen zu beobachten. Durch eine sinkende Halbwertszeit der Kristallisationszeit steigt die Kristallisationsrate mit zunehmender Anzahl an Wiederaufbereitungszyklen (Aurrekoetxea et al. 2001). Neben einer Zunahme der Streckgrenze ist eine Abnahme der Bruchdehnung aufgrund der Abnahme des Molekulargewichtes und der geringeren Dichte der Bindungsmoleküle zu beobachten (Aurrekoetxea et al. 2001).

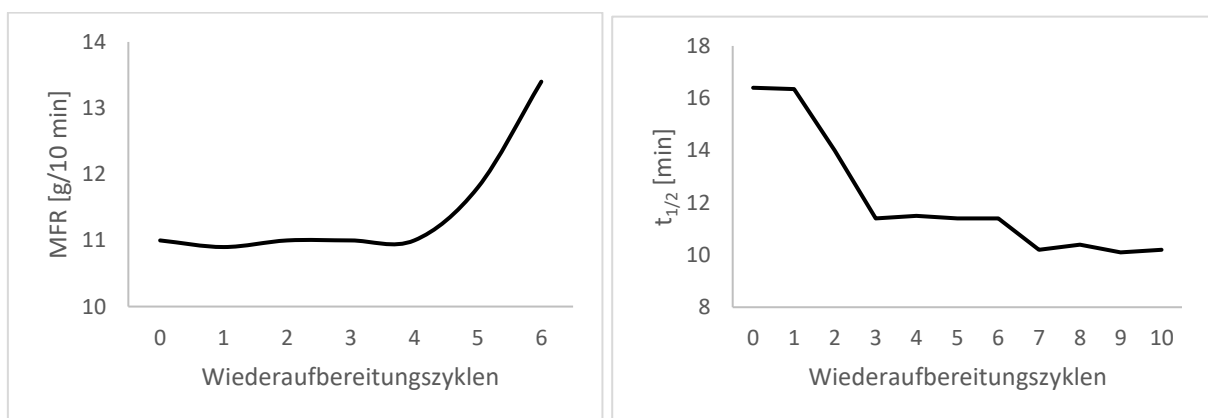


Abbildung 26: MFR und Halbwertszeiten der Kristallisation in Abhängigkeit zu den Wiederaufbereitungszyklen (Aurrekoetxea et al. 2001)

Degradationserscheinungen von PE-LD

In der Studie von Jin et al. wird PE-LD in 100 aufeinanderfolgenden Extrusionszyklen verarbeitet.

Aufgrund der Extrusion treten Kettenspaltungen auf. In Abbildung 27 (*links*) sind die Extrusionszyklen gegen die Komplexe Viskosität aufgetragen. Nachdem die Komplexe Viskosität nach dem ersten Extrusionsprozess leicht abfällt, steigt sie bis zur 100. Wiederholung des Extrusionsprozesses signifikant an. Dieser Anstieg deutet darauf hin, dass werkstoffliches Recycling zu molekularen Umlagerungen führt, die durch thermomechanischen und thermisch-oxidativen Abbau verursacht werden. Im Unterschied zur Degradation von PET laufen Kettenspaltungen parallel zur Bildung von neuen Quervernetzungen ab. Nach einer bestimmten Anzahl an Extrusionen scheint ein Mechanismus den anderen zu dominieren. Dies kann an einer anfänglichen Abnahme der Viskosität begründet werden. Nach dem ersten Extrusionsprozess dominieren die Kettenbrüche. Der folgende kontinuierliche Anstieg der Viskosität deutet auf eine Dominanz der Quervernetzungen gegenüber den Kettenbrüchen hin. Derselbe Trend kann bei der Abnahme der MFR beobachtet werden. In der Abbildung 27 (*rechts*) sinkt die MFR signifikant. Dies deutet auf die Entstehung von Quervernetzungen durch Radikale hin.

In der Studie von Jin et al. wird gefolgert, dass die Verarbeitbarkeit, gemessen durch rheologische Parameter bei hoher Frequenz und die Haltbarkeit von LDPE, gemessen durch Kriechkompatibilität, erst nach dem 40. Extrusionszyklus beeinflusst wird. Grund dafür sind die genannten konkurrierenden strukturellen Umlagerungsmechanismen. Die Autoren der Studie weisen darauf hin, dass die Ergebnisse der Studie strikt auf die angewandten Temperaturen gültig sind. Daher kann es bei abweichenden Temperaturen während des Extrusionsprozesses in der Praxis zu anderen Ergebnissen kommen (Jin et al. 2012).

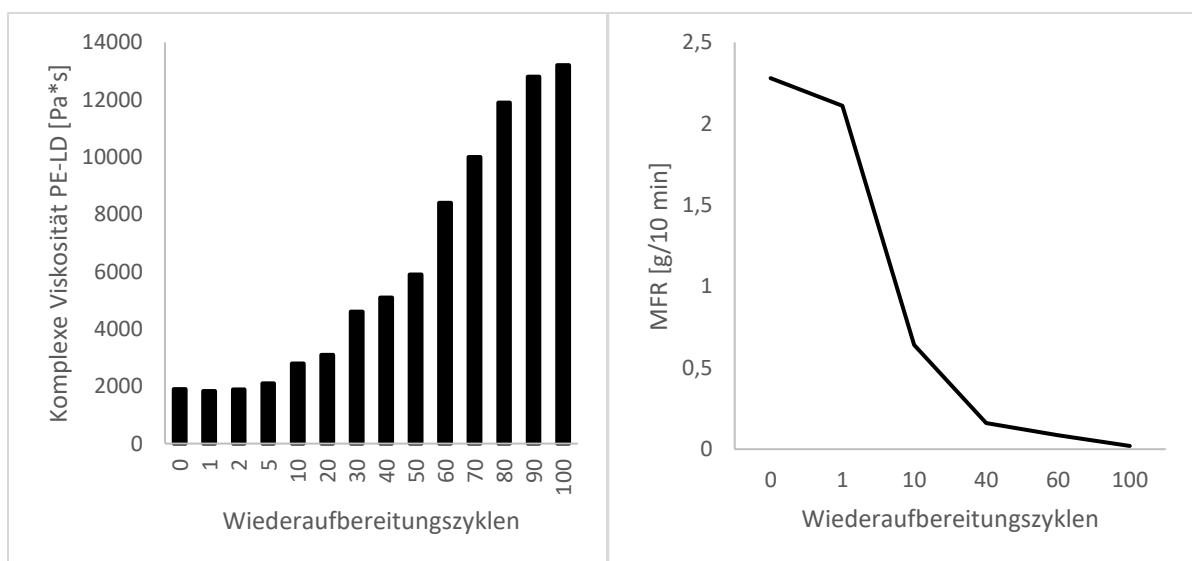


Abbildung 27: Komplexe Viskosität und MFR von PE-LD über 100 Extrusionsschritte (Jin et al. 2012)

Das Ergebnis einer Studie von Karatalis et al. weist auf ähnliche Ergebnisse bezüglich der Verarbeitungsstabilität von PE-LD hin. Es wird gezeigt, dass nach fünf aufeinanderfolgenden Extrusionszyklen eine signifikante Verarbeitungsstabilität einer PE-LD-/PE-MD-Mischung besteht (Kartalis et al. 2000). In der Praxis wird dem recyceltem PE-LD-Granulat meistens Kunststoffneuware zugegeben, um die mechanischen Eigenschaften des Produktes zu verbessern und um vorausgegangene Degradationserscheinungen zu minimieren (Vilaplana und Karlsson 2008).

Degradationserscheinungen von PE-HD

Die Veränderung der mechanischen Eigenschaften und der MFR von PE-HD ist nach mehr als 5 Extrusionszyklen minimal. Die MFR verändert sich aufgrund parallel ablaufender Polymerkettenbrüche und der Neubildung von Quervernetzungen nicht signifikant. Das resultiert in einer konstanten Festigkeit, Steifheit und Duktilität über die Extrusionszyklen (Strömberg und Karlsson 2009). Die Autoren weisen darauf hin, dass industriell recyceltes PE-HD im Vergleich zu dem für die Studie verwendeten Material teilweise schlechtere mechanische Eigenschaften aufweisen.