

Hochschule Magdeburg-Stendal

Fachbereich für Wasser- und Kreislaufwirtschaft



BACHELORARBEIT

BEWERTUNG VON

VERPACKUNGSSYSTEMEN

ANHAND IHRER VERWERTBARKEIT

Verfasser :

Magnus Rudorf

Betreuerin:

Prof. Dr. Gilian Gerke



# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>II</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>III</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>V</b>
<b>1. EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>2. VERPACKUNGSDESIGN IM KONTEXT</b>	<b>3</b>
2.1. Historie der Verpackung	3
2.2. Gesetze und Richtlinien	6
2.3. Allgemeine Verpackungsarten	17
2.4. Aufgaben der Verpackung	19
2.5. Sammlung, Sortierung und Verwertung	23
<b>3. VERPACKUNGSANALYSE</b>	<b>27</b>
3.1. Getränkekartonagen	27
3.2. Joghurtbecher	41
3.3. Glas- und PET-Ketschupflaschen	56
3.4. Auswertung	71
<b>4. FAZIT UND AUSBLICK</b>	<b>75</b>
<b>5. ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>79</b>
<b>6. LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>83</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Müllinsel im Pazifik [3].....	2
Abbildung 2 Abfallhierarchie in Pyramidendarstellung.....	8
Abbildung 3 Verpackungssymbole [28].....	21
Abbildung 4 RFID-Tag [28].....	21
Abbildung 5 Saft in Tetra Paks mit wiederverschließbaren Öffnungen [36] ....	28
Abbildung 6 Getränkekartons einmal anders genutzt [41].....	30
Abbildung 7 Der Aufbau eines Getränkekartons [42].....	32
Abbildung 8 Variante 2 der Weiterverarbeitung [43].....	33
Abbildung 9 Fließbild zur Verwertung von Getränkekartonagen.....	34
Abbildung 10 Die recycelten Zwischenprodukte PE, Aluminium und Zellstoff [35].....	35
Abbildung 11 Milchkarton mit Ausguss.....	36
Abbildung 12 Eine Auswahl an modernen Joghurtbechern.....	42
Abbildung 13 Fünf-Minuten-Terrine (links) [48] und Müsli (rechts) [49] im Kunststoffbecher.....	43
Abbildung 14 Die einzelnen Schritte des FFS-Verfahrens [50].....	44
Abbildung 15 Activia-Joghurtbecher aus PLA.....	45
Abbildung 16 Fließdiagramm zur Verwertung von bedruckten PP-Bechern....	47
Abbildung 17 Fließdiagramm zur Verwertung von PP-Bechern mit Papierbanderole.....	47
Abbildung 18 Fließdiagramm zur Verwertung von PLA-Bechern.....	49
Abbildung 19 PP-Becher mit Papierbanderole.....	51
Abbildung 20 PP-Becher mit Papierbanderole (leer).....	52
Abbildung 21 Bedruckter PP-Becher voll (links) und leer (rechts).....	54
Abbildung 22 Entwicklung des Designs der Heinz Ketchup-Flaschen von Beginn an bis heute [61].....	57

Abbildung 23 PET- und Glasketschupflaschen .....	59
Abbildung 24 Ablauf der Glasflaschenherstellung [1] .....	61
Abbildung 25 Glasflaschen in der Fertigung beim Abkühlen [67].....	62
Abbildung 26 Fließdiagramm zur Verwertung von Altglas .....	66
Abbildung 27 Abhängigkeit der Verwertungsquote von der NIR-Detektionsrate .....	74
Abbildung 28 Verpackung für Chilisoße (links) und Verpackung von Wurstwaren (rechts) .....	76

## Abkürzungsverzeichnis

DSD	Duales System Deutschland
DUH	Deutsche Umwelthilfe e.V.
FFS	Form-Fill-Seal-Verfahren
FS	Form-Seal-Verfahren
GPPS	General Purpose Polystyrol
HIPS	High Impact Polystyrol
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung
LF	Leichtfraktion
LVP	Leichtverpackungen
MVA	Müllverbrennungsanlage
NIR	Nahinfrarot
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PLA	Polymilchsäure (polylactic acid)
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
RS-NIR	Reststoff-Nahinfraroteinheit
SF	Schwerfraktion



# 1. Einleitung

Die Schalen von Nüssen, Äpfeln, Birnen oder Bananen besitzen sehr unterschiedliche Eigenschaften. Sie sind fest oder weich, dünn oder dick und haben doch alle denselben Zweck: Sie schützen das Innere der Früchte vor schädlichen Umwelteinflüssen. Die Schale der Frucht verleiht ihr außerdem ihre äußere Form und Farbe, wodurch z.B. der Reifegrad erkennbar wird.

Auch wir Menschen wollen unsere Erzeugnisse schützen, z.B. vor Schäden beim Transport oder der Lagerung. Dies war der Grund für die Entwicklung der ersten von Menschenhand hergestellten Verpackungen in Form von Ton und Glasbehältern. [1] Mit der Entdeckung weiterer Materialien, wie Metall und Kunststoff, kamen im Laufe der Zeit neue Verpackungsarten hinzu. Heutzutage sind Verpackungen allgegenwärtig. So werden fast neunzig Prozent aller Waren verpackt. [2] Dabei kommen die unterschiedlichsten Materialien zum Einsatz.

Die Gestaltung und der Einsatz von Verpackungen hat eine große wirtschaftliche Bedeutung. Denn, ähnlich wie die Schale einer Frucht, dient auch die Verpackung nicht ausschließlich dem Schutz des Inhalts. Verpackungen vermitteln auch Informationen über das verpackte Produkt, setzen Kaufanreize oder erleichtern den Transport. So investiert die deutsche Wirtschaft jährlich 2,5 bis 3 Mrd. Euro in die Herstellung von Verpackungen. [2]

Doch neben den ökonomischen sind auch ökologische Betrachtungen relevant für die Entwicklung und den Einsatz von Verpackungen. Denn Verpackungen haben unser Leben zwar in vielfacher Hinsicht erleichtert. Doch leider führt der große Bedarf an Verpackungen zu einer Flut an umweltbelastendem Verpackungsabfall. Ein Teil der Verpackungsabfälle wird z.B. in die Weltmeere entsorgt, wie beispielhaft in Abbildung 1 zu sehen ist. Um unserer Verantwortung gegenüber der Umwelt gerecht zu werden, muss jedoch verhindert werden, dass gebrauchte Verpackungen in die Natur gelangen.



**Abbildung 1 Müllinsel im Pazifik [3]**

Ein für Mensch und Umwelt besonders vorteilhafter Weg der Entsorgung von Verpackungsabfällen ist das Recycling. Durch die Wiederverwertung von gebrauchten Verpackungen können die eingesetzten Rohstoffe zurückgewonnen und der Verpackungsabfall umweltfreundlich beseitigt werden. Jedoch lässt sich nicht jede Verpackung gleichermaßen gut wiederverwerten. Aufgrund technischer Gegebenheiten, z.B. in den Abfallsortieranlagen, kann die Verwertbarkeit einer Verpackung z.B. von den verwendeten Materialien, der Farbe oder ihrem Aufbau abhängen.

In dieser Bachelorarbeit wird anhand ausgewählter Verpackungssysteme untersucht, wie sich das Design von Verpackungen auf deren Verwertbarkeit auswirkt. Insbesondere wird für jedes der gewählten Verpackungssysteme eine Analyse zur Bestimmung der Menge an zurückgewonnenen Rohstoffen durchgeführt. Die ermittelten Ergebnisse zeigen, wie stark die Verwertungsquote vom Design der Verpackung abhängt.

## 2. Verpackungsdesign im Kontext

Das Verpackungsdesign unterliegt verschiedenen Randbedingungen. In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Verpackungsthematik dargestellt. Insbesondere wird auf die geschichtlichen, gesetzlichen und praktischen Aspekte, die relevant für die Gestaltung von Verpackungen sind, eingegangen.

### 2.1. Historie der Verpackung

Die Bedeutung der Verpackung hat sich im Laufe der Geschichte drastisch verändert. So hatten die Menschen ursprünglich vor allem das Ziel, ihre Vorräte sicher aufzubewahren. Sie haben diese in natürliche Materialien eingepackt, wie z.B. in Blasen, Tierhäute, Leder oder Pflanzenblätter. Im Laufe der Zeit sind die Menschen dazu übergegangen, ihre Erzeugnisse in Gefäßen aus Ton, Holz oder Gewebe zu lagern. [1] Dazu kamen als nächster Entwicklungsschritt Verpackungen aus Materialien wie Papier oder Wachs. [4] Die Erfindung neuer Verpackungen ging generell meist mit der Entdeckung neuer Grundmaterialien einher. So hat man z.B. bei der Herstellung und Verwendung von Metall herausgefunden, dass es sich nicht nur zur Fertigung von Werkzeugen, sondern auch gut zur Herstellung von Lagerungsbehältern eignete. [4]

Mit Beginn der Industrialisierung im 18. Jahrhundert stieg auch der Handel mit den unterschiedlichsten Gütern sprunghaft an. Die Verpackung erhielt in dieser Zeit zwei weitere Funktionen: Zum einen diente sie nun nicht mehr hauptsächlich der Lagerung, sondern zunehmend auch dem Transport. Zum anderen kam vor gut einem Jahrhundert noch eine weitere Funktion hinzu. Obwohl es bereits im 15. Jahrhundert durch die Erfindung des Buchdrucks neue Möglichkeiten für Produktwerbung gab, bemerkten die Unternehmen erst in der Zeit der Industrialisierung, dass sich ihre Verkaufszahlen durch ein ansprechendes Design der Verpackung erhöhen ließen. Von da an druckten Hersteller Abbildungen des Inhalts auf die Verpackung und der Wettbewerb um die Gunst der Käufer begann. [5]

### **Entwicklung der Transportverpackung**

Eine der ersten Arten von Transportverpackungen waren Körbe. Sie wurden ursprünglich ohne maschinelle Hilfe hergestellt. Die Kunst des Korbflechtens wurde vor ca. 6000 Jahren erfunden, zu der Zeit, als die Chaldäer in Babylon gelebt haben. Sie nutzten Gräser, Sträucher und formbare Bestandteile von Bäumen um daraus Körbe herzustellen. Anschließend wurden diese noch mit Erdpech abgedichtet, damit auch Flüssigkeiten transportiert werden konnten. Die Kunst des Korbflechtens hat sich bis heute erhalten, auch wenn sie nur noch vergleichsweise selten zum Einsatz kommt. [2]

Eine zweite sehr frühe Form der Transportverpackung waren Ballen. Beim Ballen wird die Ware in Packleinen und einem Netzwerk aus Stricken festgeschnürt, um so unbeschadet zum Empfänger zu gelangen.

Schon kurz nach Beginn der christlichen Zeitrechnung wurde das Fass als eine weitere Transportmöglichkeit für Waren geschaffen. Beim Fass handelt es sich um ein großes, bauchig geformtes, zylindrisches Gefäß, in welches Substanzen oder Flüssigkeiten zur Aufbewahrung und zum Transport gegeben werden. Erstmals erwähnt wurde es im Jahre 77 n. Chr. vom Römer Plinius, der sich wunderte, dass die Gallier und Illyrier ihren Wein in Holzfässern lagerten, während die Römer und zuvor auch die Griechen den Wein in Amphoren aus Ton aufbewahrten. [2] Mit der Herausbildung neuer und immer weiter reichender Handelsrouten mussten die Waren wesentlich längere Transportwege unbeschadet überstehen. Während des Transportes waren die Waren großen Temperaturschwankungen und Belastungen z.B. durch Regen und Salzwasser ausgesetzt. In dieser Zeit wurden Verbesserungen am Fass als Transportgefäß vorgenommen. So entwickelte man z.B. zwei verschiedene Fasstypen, das ovale und das kreisrunde Fass. Sie wurden noch bis zu Beginn des 19. Jahrhunderts von Fassbindern in der Massenherstellung produziert. [2]

Eine andere Art der Transportverpackung wurde erst Anfang des 20. Jahrhunderts optimiert. Es handelt sich hierbei um den Sack. Schon die Römer, bzw. römischen Kaufleute verkauften ihre Waren in Säcken. In der Herrschaftszeit von Cäsar wurden mithilfe der Säcke hauptsächlich Kolonialwaren, Gewürze und andere exotische Produkte transportiert. Zu dieser Zeit bestanden die Säcke meistens aus Leder und Geflechten, später aus Leinen

und Jute. Erst Anfang des 20. Jahrhunderts wurden Säcke aus Papier hergestellt. Dadurch konnten nun Zement, Mehl und andere Stoffe gelagert und transportiert werden. [2]

Die einfachste und zugleich effizienteste Transportverpackung ist die Kiste. Sie wurde in der Römerzeit erfunden. Im Vergleich zu unseren heutigen Kisten war sie damals aber nicht eckig sondern rund und wurde vorwiegend zur Lagerung von kultischen Inhalten genutzt. [2]

## 2.2. Gesetze und Richtlinien

Das Design einer jeden Verpackung – u.a. ihr Aufbau oder die verwendeten Materialien – unterliegt gewissen gesetzlichen Beschränkungen, insbesondere in Bezug auf die Verwertbarkeit der Verpackung. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Gesetze und Richtlinien definieren den gesetzlichen Rahmen, in dem Verpackungen frei entwickelt werden können.

### **Die EU-Richtlinie 94/62/EG**

Aufgrund der massenhaften Verwendung von Verpackungen in der heutigen Zeit ist es erforderlich, Gesetze und Verordnungen zu erlassen, die die umweltschonende Herstellung, Verwendung und Beseitigung von Verpackungen festlegen. Die Bestimmungen über den Gebrauch von Verpackungen und deren Verwertung werden in der EU-Richtlinie 94/62/EG von 1994, im Kreislaufwirtschaftsgesetz und in der Verpackungsverordnung festgeschrieben. [6] Die wichtigsten Punkte der EU-Richtlinie 94/62/EG sind im Folgenden aufgeführt:

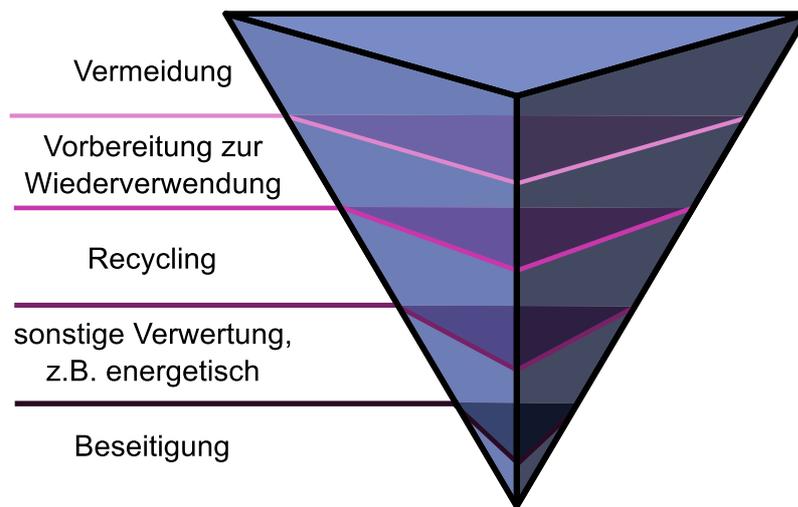
1. Es sollen Systeme zur Wiederverwendung von umweltverträglich recycelbaren Verpackungen von den Mitgliedsstaaten gefördert werden.
2. Es wird festgehalten, dass die energetische Verwertung als eine Methode der Verwertung von Verpackungsabfällen anzusehen ist.
3. Als erstrebenswert wird die Verringerung der Abfallmenge und der Umweltschädlichkeit des Abfalls genannt. Damit ist einerseits die Reduzierung von Materialien und Stoffen in Verpackungen und Verpackungsabfällen gemeint, die negative Auswirkungen auf die Umwelt haben können. Andererseits sollen neue umweltverträgliche Produkte und Technologien entwickelt werden, durch die es möglich ist, Verpackungen und Verpackungsabfälle bei der Herstellung, beim Inverkehrbringen, beim Vertrieb, bei der Verwendung und bei der Beseitigung von Produkten zu vermeiden.

### **Das Kreislaufwirtschaftsgesetz**

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz wurde im Februar 2012 novelliert und trat in dieser Fassung im Juni 2012 in Kraft. Es sollte das deutsche Abfallrecht umfassend modernisieren. [7] [8] Die wichtigsten Eckpunkte sind hier zusammengefasst.

Das erste Gesetz zur Beseitigung von Abfall wurde 1972 aufgrund der unkontrollierten Zunahme an Abfällen erlassen. Es hatte seitens der Bundesregierung das Ziel, dass Abfälle umweltgerecht entsorgt werden. [9] Bei einer späteren Novellierung rückten die Abfallvermeidung und die Abfallverwertung stärker in den Fokus. Mit der Verabschiedung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW-/AbfG) sollten nicht nur die stoffliche und thermische Verwertung gestärkt werden. Auch die Umweltstandards für Beseitigungs- und Verwertungsanlagen sollten erhöht und die Transportwege zu jenen reguliert werden. [9] Im neuen Gesetz wurde auch verstärkt auf die Vermeidung von Abfällen eingegangen, um einem möglichen Entsorgungsnotstand entgegen zu wirken. 1996 wurde dann das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz erlassen, welches im Laufe der Novellierung am 1. September 2012 in Kreislaufwirtschaftsgesetz umbenannt wurde. [9]

Bei einer Novellierung soll hauptsächlich die Bewirtschaftung des Abfalls neu geregelt werden. [8] Dabei gehören zur Abfallbewirtschaftung alle wichtigen Vorgänge im Umgang mit dem Abfall, also u.a. die Sammlung, Verwertung und Beseitigung des Abfalls und die Überwachung dieser Vorgänge. [8] Die letzte Neufassung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes wurde am 1. Juni 2012 mit dem Ziel erlassen, die Umwelt und das Klima besser zu schützen. Das Gesetz regelt außerdem, dass die Ressourcen durch eine verstärkte Abfallvermeidung und besseres Recyceln schonend bzw. effizient und nachhaltig eingesetzt werden sollen. Der Schwerpunkt beim Kreislaufwirtschaftsgesetz liegt auf der neuen Abfallhierarchie, die auf der EU-Richtlinie 2008/98/EG beruht. Die Abfallhierarchie stellt sich wie folgt dar: Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, Verwertung und Beseitigung (siehe Abbildung 2). [8]



**Abbildung 2 Abfallhierarchie in Pyramidendarstellung**

Bereits vor der Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes im Juni 2012 wurde schon einmal eine Abfallhierarchie eingeführt. [10] So wurde im Rahmen des Abfallwirtschaftsprogrammes 1975 die Abfallhierarchie vermeiden-verwerten-beseitigen vorgestellt. Sie blieb zwar eine lange Zeit rechtlich unverbindlich, aber sie sorgte trotzdem dafür, dass in einigen Großstädten Deutschlands Abfallprojekte angeregt und umgesetzt wurden. [10]

Die Abfallerzeuger sind durch Rechtsordnungen dazu verpflichtet, ihren Abfall abfallspezifisch entsorgen und recyceln zu lassen. Das Heizwertkriterium wurde aus den alten Gesetzen übernommen und bei 11.000 kJ/kg belassen. Abfall, der über dieser Heizwertgrenze liegt, darf prinzipiell energetisch verwertet werden. In Fällen, in denen der Abfall zwar die Heizwertkriterien erfüllt, es aber eine umweltverträglichere Recyclingmöglichkeit gibt, darf der Abfall nicht energetisch verwertet werden. [7] [8] Abfall, der unter der Heizwertgrenze liegt, darf in seltenen Fällen auch energetisch verwertet werden, allerdings nur, wenn die Verbrennung die nachweislich beste Verwertungsoption im Hinblick auf den Umweltschutz ist. Die energetische Verwertung darf außerdem nicht die Gesundheit der Menschen beeinträchtigen.

Das Gesetz erwähnt in § 23 die Produktverantwortung. Diese schreibt vor, dass Hersteller ihre Erzeugnisse abfallarm produzieren müssen und diese nach dem Gebrauch sicherstellen und ordnungsgemäß entsorgen bzw. verwerten müssen. [7] [8] Das Kreislaufwirtschaftsgesetz schreibt weiterhin vor, dass der Bund zusammen mit den Ländern ein Abfallvermeidungsprogramm entwickeln muss.

### **Die Verpackungsverordnung**

Anfang der 1990er Jahre geriet die Verwertungsquote von Verpackungen unter 50 %. Da Verpackungen einen erheblichen Anteil an den Abfallquantitäten besaßen und fehlende Deponiekapazitäten prognostiziert wurden, rechnete man mit Entsorgungsengpässen in den Folgejahren. [11]

Am 8. Mai 1990 wurde in Deutschland die Verpackungsverordnung erlassen. [12] Sie war die vierte nach § 14 AbfG erlassene Verordnung zur Abfallvermeidung. [13] In der Verordnung wurden die drei höchsten Prioritäten in Bezug auf die Herstellung, Verwendung und Verwertung von Verpackungen festgelegt: In absteigender Reihenfolge sollen Verpackungen vermieden, wiederverwendet und stofflich verwertet werden. [6] Das bedeutet konkret, dass Verpackungen auf ein vernünftiges Maß an Gewicht und Volumen reduziert werden sollen, um das Verpackungsmaterialaufkommen zu vermindern. [12] Außerdem sollen Verpackungen mit einer besseren Wiederbefüllbarkeit entwickelt werden. [12] Bei der Herstellung der Verpackungen sollen umweltfreundlichen Materialien eingesetzt werden, die zudem unproblematisch für die stoffliche Verwertung sind. [12]

Die Verpackungsverordnung definiert drei Verpackungsklassen: die Transportverpackung, die Umverpackung und die Verkaufsverpackung. Die Verordnung trifft zudem Aussagen über die Pflichten von Herstellern dieser Verpackungen (Rücknahmepflichten). [6] Die Hersteller und Vertreiber müssen Verpackungen, die sie selbst in Umlauf gebracht haben, wieder zurücknehmen und verwerten. [6] Dieses Prinzip wird auch als Verursacherprinzip bezeichnet. Für die Rücknahme gebrauchter Verpackungen sollen nach § 5 der Verpackungsverordnung Sammelbehälter aufgestellt werden. [14] Es ist den Verursachern nach § 11 erlaubt, die Hilfe Dritter in Anspruch zu nehmen, um ihrer Pflicht nachzukommen. [14] Für Einzelhändler, die nicht die finanziellen Möglichkeiten großer Betriebe haben, kann die Rücknahmepflicht eine große Belastung darstellen. Sie können aber nach § 6 Abs. 3 von dieser Pflicht befreit werden, indem sie sich an einem dualen Entsorgungssystem beteiligen. [6] [14] Die Bezeichnung „dual“ steht hierbei für die Koexistenz eines öffentlich-rechtlichen und eines privatwirtschaftlichen Abfallentsorgungssystems. [14]

Die Aufgaben des dualen Systems sind gebrauchte Packmittel zu sammeln, zu sortieren, aufzubereiten und wieder verwenden oder verwerten zu lassen. [15] So ist der vom Gesetz geforderte Stoffkreislauf gewährleistet. Die Entsorgung unterteilt sich dabei in vier Teilprozesse: Sammlung, Sortierung, Aufbereitung und Verwertung. Das duale System ist hierbei nicht für alle Prozesse verantwortlich. [15] Der Sammlungsprozess beinhaltet das Einsammeln der Verpackungsabfälle beim Endverbraucher (Holsystem) oder an zentralen Sammelstellen (Bringsystem). Im Prozess der Sortierung werden dann die größten Fremdstoffe aussortiert und der Abfall in Fraktionen aufgeteilt. [15] [16] Hier enden die Pflichten des dualen Systems und die Verwertung wird von der Industrie übernommen. [16] Eine Unternehmensgruppe, die sich primär um die Verwertung von Abfällen und die Vermarktung problematischer Sekundärrohstoffe kümmert, ist beispielsweise die Interseroh AG. Sie setzt sich zudem für neue Aufbereitungsverfahren zur Steigerung der Qualität der Sekundärrohstoffe ein. [16] Es sollen außerdem alternative Produktionsverfahren etabliert werden, damit die Sekundärrohstoffe einer alternativen Verwendung zugeführt werden können. [16]

Ein duales System muss eine regelmäßige Abholung garantieren und bestimmte Anforderungen erfüllen. [14] Verstößt es nach § 6 Abs. 4 gegen diese Vorschriften, ist es nicht mehr zulässig. Das System muss i) flächendeckend und in Verbrauchernähe operieren, ii) die gesetzlich vorgeschriebenen Erfassungs- und Sortierquoten erfüllen, iii) bestehende Systeme der kommunalen Gebietskörperschaften einbeziehen und iv) die Abfälle stofflich verwerten und nicht verbrennen. [15]

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die „regulierte Selbstregulierung der dualen Systeme“. [17] Durch die Möglichkeit der Pflichtbefreiung durch die Teilnahme an einem dualen System ist eine indirekte Steuerung des dualen Systems möglich. In der konventionellen Abfallwirtschaft kommt der Endverbraucher für die Kosten auf, die während der Verwertung von Verpackungsabfällen entstehen. Im Gegensatz dazu regulieren sich die anfallenden Kosten im dualen System selbst, weil das duale System selbst dafür zahlen muss. [17] So soll die Entscheidung, wie und ob eine Verpackung vermieden bzw. reduziert wird, anhand ökonomischer und ökologischer Aspekte getroffen werden. Ist eine Verpackung so gestaltet, dass sie während der Verwertung unnötige Kosten

verursacht, können diese nicht auf die Endverbraucher umgelegt werden, sondern werden den Herstellern und Vertreibern auferlegt. [17] Diese Kosten werden wiederum auf den Produktpreis aufgeschlagen, was die Kaufentscheidung der Verbraucher negativ beeinflussen kann. Die Hersteller werden so zum Umdenken in Richtung wiederverwertungsfreundlicher Verpackungsmaterialien und Formate gebracht. [17]

Duale Systeme können auch nach § 6 Abs. 4 aberkannt werden, wenn sie die von der Verpackungsordnung genannten Anforderungen nicht erfüllen. [17] Die Eigenpflichten würden dann wieder für Hersteller und Vertreter von Verkaufsverpackungen gelten, die sich zuvor an diesem dualen System beteiligt haben. [17] Paragraph 6 Abs. 4 stellt somit ein Auffangnetz dar, das aktiv wird, sobald ein duales System versagt. Gleichzeitig werden die überaus belastenden primären Rücknahme- und Verwertungspflichten als Druckmittel genutzt, um die Wirtschaft anzuhalten, ein duales System zu errichten und zu erhalten. [17] Die Hauptfunktion der Eigenpflichten nach § 6 Abs. 3 ist somit die Schaffung von Anreizen zur Bildung eines dualen Systems und dessen Aufrechterhaltung. [17]

Schon in den ersten Jahren nach Erlass der Verpackungsordnung wurden gravierende Mängel am Verpackungsgesetz festgestellt. [18] Daher musste das Gesetz novelliert werden. Gründe für die erste Novellierung waren Verwertungsverfahren für Kunststoffe, die nicht den Kriterien des früheren Abfallgesetzes entsprachen. [18] Außerdem wurden viele Produkte, die nicht zu den Verpackungen zählen, mit dem „Grünen Punkt“, dem Lizenzzeichen des Dualen Systems Deutschland (DSD), versehen. Ein weiterer Kritikpunkt war die starke Zunahme an Entsorgungsunternehmen, die im DSD zusammenarbeiteten, sodass mit der Ausbreitung einer Monopolstellung gerechnet wurde. [18] Ferner wuchsen die Kosten für Erfassung, Sortierung und Verwertung so schnell an, dass schon bald Entsorgungsgebühren erhöht werden mussten. Problematisch war auch der immer größer werdende Anteil an Dosen im Handel, obwohl in der Verpackungsverordnung genau dies verhindert werden sollte (Schutz der Mehrwegquote). [18] Ein grundlegendes Problem stellte die Einmischung vieler verschiedener Interessensparteien bei der Erstellung der Verordnung dar. [18] Nach dem damaligen Stand der Dinge war sie deswegen aus juristischer Sicht problematisch. Außerdem fehlten klare und eindeutige Aussagen zur

Verwertung, wodurch die praktische Ausübung der Verordnung entkräftet wurde. [18] Als besonders problematisch wurden die nach § 6 Abs. 3 zulässigen dualen Systeme angesehen. [13] Sie suggerieren den Herstellern und Vertreibern, dass sie im Austausch für eine finanzielle Gegenleistung von der Verantwortung des Verpackungsabfalls befreit sind, was aber nicht den Tatsachen entspricht. [13] Aus diesen Gründen wurde die Verpackungsordnung am 28. August 1998 novelliert. [6] Es sollte aber nicht nur bei einer Novellierung bleiben. So wurde die Verpackungsverordnung 2012 zum letzten Mal novelliert.

In Folge der Novellierung am 1. Januar 2009 wurden einige Veränderungen am Gesetz vorgenommen. Mit der Novellierung des Gesetzestextes wurden die Mindestverwertungsquoten weitergeführt. Sie wurden mit der ersten erlassenen Verpackungsverordnung von 1990 eingeführt und bei jeder Novellierung der Verpackungsverordnung angepasst. Glas soll zu 75 % verwertet werden, Metall zu 50%, Kunststoff zu 22,5 % und Holz zu 15 %. Für Verkaufsverpackungen, die beim privaten Endverbraucher anfallen, gelten besondere Anforderungen. So müssen z.B. Glas zu 75 % und Kunststoffe und Verbunde zu 60 % stofflich verwertet werden. Durch die Mindestzielquoten für die Verwertung sollen vor allem die Einwegverpackungen stetig gesenkt werden. So wurde bereits 2003 der Einwegpfand auf Bier bzw. Biermischgetränke, auf Mineralwasser sowohl mit als auch ohne Kohlensäure und auf Erfrischungsgetränke mit Kohlensäure eingeführt, weil die Mehrwegquote in den letzten Jahren immer weiter zurückgegangen war. [19]

Ferner sind im Zuge der Novellierung vom 1. Januar 2009 auch erstmals Pflichten für Onlinehändler hinzugekommen. Für Onlinehändler, die ihre Ware an gewerbliche Kunden verkaufen, führte die Novellierung zu keiner Änderung. Sie können weiter wie bisher ihre Transportverpackungen über ein duales System verwerten lassen. Für Händler, die an Privatkunden verkaufen, ergaben sich jedoch einige Veränderungen. So hat der Versandhändler nun zwei Möglichkeiten, seine Verpackung ordnungsgemäß entsorgen zu lassen. Der Händler kann die Verpackungen zurücknehmen und sie, unter Berücksichtigung der gesetzlichen Verwertungsquote, selber verwerten. Alternativ kann der Händler seine Verpackungen bei einem dualen System lizensieren und sich so an diesem beteiligen. In Deutschland ist das z.B. beim Dualen System

Deutschland (DSD, siehe unten) möglich, dessen Lizenzzeichen der „Grüne Punkt“ ist. Das kann im Vergleich zur Rücknahme kostengünstiger sein, dafür muss der Händler aber auch nachweisen, dass er ausschließlich lizenzierte Verpackungen benutzt. Die Onlinehändler mussten außerdem bis zum 1. Mai 2009 eine „Vollständigkeitserklärung“ abgeben. [19] In dieser müssen alle Verkaufsverpackungen nach Materialart und -masse verzeichnet werden, die der Endverbraucher entsorgt hat. Des Weiteren müssen alle Verkaufsverpackungen nach Materialart und -masse gelistet werden, die bei einem Entsorger verwertet wurden. Dazu muss der Name des Entsorgers genannt und der Mengestromnachweis vorgebracht werden. Zuletzt muss noch festgestellt werden, dass auch die Verwertungsanforderungen an gewerbliche Verkaufsverpackungen eingehalten wurden. [20]

### **Das Duale System Deutschland (DSD)**

Zu der Zeit, in der die vierten Verordnung zur Abfallvermeidung nach § 14 AbfG erlassen wurde, stand die Wirtschaft wegen ihres Umgangs mit Konsumgüterabfällen stark in der Kritik. [15] So schlug das Umweltministerium vor, ein von der Wirtschaft getragenes Entsorgungssystem unter staatlicher Aufsicht aufzubauen. Der Abfall sollte privatwirtschaftlich entsorgt werden und gleichzeitig sollten Wertstoffe zurück in den Wirtschaftskreislauf geführt werden. Ein solches System wurde duales System genannt, wobei die Bezeichnung „dual“ für die Koexistenz eines öffentlich-rechtlichen und eines privatwirtschaftlichen Abfallentsorgungssystems steht. [14] Durch diese Koexistenz soll einerseits die Innovationskraft der Wirtschaft genutzt werden, um Fortschritte in der Abfallwirtschaft zu erreichen. Andererseits stellt die öffentlich-rechtliche Hand die Grundversorgung der Bürger sichern. [14]

Den Aufbau eines solchen dualen Systems übernahm zu einem großen Anteil der Bundesverband der deutschen Industrien (BDI). [15] So wurde im August 1990 die „Konzeption zum Aufbau des dualen Entsorgungssystems zur Vermeidung und Verminderung von Verpackungsabfall“ vorgelegt. [15] Inhalt dieser Konzeption war der Aufbau, die Organisation und die Finanzierung des dualen Systems. Am 28. September wurde dann schließlich das erste duale System unter dem vollen Namen „Duales System Deutschland Gesellschaft zur

Abfallvermeidung und Sekundärrohstoffgewinnung mbH“ (kurz DSD) gegründet. [15] [21] Dazu haben sich 95 Unternehmen aus verschiedenen Branchen, wie Handel, Konsumgüter- und Verpackungsindustrie, zusammengetan und ein flächendeckendes Entsorgungssystem aufgebaut. [15] Schon drei Jahre später wuchs die Zahl der Gesellschafter von 95 auf über 400 an. [21] Der Öffentlichkeit wurde das DSD am 14. Dezember 1990 in Bonn vorgestellt. [22] Bereits drei Jahre danach stand das DSD finanziell kurz vor seinem Ende. Durch die Beteiligung kapitalkräftiger Entsorgungsunternehmen und die finanzielle Entlastung durch Entsorger, Industrie, Handel und Kommunen konnte die Situation jedoch entschärft werden. [17] [21] Danach stand das DSD hauptsächlich unter dem Einfluss der Entsorgungswirtschaft. [21]

Neben der Einhaltung der in Anhang I der Verpackungsverordnung festgelegten Anforderungen ist das wichtigste Ziel des DSD die Organisation der Erfassungs- und Sortiersysteme für die Verpackungsabfälle. [21] Das DSD soll außerdem den Handel von den direkten Rücknahmepflichten und Pfandpflichten für Getränkeverpackungen befreien. [21] Die Erfassung der Verpackungsabfälle wird durch eine haushaltsnahe Sammlung gewährleistet. Außerdem wird der Verpackungsabfall unabhängig von der öffentlichen Entsorgung verwertet. [13] [21] Das DSD setzt zudem Anreize damit der Markt ökologisch optimierte Verpackungen produziert. Es sollen dennoch so viele Verpackungsoptionen wie möglich offen gehalten werden. Außerdem sollen Verbraucher über die Vermeidung von Abfällen aufgeklärt werden. [13] [21]

Die Finanzierung des DSD erfolgt über die Vergabe von Zeichennutzungsrechten am „Grünen Punkt“, den Lizenznehmer auf ihre Verpackungen drucken. [21] Das DSD vergibt dabei nur Lizenzen, wenn Verwertungsgarantien für das jeweilige Verpackungsmaterial von einem der Garantiegeber vorhanden sind. [21] Solche Garantiegeber sind z.B. die Deutsche Aluminium Verpackung Recycling GmbH und die GGA Gesellschaft für Glasrecycling und Abfallvermeidung. Die Erfassung und Sortierung wird in der Regel über das Abschließen von Verträgen mit Entsorgungsunternehmen auf Kreisebene geregelt. [21] Die entsorgungspflichtigen Körperschaften müssen außerdem eine Abstimmungserklärung verfassen, in der sie bestimmen, ob der Systembetreiber für die Übernahme oder Mitbenutzung der

Sammlungseinrichtungen zahlen muss. Wertstoffe aus Sortieranlagen müssen zudem bestimmte Spezifikationen erfüllen, da sonst die Annahme in den Verwertungsbetrieben verweigert wird. [21]

Das Ökoinstitut e.V. hat 1994 festgestellt, dass das DSD die von der Verpackungsverordnung vorgeschriebenen Anforderungen einhält. Gleichzeitig hat es aber prinzipiell ein Interesse an einer Steigerung des Aufkommens an Einwegverpackungen und somit an einer Steigerung der Einnahmen durch Lizenzgebühren. [21] Es wurde auch festgestellt, dass das DSD die Verwechslung des „Grünen Punktes“ mit einem Umweltzeichen bereitwillig eingeht oder sogar beabsichtigt. [21] Die Problematik besteht darin, dass keine Aussage über eine tatsächliche Recyclingfähigkeit der einzelnen Verpackungen getroffen wird. Dies ist eine Schwäche des DSD, weil nur pauschale Verwertungsgarantien vergeben werden, anstatt jede Verpackung einzeln zu bewerten. Das Ökoinstitut e.V. wirft in seinem Projekt „Jenseits vom Grünen Punkt“ dem DSD somit eine Desinformation und Täuschung der Verbraucher vor. [21] Würden die Hersteller von Verpackungen einer gesetzlichen Verwertungsvorgabe unterliegen, würden sie die Verpackungen recyclingfreundlicher gestalten. Viele mit dem „Grünen Punkt“ gekennzeichnete Verpackungen, z.B. kleine Verbund- und Kunststoffverpackungen, werden aber in Sortieranlagen als Sortierrest abgeschieden und somit nicht verwertet. [21]

Neben dem DSD gibt es inzwischen noch einige weitere duale Systeme (insgesamt elf). [23] Eines davon ist die Landbell AG. Sie wurde im Jahr 1995 gegründet. [23] Die Landbell AG entwickelte ein duales Entsorgungssystem nach § 6 Abs. 3 der Verpackungsverordnung und beantragte eine Zulassung in Hessen und in Rheinland-Pfalz. [23] Im Unterschied zum DSD erfolgt die Aufspaltung der Abfallströme eher entsprechend der technisch möglichen Verwertungsverfahren. Somit sollen unnötige Kosten vermieden werden. [23] Die Sammlung der verschiedenen Abfallströme wird folgendermaßen organisiert: „Mono-Sack“ für große Kunststoffverpackungen, „blauer Landbell-Sack“ für Pappe und Kartonagen und Bündelsammlung für hochwertige graphische Papiere (Zeitschriften etc.). Die Sammlung von Glas und Bioabfall bleibt unverändert. [23] In der Restmülltonne können in diesem dualen System auch Dosenmetalle und kleine Kunststoffverpackungen entsorgt werden. [23] Das Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung und der

Sachverständigenrat für Umweltfragen haben herausgefunden, dass durch die Sammlung von Kunststoffkleinverpackungen im Restabfall Kosten eingespart werden können. Der ökologische Nachteil ist dabei eher gering. [23] Die Kosten, die sonst bei der Sortierung von Kunststoffverpackungen im DSD anfallen, entfallen weitgehend, weil die großen Kunststoffverpackungen aus dem Mono-Sack direkt stofflich verwertet werden. Im Vergleich zur manuellen Sortierung der gemischten PPK-Fraktion des DSD führt das getrennte Sammeln der graphischen Papiere im Durchschnitt zu einer höheren Qualität der Papierfasern. [23] Außerdem entfallen die Kosten für eine manuelle Sortierung. Die Metallfraktion kann mittels des Trockenstabilatverfahrens im Restabfallstrom abgespalten werden. Das heizwertreiche Trockenstabilat wird verkauft und einer energetisch Nutzung zugeführt. [23]

## 2.3. Allgemeine Verpackungsarten

Das Design einer Verpackung muss an ihren Verwendungszweck angepasst sein. Es gibt viele unterschiedliche Arten der Verpackung. Die drei wichtigsten sind die Um-, die Transport- und die Verkaufsverpackung. Die Umverpackung umschließt die Verkaufsverpackung, wodurch die Ware beim Transport besser geschützt und vor Diebstahl sicher ist. Sie kann zusätzlich auch als Träger von Werbung dienen. Die Transportverpackung erleichtert den Transport, beschützt die Ware auf dem Transportweg vor Schäden und sichert den Transport ab. Die Verkaufsverpackung soll das Produkt bewerben und den Käufer dazu animieren, es zu kaufen. Sie schützt die Ware vor direktem Zugriff und dient dem Marketing als Werbeoberfläche. [24]

Eine besondere Form der Verkaufsverpackung sind Verpackungen mit einem Zusatznutzen. Dazu zählen all jene, die nach dem Verbrauch des Produktes weiter verwendet werden können. So lassen sich z.B. Senfgläser nach der Leerung als Trinkgläser verwenden oder Marmeladengläser für die selbstgemachte Konfitüre.

Eine weitere Art der Verpackung ist die Werbeverpackung, die das Produkt aufwerten soll. Werbeverpackungen umfassen den größten Teil aller Verkaufsverpackungen. Das Design der Werbeverpackung erhöht z.B. den Wiedererkennungswert des Produkts, sodass der Kunde trotz großer Auswahl mit größerer Wahrscheinlichkeit das altbekannte Produkt wählt. Durch Werbeverpackungen soll primär der Absatz gesteigert werden.

Eine weitere Art von Verpackungen stellen die Retailverpackungen dar. Sie sind Hybriden aus Um- und Verkaufsverpackungen. Einerseits sollen sie ebenso wie Umverpackungen die Ware beim Transport schützen. Andererseits müssen Retailverpackungen im Laden nicht ausgepackt werden, sondern können direkt ins Regal gestellt werden. Die Retailverpackung erfüllt somit die Funktionen einer Verkaufsverpackung. Daher sind auch hier Logo und Markennamen auf der Verpackung vorhanden. [25]

Zusätzlich unterscheidet man Ein- und Mehrwegverpackungen. Die meisten Verpackungen sind Einwegverpackungen. Sie werden beispielsweise in großen Mengen für die Getränkeindustrie hergestellt. Dazu zählen z.B. Verpackungen

für unterschiedlichste Säfte oder natürliches Mineralwasser. Zur Herstellung von Einwegverpackungen werden verschiedenste Materialien benutzt. Alle Einwegverpackungen haben jedoch dieselbe definierende Eigenschaft, dass sie nach dem Benutzen sofort entsorgt werden. Mehrwegverpackungen werden dagegen wiederholt eingesetzt. Sie wurden Anfang der 1990er häufig verwendet, sind aber mit der Zeit immer weiter zurückgedrängt worden. [11] Mehrwegverpackungen werden heutzutage größtenteils nur noch in Form von Glas- und PET-Flaschen für Bier und Mineralwasser eingesetzt.

## 2.4. Aufgaben der Verpackung

Die Funktionen und Aufgaben von Verpackungen sind vielfältig. Ein Käufer nimmt in der Regel ein Produkt nicht als solches wahr, sondern zuerst dessen Verpackung. Eine Verpackung muss daher zweckmäßig, aber auch ansprechend gestaltet sein. Außerdem muss sie den Besonderheiten des Verpackungsgutes angepasst sein: Bei Lebensmitteln muss z.B. darauf geachtet werden, dass die Verpackung hierfür auch geeignet ist.

Zweckmäßigkeit der Verpackung bedeutet, dass die Verpackung folgende wichtige Hauptfunktionen in sich vereinen sollte, die alle auch von großer wirtschaftlicher Bedeutung sein können:

1. **Produktionsfunktion:** Unter der Produktionsfunktion ist die Wahl einer geeigneten Verpackung zu verstehen, bei der das Produkt direkt in diese Verpackung ohne Zwischenschaltung von Umschlagvorgängen verpackt werden kann. [5]
2. **Marketingfunktion:** Die Verpackung dient gleichzeitig der Produktwerbung. [5]
3. **Wiederverwendungsfunktion:** Die Verpackung soll für eine mehrmalige Wiederverwendung für das gleiche Produkt geeignet sein. Dafür muss ein Rückführungssystem für Mehrwegverpackungen in Zusammenarbeit mit den Lieferanten oder Kunden aufgebaut werden. [5]
4. **Logistikfunktion:** Von der Verpackung wird verlangt, dass sie die Lagerung eines Gutes erleichtert. Die Verpackung sollte möglichst stapelbar sein und den Ansprüchen in den Lagereinrichtungen entsprechen. Darüber hinaus sollte sie das Packmittel effizient lagern können. [26]

Die zuletzt ausgeführte Logistikfunktion unterteilt sich in fünf weitere Teilfunktionen:

- Schutzfunktion,
- Lagerfunktion,
- Transportfunktion,
- Manipulationsfunktion und
- Informationsfunktion. [26]

Im Folgenden wird auf diese fünf Unterfunktionen detaillierter eingegangen.

### **Schutzfunktion**

Die Verpackung soll das Gut bei der Auslieferung gegen mechanische und klimatische Belastungen schützen. Zusätzlich sollen Verpackungen Verlust und Diebstahl von Packgütern minimieren. [26] So sind z.B. Torten in Styroporverpackungen gut gegen mechanische und klimatische Belastungen geschützt.

### **Lagerfunktion**

Güter werden verpackt, damit sie bei der Lagerung weniger Raum beanspruchen und die vorhandene Lagerfläche effektiv ausgenutzt werden kann. So sollte sich die Verpackung z.B. möglichst stapeln lassen. Wenn die Verpackung nicht mehr gebraucht wird, sollte es möglich sein, sie platzsparend zu lagern. Das kann z.B. mit zusammenfaltbaren Verpackungen erreicht werden. [26]

### **Transportfunktion**

Die Verpackung hat die Aufgabe, den Transport des Gutes zu erleichtern. Ebenso sollte die Form und die Abmessung der Verpackung optimal für den Transportraum bemessen sein, wie z.B. bei quaderförmigen Kartons. [26]

### **Manipulationsfunktion**

Durch einzelne Verpackungen können Güter zu Einheiten zusammengefasst werden, wodurch sie beim Umschlag und der Auslieferung besser zu handhaben sind. Form und Abmessungen der Verpackungseinheiten müssen so gestaltet sein, dass Gabelstapler oder Regalbedienungsgeräte diese transportieren können. Ist ein manueller Umschlag erforderlich, sind z.B. Grifflöcher in der Verpackung hilfreich. [26]

### Informationsfunktion

Die Kennzeichnungen auf der Verpackung dienen der leichteren Identifizierung des Produkts, z.B. durch seine Farbe, durch Bilder oder typische Aufschriften. Zudem sind bei Verpackungen für zerbrechliche, verderbliche oder ähnliche Produkte, die bei der Auslieferung besonders sorgfältig zu behandeln sind, Bilder, Zeichen oder Erläuterungen erforderlich. Abbildung 3 zeigt einen kleinen Auszug der dabei benutzten Symbole.

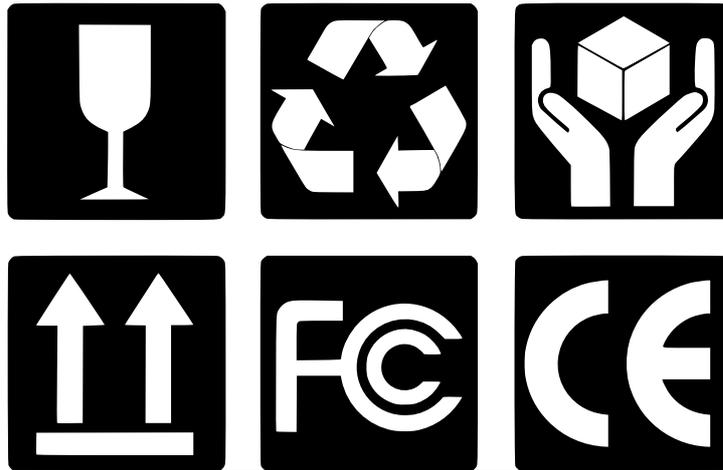


Abbildung 3 Verpackungssymbole [27]

Wenn der Transport- und Umschlagprozess automatisch erfolgt, ermöglicht eine geeignete, an der Verpackung angebrachte Information das automatische Erkennen eines Produktes, z.B. durch Barcodes oder „radio-frequency identification (RFID)“-Tags, siehe Abbildung 4. [26]

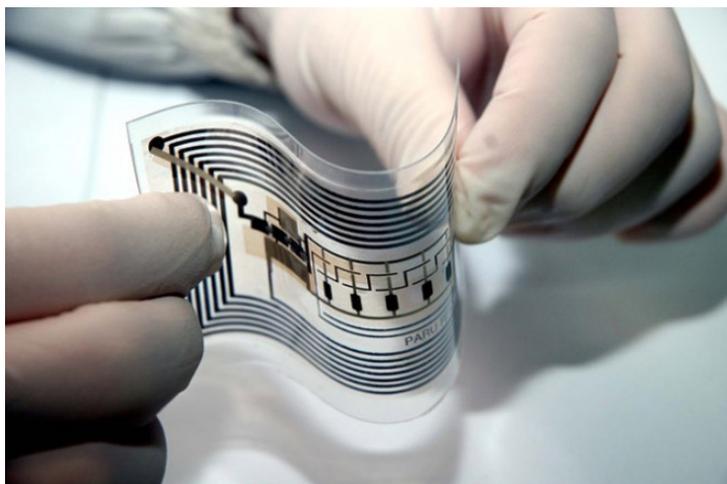


Abbildung 4 RFID-Tag [28]

Das folgende Beispiel veranschaulicht die fünf verschiedenen Logistikfunktionen: Mineralwasserflaschen aus Glas können schlecht einzeln

transportiert und gelagert werden. So werden mehrere Flaschen in einem Kasten zusammengefasst, um diese besser transportieren zu können. Der Kasten ist somit eine optimale Schutz-, Lager- und Transportverpackung für Flaschen. Außerdem besitzen Getränkekästen Grifflöcher für den manuellen Umschlag und sie sind oftmals mit Informationen bezüglich des Flascheninhalts bedruckt. Der Getränkekasten hat somit auch eine Manipulations- und eine Informationsfunktion.

## 2.5. Sammlung, Sortierung und Verwertung

In Deutschland hat das Recycling gebrauchter Verpackungen oberste Priorität. Für Betriebe ist der Einkauf von Sekundärrohstoffen im Vergleich zum Primärrohstoff um einiges billiger. Der Einsatz von Sekundärrohstoffen schont überdies die Umwelt, weil keine natürlichen Rohstoffe abgebaut werden müssen. So können die endlichen Primärrohstoffe geschont werden. Der wichtigste Grund des Recyclens ist aber die Verringerung der Abfallproblematik.

In diesem Kapitel werden die Sammlung, Sortierung und Verwertung von Abfällen überblicksweise beschrieben. Dabei wird der Zusammenhang zwischen Design und Verwertbarkeit von Verpackungen aufgezeigt, der sich aufgrund von Limitierungen der eingesetzten Sortiertechnologie ergibt.

### **Sammlung**

Es gibt in Deutschland verschiedene Systeme zur Sammlung von Verpackungsabfällen. Prinzipiell unterscheidet man das Bring- und das Holsystem. Beim in Deutschland weniger verbreiteten Bringsystem werden die Verpackungen zu zentralen Sammelstellen (Recyclinghöfe) gebracht. Beim Holsystem wird der Abfall indes vom Verbraucher in Abfallsäcke oder Abfallcontainer entsorgt und anschließend von einer Entsorgungsfirma mit Abfallsammelfahrzeugen abgeholt.

Neben den gerade genannten Systemen gibt es noch andere Möglichkeiten, die entstandenen Verpackungsabfälle zu entsorgen. Dazu zählen die Mehrweg- und Einwegsysteme mit Pfanderhebung. Bei diesen Systemen bringt der Verbraucher die benutzten Verpackungen zurück zum Händler. Der Verbraucher erhält dafür ein Pfandgeld zurück, das er beim Kauf des Produkts entrichtet hatte. Der Unterschied zwischen den Ein- und Mehrwegsystemen mit Pfanderhebung ist folgender: Die Mehrwegverpackungen werden mehrmals eingesetzt bevor sie verwertet werden, während die Einwegverpackungen bereits nach einmaliger Benutzung verwertet werden. Die vom Händler gesammelten Mehrwegverpackungen werden vom Hersteller oder

Fachgroßhändler abgeholt und zur Wiederverwendung aufbereitet. Die Einwegverpackungen werden von einem Verwertungsunternehmen abgeholt.

### **Sortierung**

Nachdem der Verpackungsabfall abgeholt wurde, wird er sortiert. Für die Kunststoffsortierung wird sehr oft die Nahinfrarot-Technologie (NIR) eingesetzt. [29] Der Wellenlängenbereich des Nahinfrarotlichts schließt sich an den des sichtbaren roten Lichts an. Konkret zählt zum nahen Infrarotbereich Licht mit einer Wellenlänge von 700 nm bis 2500 nm. [30] Das physikalische Grundprinzip, das bei der NIR-Technologie angewendet wird, ist die materialspezifische Wechselwirkung von Objekten und deren Oberflächen mit einfallendem Licht. Denn wenn ein Körper mit Licht bestrahlt wird, wird ein Teil der Strahlung absorbiert, während die übrige Strahlung reflektiert bzw. transmittiert wird. [29] Die Moleküle des bestrahlten Körpers wandeln das absorbierte infrarote Licht in Schwingungsenergie um. [29] Der Grad der Absorption bei einer bestimmten Wellenlänge hängt hierbei von der molekularen Struktur des bestrahlten Materials ab. Dadurch ist eine Identifikation der unterschiedlichen Kunststoffe möglich, weil jeder sein spezifisches Transmissions- bzw. Absorptions- und Reflektionsspektrum hat. [29]

Der NIR-Scanner bestrahlt die zu untersuchende Kunststoffprobe mit Nahinfrarotlicht. [29] Die Strahlung, die reflektiert wird, kann analysiert werden. Dazu wird das vom Kunststoff reflektierte Licht durch einen akusto-optischen Filter geleitet. [29] Abhängig von der Schallfrequenz des Filters können bestimmte Wellenlängen des einfallenden Strahls gebeugt werden. Der nun monochromatische Strahl wird so auf einen Photodetektor gelenkt, der die Intensität misst. [29] Die Aufzeichnung der Spektren über den gesamten Nahinfrarot-Wellenlängenbereich erfolgt durch die Manipulation der Schallfrequenz des akusto-optischen Filters mittels eines VCO (Voltage Controlled Oscillator). Der Photodetektor gibt die wellenlängenspezifischen Intensitätsmesswerte an eine Auswertungseinheit weiter. [29] Die Identifikation des gescannten Materials erfolgt schließlich durch den Vergleich des gemessenen Spektrums mit Referenzspektren. [29] Erst dann kann die Trennung der Kunststoffe mittels elektrischer Schleusen, Klappen oder Pressluftstöße

erfolgen. [30] Daher ist eine Erkennung und somit Trennung der Kunststoffe nur dann möglich, wenn ein ausreichendes „Learning Set“ aus Spektren bekannter Proben der Datenbank des NIR-Scanners hinzugefügt wurde. [29]

Durch die große Anzahl an Intensitätswerten beansprucht die Auswertung der Spektren viel Rechenkapazität. Als eine Möglichkeit zur Lösung dieses Problems bilden einige Softwarepakete aus den Kalibrationsspektren eine Zusammenstellung der bedeutendsten Faktoren. [29] So lässt sich eine maximale Aufnahmegeschwindigkeit im Millisekundenbereich (unter 0,4 ms für eine Identifikation) erreichen. [29]

Neben einer schnellen Aufnahmemöglichkeit besitzt die NIR-Technologie noch weitere Vorteile: Sie kann Kunststoffe unabhängig von der Oberflächenstruktur und dem Grad der Feuchtigkeit erkennen. [29] Außerdem stellen die meisten Farben für die NIR-Einheit kein Problem dar. [31] Sie ist zudem in der Lage, Additive (wie z.B. Flammschutzmittel) zu erkennen.

Das NIR-Verfahren weist aber auch einige Nachteile auf. [29] So lässt sich der zugrunde liegende physikalische Effekt bei Kunststoffproben mit einem starken Absorptionsvermögen nicht ausnutzen. Das reflektierte Licht hat bei solchen Kunststoffen nur eine geringe Intensität, wodurch keine Identifizierung möglich ist. [29] Dieser Nachteil kann teilweise durch Mehrfachmessungen kompensiert werden. Kunststoffe, die nicht oder nur schwer erkannt werden, zeichnen sich meist durch eine starke Verschmutzung oder durch das Ankleben von Papierresten an der Oberfläche aus. [29] Außerdem werden schwarze oder dunkelgraue Kunststoffe kaum erkannt, da sie das Licht der NIR-Quelle fast vollständig absorbieren und kaum Licht reflektieren, welches vom Photodetektor registriert werden könnte. [29]

Die NIR-Technologie wird auch bei der Sortierung von Papierverpackungen und dem übrigen Altpapier verwendet. Im Folgenden wird als Beispiel die Sortierung in der Anlage Berlin-Mahlsdorf der ALBA AG beschrieben. [32] Das Altpapier wird hier in drei Fraktionen aufgetrennt: bedrucktes Papier, Pappen und Kartonagen, sowie Mischpapier mit verschiedenen Papp- und Papierqualitäten. Die Trennung erfolgt in vier Schritten. Zuerst gelangt das Altpapier auf ein Scheibensieb, wo eine Separierung nach großen und kleinen Bestandteilen erfolgt. Im Ballistikseparator werden die beiden Stoffströme

weiter vereinzelt und größere Pappen und Mischpapiere aussortiert. Im vorletzten Schritt wird der übrige Pappanteil von einem „Paperspike“, welcher sich über dem Förderband befindet, aussortiert. Jetzt sind fast alle Pappen, Kartonagen und nicht de-inkbare Papiere dem Stoffstrom entzogen. Beim vierten Schritt kommt die NIR-Technologie zum Einsatz. Die NIR-Einheit erkennt die übrigen nicht de-inkbare Papiere und bläst sie in einen separaten Schacht. Am Ende der automatisierten Sortierung erfolgt noch eine visuelle Sortierung. Die einzelnen Fraktionen werden anschließend zu Ballen gepresst und an die entsprechenden Verwertungsanlagen weiter geschickt. [32]

### **Verwertung**

Am Ende des Sortiervorgangs liegen folgende Materialanteile der Leichtverpackungsfraction (LVP) sortiert vor: Weißblech, Aluminium, Styropor, Getränkekartons, Kunststoffhohlkörper (Kunststoffflaschen), Kunststofffolien, sowie Verbundstoffe und gemischte Kunststoffe. Die sortierten Verpackungen werden zu Ballen gepresst und anschließend zu den Verwertern transportiert. [33] Der sortierte Kunststoff wird in Verwertungsanlagen erhitzt und zu Granulat (auch Rezyklat genannt) geformt, das weiter an die Hersteller verkauft wird. [34] Das sortierte Altpapier, genauer das bedruckte Papier, kann z.B. in einem Pulper wieder aufbereitet werden, um später zusammen mit dem Primärrohstoff gemischt zu werden. [35] Wenn es keine adäquaten Verwertungsmöglichkeiten gibt, kann der Verpackungsabfall auch energetisch verwertet werden. Notwendige Bedingung dafür ist, dass der Abfall einen Heizwert von mindestens 11.000 kJ/kg aufweist. Im folgenden Kapitel werden die Verwertungsverfahren der verschiedenen Verpackungssysteme in den entsprechenden Abschnitten detaillierter beschrieben.

### 3. Verpackungsanalyse

In diesem Kapitel werden drei verschiedene Verpackungssysteme analysiert und bezüglich ihrer Verwertbarkeit untersucht. Dabei wird geprüft, welche Verpackungssysteme ein geeigneteres Design in Bezug auf die Verwertung haben. Um ein fundiertes Ergebnis zu erhalten, werden Verpackungssysteme aus verschiedenen Bereichen der Verpackungswirtschaft ausgewählt. Zuerst wird der Getränkekarton untersucht. Es werden ein Getränkekarton ohne und ein Getränkekarton mit Ausguss analysiert. Das Ergebnis dieses Vergleichs zeigt, wie stark sich die zusätzliche Tülle aus PP auf die Verwertung auswirkt. Das zweite untersuchte Verpackungssystem ist der PP-Joghurtbecher. Bei diesem System wird besonders der Einfluss der Papierbanderole auf die Verwertbarkeit untersucht. Insgesamt werden drei verschiedene Becher geprüft, ein bedruckter PP-Becher, ein PP-Joghurtbecher mit einer Papierbanderole und ein Becher aus biologisch abbaubarem Material. Beim dritten Verpackungssystem handelt es sich um die Glas- bzw. PET-Ketschupflasche. Auch hier wird gezeigt, wie die Verwertungsquote durch die Wahl des Materials beeinflusst wird (bei ansonsten sehr ähnlichem Aussehen und Einsatz der Verpackung). Anhand der in diesem Kapitel ermittelten Ergebnisse lassen sich Aussagen über ein im Sinne der Verwertbarkeit gutes Verpackungsdesign treffen.

#### 3.1. Getränkekartonagen

Der Getränkekarton ist ein aufgrund seines häufigen Einsatzes wichtiges Verpackungssystem. Viele Getränke, wie z.B. Milch, Säfte (siehe Abbildung 5), Wein oder Wasser, werden in Kartonagen abgefüllt.



**Abbildung 5 Saft in Tetra Paks mit wiederverschließbaren Öffnungen [36]**

Das besondere Design des aus mehreren Schichten und verschiedenen Materialien aufgebauten Getränkekartons stellt bestimmte Anforderungen an die Verwertung bzw. das Recycling. Um zu analysieren, wie sich der komplexe Aufbau der Getränkekartonage auf ihre Verwertbarkeit auswirkt, wird in diesem Kapitel ihre Verwertungsquote berechnet. Dabei wird auch der Einfluss einer zusätzlichen Ausgusstülle untersucht. Zuvor werden die Entstehungsgeschichte dieses Verpackungssystems, die das Design bestimmenden Verwendungsarten und die sich daraus ergebenden Materialien und Herstellungsverfahren beschrieben.

### **Die Entstehungsgeschichte der Getränkekartonage**

Die Idee, Getränke in Tetraeder-förmige Kartonverpackung abzufüllen, wurde bereits 1915 von John van Wormer in den USA patentiert. Es war bereits 1930 möglich, Milch in Getränkekartons abzufüllen. Parallel dazu patentierte Günter Meyer-Jagenberg 1930 seine Perga-Packung als „wasserdichtes Papiergefäß mit Faltverschluss und Vorrichtung zu seiner Herstellung“. [37]

Die erste erfolgreiche Marke für Getränkekartons war Tetra Pak. Sie wurde 1943 entwickelt. Der Chemiker Erik Wallenberg, der Ingenieur Harry Järund und der Verkaufsleiter Erik Torudd arbeiteten gemeinsam für die Firma Åkerlund & Rausing. Dort entwickelten sie eine neue Verpackung für Milch und nannten sie Tetra Pak. Möglich machte diese Entwicklung eine neuartige

Technik zur Beschichtung von Papier mit Kunststoff. 1951 ging aus der Firma Åkerlund & Rausing die Firma Tetra Pak hervor. Gegründet wurde sie von Erik Wallenberg und Ruben Rausing. Ihr Hauptsitz befindet sich in Lund (Schweden). [38]

Nach der Gründung der Firma wurde am 18. Mai 1951 die neue Marke „Tetra Pak“ eingeführt. In den vergangenen über 60 Jahren hat sich Tetra Pak als einer der ersten Hersteller für Getränkeverpackungen zum Marktführer entwickelt und besitzt nun den größten Marktanteil bei den Getränkeverpackungen. [38]

Ursächlich für die Entwicklung der Getränkekartons gerade in Schweden ist die Tatsache, dass die schwedische Bevölkerung vergleichsweise zersiedelt lebt. Durch die geringe Siedlungsdichte ergaben sich weite Transportwege zwischen den Milcherzeugern und den Kunden. Vor der Erfindung des Getränkekartons wurde die Milch in Glasflaschen oder Kannen abgefüllt. Die Flaschen und Kannen mussten nach Gebrauch zum Erzeuger zurücktransportiert werden, wodurch dieser weniger neue Milch ausliefern konnten. Aus diesem Grund suchte man nach einer Möglichkeit, die Verpackung von den Verbrauchern entsorgen zu lassen. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Flaschen und Kannen konnten die leeren Milchverpackungen aus gewachstem Karton einfach in den Heizöfen der Verbraucher verbrannt werden. [39]

Als der Getränkekarton Anfang der 1990er Jahre nach Deutschland gelangte, ergab sich eine neue Entsorgungsproblematik. Eine höhere Siedlungsdichte und Landwirtschaftsbetriebe, die über ganz Deutschland verteilt Milch produzierten, machten sehr weite Transporte unnötig. Außerdem war es den Verbrauchern durch strenge Vorschriften bezüglich der Luftverschmutzung (und die Verbreitung der Zentralheizung) nicht möglich, ihre leeren Verpackungen in privaten Heizöfen zu verbrennen. Stattdessen mussten andere Entsorgungsmöglichkeiten geschaffen werden. [39]

### **Verwendung**

Auch beim Getränkekarton steht das Verpackungsdesign im direkten Zusammenhang mit der Funktionalität der Verpackung. Der Getränkekarton ist

aufgrund seines Aufbaus wasser-, licht- und sauerstoffundurchlässig. Dadurch wird z.B. die Zerstörung von Vitaminen darin abgefüllter Getränke erheblich verlangsamt. Der Getränkekarton ist außerdem leichter als Glasflaschen und nimmt beim Transport ein kleineres Volumen gegenüber der Glasflasche ein. Des Weiteren ist er aufgrund seiner Form besser auf Paletten stapelbar. [40] Daher wurden Glasflaschen in vielen Fällen durch Getränkekartons abgelöst. Heutzutage wird z.B. Milch fast nur noch in Getränkekartons angeboten. Auch andere Getränke, wie z.B. Fruchtsäfte, Sahne, Kondensmilch, Wein etc. lassen sich sehr gut in Kartons verpacken.

Neben den eben genannten Vorteilen weist die Getränkeverpackung aber auch einige Nachteile auf. So ist sie ungeeignet für Getränke, die einen starken Überdruck erzeugen können. Dazu gehören kohlenstoffhaltige Getränke, wie z.B. Mineralwasser, Limonaden, Bier oder andere alkoholische Getränke (mit Ausnahme von Wein). Außerdem lassen sich der Füllstand oder Verfallserscheinungen durch die unsichtbare äußere Schicht nicht einsehen. Das ist besonders von Nachteil, wenn sich z.B. Schimmel bilden kann. [40]



Abbildung 6 Getränkekartons einmal anders genutzt [41]

**Material und Herstellung**

Die oben genannten Anforderungen an den Getränkekarton bestimmen seinen Aufbau und seine Gestalt. Der Getränkekarton ist ein Verbund spezieller Materialien. Das erste Material ist der Zellstoff. Er sorgt dafür, dass die tetraedische Form beibehalten wird. Für die Herstellung eines 1-L-Kartons werden ca. 22-25 g gebleichter bzw. ungebleichter Karton aus Sulfatzellstoff benötigt. Ökologisch vorteilhafter wäre zwar die Verwendung von Altpapier. Dieses eignet sich aber leider aufgrund seiner geringen Reißfestigkeit nicht zur Herstellung von Getränkekartons. Außerdem ist es gesetzlich verboten Altpapier zu verwenden, weil das Lebensmittelrecht die Verwendung von Recyclingmaterialien in Lebensmittelverpackungen untersagt. [39]

Der Karton dient als Trägerschicht für weitere Schichten. Bei der Herstellung von Getränkekartons wird zunächst eine Kunststoffschicht innen auf den Karton aufgetragen. Diese soll verhindern, dass Flüssigkeiten aus dem Getränkekarton auslaufen. Die Kunststoffschicht hat außerdem noch eine klebende Funktion. Als Trägerschicht wird hier Polyethylen (PE) verwendet. Die äußere Schicht wird ebenfalls mit PE bestrichen, um ein Eindringen von Feuchtigkeit von außen zu verhindern. Die äußere PE-Schicht wird zudem mit Füll- und Farbstoffen versehen. Die glatte und hellweiße Oberfläche kann nun bedruckt werden. Für Getränke müssen aseptische Kartontypen verwendet werden. Bei diesen befindet sich zwischen der Karton- und der PE-Schicht eine Aluminiumschicht. [39] Zusammengefasst besteht der Getränkekarton von innen nach außen also aus folgenden Schichten: einer PE-Schicht, einer Aluminiumschicht (bei aseptischer Abfüllung), einem Zellstoffkarton mit einer PE-Schicht, sowie Streichmittel und Farbe (siehe Abbildung 7). Dabei hat die Aluminiumschicht ein Gewicht von ca. 1,5 g. [39]



- 
- Polyethylen 21%
  - Aluminium 4%
  - Karton 75%

**Abbildung 7 Der Aufbau eines Getränkekartons [42]**

Die Herstellung der Getränkekartons erfolgt in wenigen einzelnen Schritten. Im Extruder wird PE-Granulat auf über 250°C erhitzt und verflüssigt. In der Beschichtungsanlage werden dann durch schmale Schlitzdüsen zwei Kunststoffschichten auf die Außen- und Innenseiten von Zellstoffbahnen aufgetragen. Wird eine aseptische Verpackung hergestellt, werden die Bahnen zusätzlich mit Aluminium und einer weiteren PE-Schicht versehen. Nachdem die Schichten verschweißt bzw. verklebt wurden, lassen sie sich nicht mehr mechanisch trennen. [43]

Es gibt zwei Verfahren, den Getränkekarton weiter zu verarbeiten. Zum einen wird die bedruckte und beschichtete Papierbahn aufgerollt und an den Abfüllbetrieb geschickt. In der Abfüllmaschine wird die Papierbahn zu einem Schlauch geformt. Dann wird der Schlauch unten versiegelt, und z.B. mit Milch oder Saft befüllt. Der befüllte Getränkekarton wird

anschließend an der Oberseite versiegelt, in Form gebracht und abgetrennt. [43]

Bei der zweiten Methode werden im Verpackungswerk die Zuschnitte jedes

Kartons vorgestanzt. Die Siegelmaschine formt dann aus den Zuschnitten mittels einer Längsnaht Mäntel, siehe Abbildung 8. Diese werden verpackt und an den Abfüllbetrieb geschickt. Dort werden die Mäntel der Abfüllmaschine übergeben, aufgeformt, abgefüllt und versiegelt. [43]

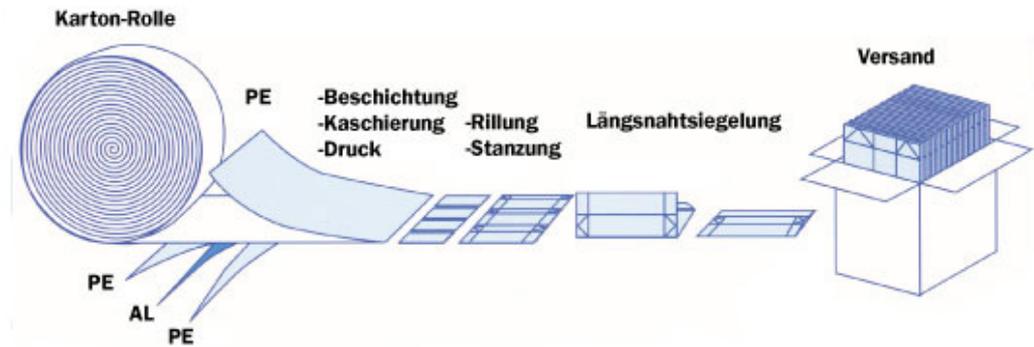
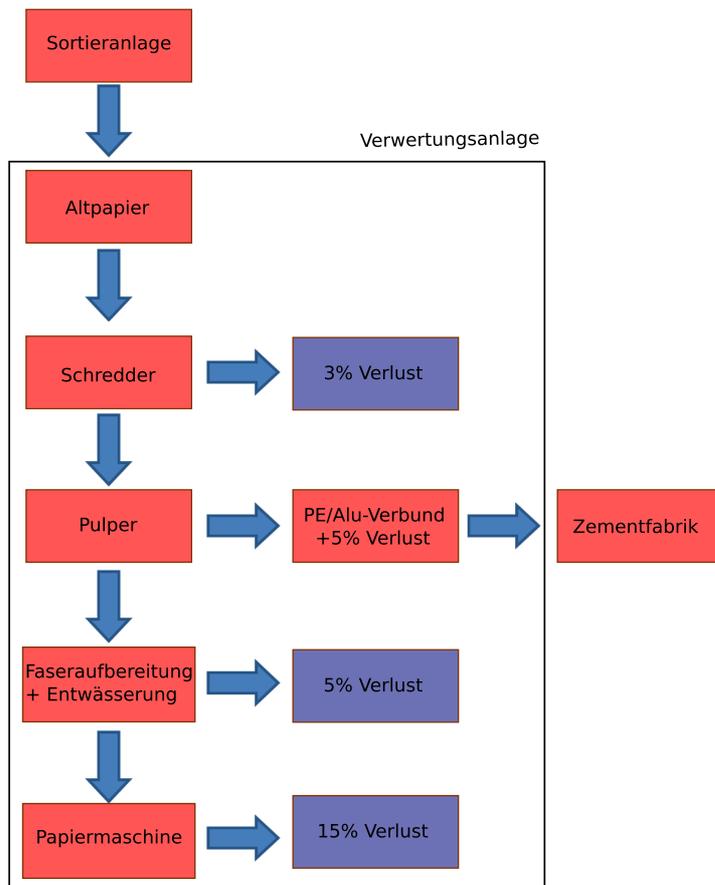


Abbildung 8 Variante 2 der Weiterverarbeitung [42]

Die Getränkekartonhersteller bieten neben dem Verpackungsmaterial auch die dazugehörigen Abfüllmaschinen an. So können je nach Maschinentyp und Packungsformat bis zu 20.000 Verpackungen in der Stunde abgefüllt werden. [43]

### Verwertung

Gebrauchte Getränkekartons werden durch ein duales System eingesammelt. Danach werden sie zu einer Sortieranlage transportiert, die den Abfall beispielsweise wie folgt sortiert (siehe Abbildung 9):



**Abbildung 9** Fließbild zur Verwertung von Getränkekartonagen

In der Sortieranlage werden die Gelben Säcke mittels Sackaufreißer geöffnet und mit einem Förderband zum Trommelsieb befördert. Im Sieb fallen die Anteile, die kleiner als 20 cm sind, durch das Rost, während die größeren Stücke, darunter auch die Getränkekartons, liegen bleiben. Im nächsten Schritt gelangt der Abfallstrom zu einem weiteren Trommelsieb. Die Siebstufe ist hier feiner, so dass alles, was kleiner als 6 cm ist, durchfällt. Die Getränkeverpackungen bleiben somit weiterhin auf dem Förderband. Die nächste Station in der Sortieranlage ist der Magnetabscheider. Hier werden alle magnetischen Anteile im Abfallstrom entfernt. Danach leitet das Förderband die Verpackungen zum NIR-Abscheider. Hier werden die verschiedenen Verpackungen über Infrarotspektroskopie erkannt und mittels Druckluftdüsen auf separate Fließbänder geblasen. Die Getränkekartons werden am Ende zu einem Ballen gepresst und zu einer Papierfabrik transportiert. [44]

In der Papierfabrik werden die Kartons in handgroße Stücke zerkleinert. Im nächsten Schritt werden die kleingehäckselten Getränkekartons zum Pulper geführt. Hier saugen sich die Zellstofffasern mit Wasser voll, wodurch die Verklebung mit den PE- und Alu-Anteilen gelöst wird. Der Brei aus Zellstoff wird anschließend abgesaugt und weiterverarbeitet. Der Verbund aus PE und Aluminium bleibt zurück und wird zu Ballen gepresst an die Zementindustrie verkauft. [35] Der Faserbrei hingegen wird getrocknet, aufbereitet und in der Papierfabrik weiterverarbeitet.

Das PE-Alu-Gemisch weist einen hohen Brennwert auf, wodurch es gern als Ersatzbrennstoff genutzt wird. Das Aluminium erfüllt außerdem noch einen anderen Zweck. Es hat ähnliche Eigenschaften wie Bauxit und verbessert die Abbinde-Eigenschaften von Zement, weshalb es häufig als Substitutionsstoff für Bauxit genutzt wird. [35]

Eine Alternative zur Verbrennung wäre das Trennen der Aluminiumschicht von der PE-Schicht, wie in Abbildung 10 symbolisch dargestellt.



**Abbildung 10 Die recycelten Zwischenprodukte PE, Aluminium und Zellstoff [35]**

Beide Materialien könnten so separat weiter verwertet werden. Leider ist die Technologie aber noch nicht ausgereift und wird deshalb erst in wenigen Anlagen eingesetzt. Eine solche Anlage befindet sich in Merseburg (Kunststoff AG/APK AG), wo seit 2010 die erste Verfahrensstufe in Betrieb ist. [35] Außerdem werden in Varkaus (Finnland) und Barcelona erste Pyrolyseanlage

des Konzerns Stora Enso betrieben, in denen das PE/Alu-Gemisch aufbereitet werden kann.

### Massenbilanz

Das Ziel der Massenbilanzierung ist die Ermittlung der Menge an Wertstoffen, die aus den Verpackungen zurückgewonnen werden können (Sekundärrohstoff). Die Menge an gewonnenem Sekundärrohstoff wird in Relation gesetzt zur Ausgangsmenge an im gesammelten Verpackungsabfall enthaltenen Wertstoff. Die sich so ergebende Verwertungsquote der Verpackung dient als quantitatives Maß zur Beurteilung ihrer Verwertbarkeit.

Im Folgenden wird zunächst die Verwertungsquote des aseptischen Getränkekartons ohne eine zusätzliche Ausgusshilfe bestimmt. Heutzutage verfügt jedoch ein großer Anteil der Getränkekartons über einen solchen zusätzlichen Kunststoffausguss, siehe Abbildung 11. Daher wird auch für diese Art von Getränkekarton die Verwertungsquote berechnet. Ein Vergleich beider Quoten soll aufzeigen, welches Getränkekartondesign eine größere Verwertbarkeit besitzt.



Abbildung 11 Milchkarton mit Ausguss

Der erste Schritt der Massenbilanz ist die Bestimmung der Gesamtmenge an Verpackungen, die zum Verwerter gelangen. Bei Getränkekartons sind das ca. 145.000 Tonnen jährlich. [45]

*Gesamtmenge:* 145.000 t

Man weiß außerdem, dass der aseptische Karton zu 21 % aus PE, zu 4 % aus Aluminium und zu 75 % aus Zellstoff bzw. Karton besteht. Durch Wiegen wurde das Gewicht von 36 g eines einzelnen Getränkekartons bestimmt. Auf Grundlage dieser Werte und unter Abzug der Verluste, die bei jedem Arbeitsschritt auftreten, lässt sich jetzt die Menge an Zellstoff ausrechnen, die zurückgewonnen werden kann. Dies ist im Folgenden dargestellt.

Sobald die Getränkekartons von der Sortieranlage in die Papierfabrik geliefert werden, werden sie im ersten Schritt im Schredder zerkleinert. Hier treten die ersten Verluste in Höhe von schätzungsweise 3 % der Gesamtmenge auf, weil einige der zerkleinerten Kartonreste neben das Förderband fallen.

*Verlust beim Zerkleinern:*  $145.000 \text{ t} * 0,03 = 4.350 \text{ t}$

*neuer Massenstrom:*  $145.000 \text{ t} - 4.350 \text{ t} = 140.650 \text{ t}$

Um die Menge an PE/Alu und Zellstoff zu erhalten, wird der neue Massenstrom von 140.650 Tonnen mit dem Anteil an PE/Alu und Zellstoff multipliziert. Der PE/Alu-Anteil beträgt im aseptischen Karton 25 %, der Rest ist Zellstoff.

*PE und Alu:*  $140.650 \text{ t} * 0,25 = 35.162 \text{ t}$

*Zellstoff:*  $140.650 * 0,75 = 105.488 \text{ t}$

Wenn der PE/Alu-Verbund im Pulper vom Karton getrennt wird, entstehen die nächsten Verluste, weil ein Teil des Papiers im PE/Alu-Massenstrom mitgeführt wird. Diese liegen geschätzt bei 5 %.

*Verluste im Pulper:*  $105.488 \text{ t} * 0,05 = 5.274 \text{ t}$

*neuer Massenstrom:*  $105.488 \text{ t} - 5.274 \text{ t} = 100.213 \text{ t}$

Der Restverbund aus PE und Aluminium wird im Drehrohrofen zur Zementherstellung genutzt, was jedoch nicht als stoffliche Verwertung anzusehen ist. Der Zellstoff hingegen wird in der Papierfabrik weiter verarbeitet

und somit stofflich verwertet. Hier werden im nächsten Schritt die Fasern aufbereitet und entwässert. Man kann dabei Verluste an Zellstoff in Höhe von 5 % erwarten, z.B. durch das Hängenbleiben und Anhaften der Fasern.

*Verluste beim Trocknen und Aufbereiten:*  $100.213 \text{ t} * 0,05 = 5.011 \text{ t}$

*neuer Massenstrom:*  $100.213 \text{ t} - 5.011 \text{ t} = 95.202 \text{ t}$

Die nächsten Verluste treten bei den weiteren Produktionsabläufen in der Papierfabrik auf. Hier wird ein Verlust von insgesamt 15 % angenommen, der z.B. aufgrund von Maschinenfehlern auftritt.

*allgemeine Verluste:*  $95.202 \text{ t} * 0,15 = 14.280 \text{ t}$

*neuer Massenstrom:*  $95.202 \text{ t} - 14.280 \text{ t} = 80.922 \text{ t Zellstoff}$

Aus 145.000 Tonnen Verbundkarton können insgesamt 80.922 Tonnen Zellstoff zurückgewonnen werden. Der PE/Alu-Anteil wird jedoch nicht stofflich verwertet. Die ermittelte Verwertungsquote beträgt somit 55,8 %. Sie liegt daher um 4,2 % unter der gesetzlich vorgeschriebenen Mindestverwertungsquote von 60 %.

Im Folgenden wird ein Getränkekarton betrachtet, der zusätzlich über eine Ausgusstülle aus PP verfügt. Mit diesem Vergleich soll bestimmt werden, welchen Einfluss diese Designänderung auf die Verwertbarkeit des Getränkekartons hat. Es wurde ermittelt, dass der Karton insgesamt 37 g wiegt. Entfernt man den Ausguss und wiegt beide Komponenten einzeln, so ergibt sich ein Gewicht von 34 g für den Getränkekarton und 3 g für den Ausguss. Wie zuvor wird angenommen, dass der Kartonanteil zu 75 % aus Zellstoff besteht. Bezogen auf das Gesamtgewicht des Getränkekartons mit Ausguss ergeben sich somit ein Zellstoffanteil von 68,9 % und ein Anteil von 31,1 % an PE/Alu/PP.

Die Berechnung der Massenbilanz für den Getränkekarton mit Ausguss läuft bis zum Pulper identisch zum Getränkekarton ohne Ausguss, weswegen dieser Teil der vorangegangenen Rechnung übernommen werden kann. Wie oben wird von einer Gesamtmenge an beim Verwerter anfallenden Getränkekartons in Höhe von 145.000 Tonnen ausgegangen.

*Gesamtmenge:* 145.000 t

*Verlust beim Zerkleinern:*  $145000 \text{ t} * 0,03 = 4.350 \text{ t}$

*neuer Massenstrom:*  $145.000 \text{ t} - 4.350 \text{ t} = 140.650 \text{ t}$

Wie zuvor wird der neue Massenstrom von 140.650 Tonnen mit dem Anteil an PE/Alu/PP und Zellstoff multipliziert, um auf die Mengen an PE/Alu/PP und Zellstoff zu kommen. Der PE/Alu/PP-Anteil beträgt im aseptischen Karton mit Ausguss 31,1 %, der Rest ist Zellstoff.

*PE und Alu:*  $140.650 \text{ t} * 0,311 = 43.714 \text{ t}$

*Zellstoff:*  $140.650 * 0,689 = 96.936 \text{ t}$

Wenn der PE/Alu Verbund im Pulper vom Karton getrennt wird, entstehen auch hier Verluste, weil ein Teil des Papiers im PE/Alu/PP-Massenstrom mitgeführt wird. Diese werden wieder auf 5 % geschätzt.

*Verluste im Pulper:*  $96.936 \text{ t} * 0,05 = 4.847 \text{ t}$

*neuer Massenstrom:*  $96.936 \text{ t} - 4.847 \text{ t} = 92.098 \text{ t}$

Die Verwertung vom Restverbund PE/Alu sowie der PP-Deckel verläuft wie in der anderen Rechnung. Sie werden wieder im Drehrohrofen zur Zementherstellung energetisch verwendet. Der Zellstoff wird in der Papierfabrik weiter verarbeitet. Wieder wird hier der Verlust durch Aufbereiten und Entwässern der Fasern mit 5 % angenommen.

*Verluste beim Trocknen und Aufbereiten:*  $92.098 \text{ t} * 0,05 = 4.604 \text{ t}$

*neuer Massenstrom:*  $92.098 \text{ t} - 4.604 \text{ t} = 87.484 \text{ t}$

Die nächsten Verluste treten wieder bei den weiteren Produktionsschritten in der Papierfabrik auf, die auch hier auf 15 % geschätzt werden.

*allgemeine Verluste:*  $87.484 * 0,15 = 13.123 \text{ t}$

*neuer Massenstrom:*  $87.484 \text{ t} - 13.123 \text{ t} = 74.362 \text{ t Zellstoff}$

Aus 145.000 Tonnen Getränkekarton konnten also 74.362 Tonnen Zellstoff zurückgewonnen werden. Der PP/PE/Alu-Anteil wird nicht stofflich verwertet. Die Verwertungsquote liegt somit bei 51,3 %, also 8,7 % unter der gesetzlich

vorgeschriebenen Mindestverwertungsquote von 60 % und 4,5 % unter der Verwertungsquote von Getränkekartons ohne Ausguss. Die Verwertungsquote des Getränkekartons mit Ausguss beträgt daher nur ca. 92 % der Verwertungsquote des Getränkekartons ohne Ausguss. Somit ist nachgewiesen, dass die zusätzliche Ausgusshilfe aus PP die Verwertbarkeit des Getränkekartons erheblich verringert. Dies zeigt, wie sich eine relativ kleine Designänderung deutlich auf die Verwertbarkeit einer Verpackung auswirken kann.

## 3.2. Joghurtbecher

In diesem Kapitel werden Joghurtverpackungen hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit untersucht. Es werden PP-Joghurtbecher mit einer Papierbanderole analysiert und anschließend mit bedruckten PP-Joghurtbechern verglichen. Außerdem wird die Effizienz der Verwertung von PLA-Bechern bestimmt. Jedoch wird zunächst das Design des Joghurtbechers im Kontext seiner Entstehungsgeschichte und seiner Verwendung betrachtet. Außerdem werden die bei der Joghurtbecherproduktion verwendeten Materialien und Herstellungsverfahren beschrieben.

### **Entstehungsgeschichte des Joghurtbechers**

Früher wurde Joghurt, ebenso wie Milch, als lose (unverpackte) Ware verkauft. [46] Infolge des technischen Fortschritts im Bereich der Kunststoffverarbeitung wurde es möglich, Joghurt in portionsgerechte Becher abzufüllen. Fortschritte auf dem Gebiet der Polymerchemie in den Jahren nach 1950 kurbelten weltweit die Produktion von Kunststoffen an. Vor allem die Entwicklung der Thermoplaste und deren Verarbeitungsverfahren ließen die Produktion von Formteilen günstiger werden. [47] In diesem Zusammenhang gelang es einer Berliner Molkerei 1963, den ersten Joghurt in Bechern abzufüllen, die zunächst noch eher unförmig und einfach waren. Der Vorteil der Becher besteht einerseits darin, dass sie leicht zu produzieren sind. Andererseits sind die Becher stabil, lassen sich leicht transportieren und können ansprechend gestaltet werden. [46] Die ersten populären Motive auf Joghurtbechern waren Märchenfiguren, Fußballstars zur Zeit der 1960er Jahre und Flower-Power-Motive in den 1970ern. Heute gibt es eine große Auswahl an Joghurt in Bechern, sowohl die Gestaltung als auch die Geschmacksrichtungen betreffend, siehe Abbildung 12. [46]



**Abbildung 12 Eine Auswahl an modernen Joghurtbechern**

Mit der Zeit stellte sich heraus, dass die Verwendung von Joghurtbechern neben den genannten positiven auch negative Aspekte hat. So baut sich Kunststoff in der Umwelt sehr langsam ab. Um dieses Problem zu lösen, wird momentan intensiv an Bechern aus biologisch abbaubaren Materialien, wie z.B. Holzfasern oder Milchsäure, geforscht. Allerdings wird es noch dauern, bis Lösungen gefunden wurden, die auch technisch umsetzbar sind. [46] Eine Ausnahme stellen hier Becher der Firma Danone dar. Die Becher für den Joghurt der Marke Activia werden bereits seit 2011 aus Polymilchsäure (*polylactic acid*, PLA) hergestellt, welches aus Mais gewonnen wird.

### **Verwendung**

Ursprünglich wurde nur Joghurt in Kunststoffbechern abgefüllt. Heutzutage werden Becher aus verschiedenen Kunststoffen (z.B. PS, PP und PET) als Verpackungen für viele weitere Produkte genutzt. So werden z.B. Buttermilch, Creme Fraîche, Sahne, Sauerrahm oder Kaffeesahne in Kunststoffbechern verkauft, ebenso wie z.B. Müsli, rote Grütze oder Babynahrung, siehe Abbildung 13.



**Abbildung 13** Fünf-Minuten-Terrine (links) [48] und Müsli (rechts) [49] im Kunststoffbecher

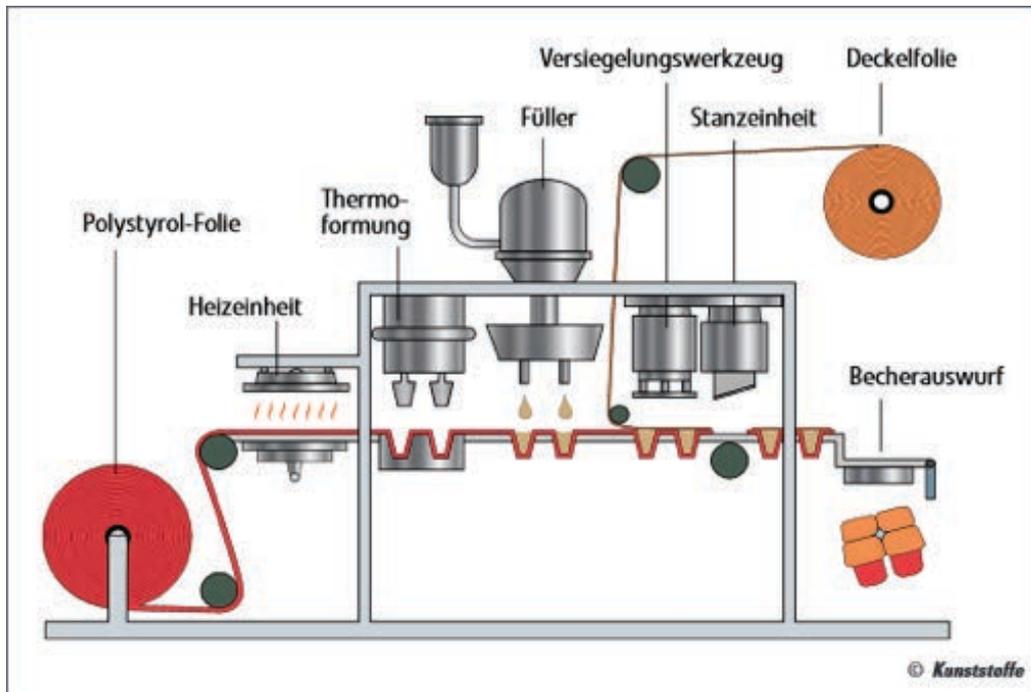
Weitere Produkte, die ursprünglich nicht im Kunststoffbecher angeboten wurden, sind Fertiggerichte wie z.B. 5-Minuten-Terrinen. Anhand dieser Beispiele lässt sich erkennen, dass Kunststoffbecher ein fester Bestandteil des alltäglichen Lebens geworden sind. Seit ihrer Einführung 1963 haben sie maßgeblich das Kaufverhalten und die Essgewohnheiten der Verbraucher beeinflusst. [46] Gleichzeitig musste aber auch das Design der Kunststoffbecher modernen Lebensstilen anpassen werden. Gab es früher mehr verheiratete Paare und Familien, haben sich mit der Zeit mehr Senioren und Single-Haushalte etabliert. Der Markt hat auf diese Veränderung reagiert und bietet deswegen mehr Produkte im Singleformat an. Da sich Kunststoffbecher dafür bestens eignen, werden folglich auch Produkte, die früher in anderer Form verkauft wurden, nun in diesen angeboten. [39]

### **Material und Herstellung**

Zur Herstellung von Joghurtbechern werden am häufigsten Thermoplaste verwendet. Folgende Kunststoffe gehören zur Gruppe der Thermoplaste: PE (Polyethylen), PP (Polypropylen), PS (Polystyrol), PVC (Polyvinylchlorid), PA (Polyamid), Polyethylenterephthalat (PET), und PMMA (Polymethylmethacrylat). Davon sind nur PS, PP und PET in dieser Reihenfolge für die Herstellung von Joghurtbechern relevant. [50]

Es wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem die Becher direkt im Molkereibetrieb geformt werden. Dieses Verfahren nennt sich Form-Fill-Seal-

Verfahren (FFS). [50] Bei FFS-Verfahren werden die einzelnen Schritte i) formen, ii) füllen und iii) verschließen in einer Maschine zusammengefasst, siehe Abbildung 14.



**Abbildung 14 Die einzelnen Schritte des FFS-Verfahrens [50]**

Der Molkereibetrieb bekommt als Ausgangsmaterial PS in Form einer Folie vom Hersteller geliefert. Zuerst wird die Folie in der FFS-Maschine erhitzt. Anschließend wird die erhitzte Folie im Tiefziehverfahren zu Bechern geformt. Dies geschieht, indem die Becherform durch eine Presse in die Folie gestempelt wird. Im dritten Schritt wird der Joghurt in die Becher abgefüllt und abschließend mit einer bedruckten Siegfolie verschlossen. Sobald die Becher versiegelt wurden, trennt die Maschine die Joghurtbecher in mehrere Einheiten. Diese können dann verkauft und weiter transportiert werden. [50]

Es gibt neben dem FFS-Verfahren noch ein zweites Verfahren, welches sich FS-Verfahren nennt und ebenfalls im Molkereibetrieb verwendet wird. Im Unterschied zum ersten Verfahren formt und bedruckt die Becher hier bereits der Folienhersteller. Der Molkereibetrieb muss die Becher nur noch befüllen und mit einer Siegfolie verschließen. [50] In der Industrie wird jedoch

meistens das FFS-Verfahren eingesetzt, das es energieeffizienter ist und zusätzliches Abfallaufkommen durch Umverpackungen vermieden wird. [50]

Nicht nur die Verarbeitungstechnik, auch die Folie selbst muss bestimmte Anforderungen erfüllen, um für die Herstellung von Bechern in Frage zu kommen. Die Folie muss einerseits für eine hohe Durchsatzgeschwindigkeit geeignet sein, d.h. sie darf nicht reißen. Andererseits ist für den Folienhersteller ein niedriger Energieverbrauch bei der Folienherstellung wichtig. Daher kommt es hier auf die geeignete Rohstoffmischung an. Standardmäßig wird General Purpose Polystyrol (GPPS) mit schlagfestem Polystyrol (High Impact PS, kurz HIPS) gemischt. HIPS definiert die Schlagfestigkeit und die Schrumpfeigenschaft der Folie, während GPPS für die Steife derselben verantwortlich ist. Normalerweise liegt der Massenanteil an GPPS in der Mischung zwischen 20 und 70 %. [50] Die Folieneigenschaften lassen sich während der Herstellung hauptsächlich durch die Schmelztemperatur, die Abkühlgeschwindigkeit und die Stärke der Streckung beim Abziehen beeinflussen. [50]

Wie eingangs erwähnt, werden fast alle Joghurtbecher aus PS, PP oder PET hergestellt. Eine Ausnahme ist der Activia-Joghurtbecher der Firma Danone (siehe Abbildung 15), der seit April 2011 verwendet wird.



**Abbildung 15** Activia-Joghurtbecher aus PLA

Er ist einer der wenigen Becher, die aus einem nachwachsenden Rohstoff hergestellt werden. Als Material wird hier Polymilchsäure (PLA) verwendet, das aus Mais gewonnen wird. Eine Ökobilanz, die vom IFEU Institut (Institut für Energie- und Umweltforschung) erstellt wurde, bestätigt, dass gegenüber einem PS-Becher 25 % weniger Treibhausgase bei der Herstellung eines PLA-Bechers entstehen. [51] Außerdem werden 43 % weniger fossile Brennstoffe verbraucht als bei der herkömmlichen Herstellung. [51] Nachteilig ist allerdings, dass der Activia-Joghurtbecher aus der Stärke des Maiskolbens hergestellt wird. Besser wäre es, nur den Stängel des Maiskolbens zu nutzen und den Kolben selbst für die Lebensmittelproduktion einzusetzen. [52]

### **Verwertung von PP-Joghurtbechern**

Nachdem die gebrauchten Joghurtbecher mit den anderen Plastikabfällen entsorgt und eingesammelt wurden, erfolgt die Sortierung in der Sortieranlage. Hierbei gibt es mehrere Möglichkeiten, Plastikabfälle voneinander zu unterscheiden. Das in Sortieranlagen für LVP eingesetzte Verfahren ist die Sortierung mittels Nahinfrarotspektroskopie. Diese wurde weiter oben bereits detailliert beschrieben. Außerdem existieren nasse Sortierverfahren, die allerdings nicht in LVP-Sortieranlagen angewandt werden. Hierzu zählt die Trennung von Kunststoffen im Schwimm-Sink-Verfahren. Bei diesem Verfahren werden die zerkleinerten Kunststoffe aufgrund ihres spezifischen Gewichtes voneinander getrennt. Die leichten Kunststoffe, PP und PE, schwimmen oben, während die schweren Kunststoffe, PVC und PS, zu Boden sinken. Ein weiteres nasses Kunststoffsortierverfahren ist das Hydrozyklonverfahren. Auch hier wird das spezifische Gewicht der unterschiedlichen Kunststoffe zur Trennung dieser genutzt. Im Unterschied zum Schwimm-Sink-Verfahren entwickelt sich durch die Kreisbewegung im Inneren des Zyklons ein Strudel. Die schweren Kunststoffe werden nach außen gedrückt und durch Rohre abgezogen. Die leichten Kunststoffpartikel wandern nach innen und werden über ein separates Rohr abgesaugt.

Nach der Sortierung der Kunststoffe folgt im nächsten Schritt ihre Verwertung, siehe Abbildungen 16 und 17.



jedoch aus ökonomischen Gründen nur die werkstoffliche Verwertung in Betracht.

Die werkstoffliche Verwertung ist auch der ökologisch beste Weg. Hier wird der gebrauchte Kunststoff zu einem Sekundärrohstoff aufbereitet. Dieser kann dann wieder in Kombination mit den Primärrohstoffen oder allein zur Herstellung neuer Produkte eingesetzt werden. [53] Der Kunststoff wird in der Verwertungsanlage zerkleinert. Anschließend werden die Partikel gewaschen und getrocknet. Parallel dazu wird hier auch der Papierschlamm abgeschieden, der von den Papierbanderolen stammt, mit denen einige Joghurtbecher beklebt sind. Danach werden die Partikel im Extruder verdichtet, verschmolzen und entgast. Es besteht außerdem die Möglichkeit, während des Vorgangs Farbpigmente beizumischen. Der Extruder eignet sich sowohl für sortenreine, sortenähnliche, als auch vermischte Kunststoffteilchen. Das fertige Kunststoffgranulat wird an Fabriken verkauft, die daraus neue Produkte erschaffen.

Kommt der Kunststoff für eine werkstoffliche Verwertung nicht in Frage, muss er rohstofflich recycelt werden. Der Altkunststoff kann hierbei in seine Rohstoffe (hauptsächlich Erdöl) umgewandelt werden. Jedoch sind diese Verfahren unwirtschaftlich und werden daher nicht großtechnisch umgesetzt. Stattdessen dient der Altkunststoff als Ersatzbrennstoff bzw. Reduktionsmittel in Stahlwerken. Es gibt verschiedene Verfahren zur rohstofflichen Verwertung von Altkunststoff. [53] Das erste stammt von der Firma BASF. In diesem Verfahren werden Mischkunststoffe gespalten und zu Olefinen, einem flüssigen Produkt aus ungesättigten Kohlenwasserstoffen, umgewandelt. Man nutzt die Olefine als Basischemikalien für die Herstellung von Kunststoffen. Mit dem Verfahren lassen sich große Mengen polyolefinreicher Kunststoffe (PE, PP) verwerten. [53] In einem anderen Verfahren wird das Kunststoffagglomerat in Hochöfen eingeblasen. Wird es erhitzt, wandelt sich das Kunststoffagglomerat sofort in Synthesegas (Kohlenmonoxid und Wasserstoff) um, das dem Erz wiederum Sauerstoff entzieht. Das Gas ersetzt Kohle und Öl im Verhältnis von 1:1, wodurch es sich gut als Substitutionsstoff für diese Rohstoffe eignet. Das letzte Verfahren beinhaltet die Entgasung von

Kunststoff, auch Pyrolyse genannt. Unter Luftabschluss wird der Kunststoff erhitzt, wodurch die langen Molekülketten aufgebrochen werden und niedermolekulare Fragmente entstehen. Aus Altkunststoff wird somit Methanol. Das Methanol wiederum ist Basiselement für neue petrochemische Produkte. [53]

### Verwertung von PLA-Joghurtbechern

PLA ist das derzeit einzige biologische Material, das zur Herstellung von Joghurtbechern geeignet ist, da es in ausreichender Menge vorhanden ist und die Produktions- und Verarbeitungsanforderungen erfüllt. [51] Die werkstoffliche Verwertung von PLA stellt sich jedoch als problematisch dar. Die DKR schätzte, dass nur 80 % der PLA-Joghurtbecher im Gelben Sack oder der Gelben Tonne und 20 % im Restmüll entsorgt werden. Letzterer Anteil wird nur einer thermischen Nutzung in MVAs zugeführt und damit aus dem Stoffkreislauf entfernt. [51] Die Becher, die durch ein duales System eingesammelt werden, gelangen zu einer Sortieranlage, siehe Abbildung 18.

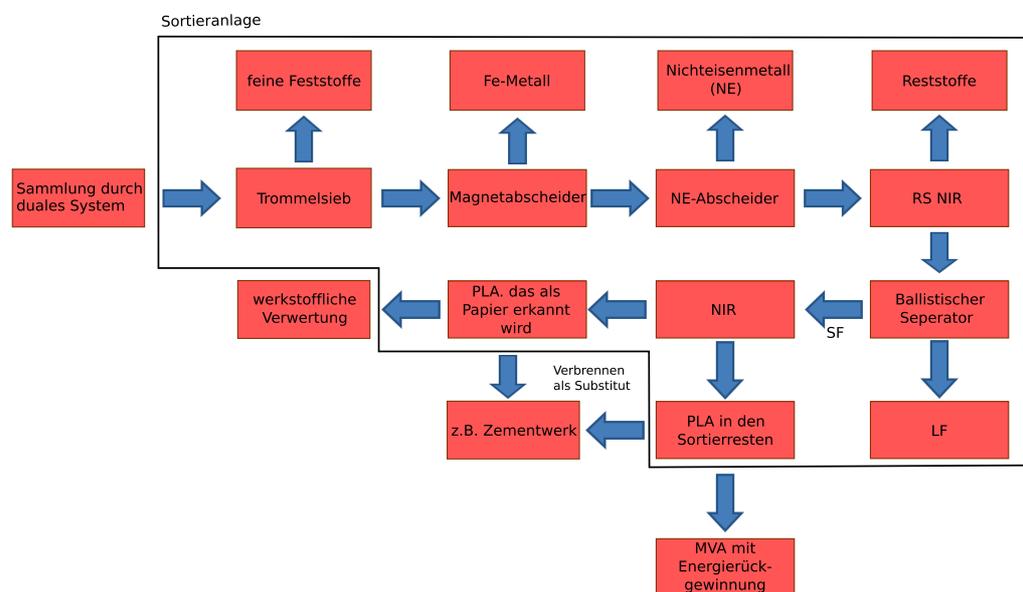


Abbildung 18 Fließdiagramm zur Verwertung von PLA-Bechern

Dort eingesetzte NIR-Sortierer erkennen die PLA-Joghurtbecher jedoch nicht als Kunststoff. [51] So gelangen 20 % dieser PLA-Becher als Störstoff in die Papierfraktion, während 80 % zusammen mit den Sortierresten ausgesondert werden. [51] Von den PLA-Joghurtbechern in der Papierfraktion werden 84 %

werkstofflich verarbeitet. Der übrige Anteil (16 %) dient als Substitutionsstoff für Steinkohle in Zementwerken. [51] Hier werden auch 75 % der Becher, die den Sortierresten zugeordnet wurden, verwertet. Die restlichen 25 % werden in einer MVA mit Energierückgewinnung verbrannt. [51] Somit werden nur ca. 13 % aller gebrauchten PLA-Joghurtbecher (bzw. 17 % der durch ein duales System gesammelten Becher) der werkstofflichen Verwertung zugeführt.

### Massenbilanz

In diesem Kapitel wird der Einfluss des Designs einer Verpackung auf ihre Verwertbarkeit anhand von zwei Joghurtbechern aus PP untersucht. Dazu wird zunächst eine Massenbilanz für die Verwertung von PP-Joghurtbechern mit Papierbanderole aufgestellt und so die Verwertungsquote bestimmt. Anschließend wird diese mit der Verwertungsquote von bedruckten PP-Joghurtbechern verglichen.

Jährlich entstehen in Deutschland 4,4 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle. Davon sind 1,4 Millionen Tonnen Verpackungsabfälle, die beim Verbraucher anfallen. [54] Als Anteil der Joghurtbecher werden 15 % vom gesamten Abfallstrom angenommen.

*Gesamtmenge an PP – Joghurtbechern* =  $1.400.000 \text{ t} * 0,15 = 210.000 \text{ t}$

Zuerst werden Joghurtbecher mit Papierbanderole (siehe Abbildung 19) betrachtet.



Abbildung 19 PP-Becher mit Papierbanderole

Um die Anzahl aller jährlich anfallenden Becher im Kunststoffabfallstrom zu bestimmen, wird der PP-Anteil durch das PP-Gewicht eines einzelnen Bechers dividiert. Ohne Inhalt wiegt ein Becher 8 g, siehe Abbildung 20. Allerdings wiegt der PP-Anteil nur 5 g, die restlichen 3 g sind das Gewicht der Papierbanderole.

$$\text{Anzahl Joghurtbecher} = 210.000 * 10^6 \text{ g} / 5 \text{ g} = 42 \text{ Mrd. Becher}$$



**Abbildung 20 PP-Becher mit Papierbanderole (leer)**

Wegen ihrer Papierbanderole werden die PP-Joghurtbecher in der Sortieranlage zu 50 % als Kunststoff und zu 50 % als Papier erkannt werden.

$$\text{neuer PP – Massenstrom} = 210.000 \text{ t} * 0,5 = 105.000 \text{ t}$$

In der Verwertungsanlage treten beim Zerkleinern des Aufgabegutes erste Verluste auf, die mit 3 % abgeschätzt werden.

$$\text{Verlust durch Zerkleinerung} = 105.000 \text{ t} * 0,03 = 3.150 \text{ t}$$

$$\text{neuer PP – Massenstrom} = 101.850 \text{ t}$$

Im nächsten Arbeitsschritt, dem Waschen und Trocknen, treten die größten Verluste auf. Hier gehen 25 % der Gesamtmasse verloren, weil ein Teil der zerkleinerten PP-Stückchen zusammen mit dem Papierschlamm ausgespült wird.

$$\text{Verlust Waschen und Trocknen} = 101.850 \text{ t} * 0,25 = 25.463 \text{ t}$$

$$\text{neuer PP – Massenstrom} = 76.388 \text{ t}$$

An dieser Stelle fällt zusätzlich noch Papierschlamm an, für dessen Verwertung der Recycler bezahlen muss. Um die gesamte Papiermasse zu bestimmen, wurde die Papierbanderole des Joghurtbechers separat gewogen und wird nun mit der Anzahl an Joghurtbechern in Beziehung gebracht. Die Hälfte aller Joghurtbecher wird als Papier erkannt und aussortiert, sodass ihre Papierbanderolen nicht zum Papierschlamm beitragen.

$$\text{Gewicht Papierbanderole} = 3 \text{ g}$$

$$\text{Gesamtmasse an Papier} = 42 \text{ Mrd. Becher} * 3 \text{ g} \frac{10^9}{10^6} = 126.000 \text{ t}$$

$$\text{Masse an Papierschlamm beim Verwerter} = 126.000 \text{ t} / 2 = 63.000 \text{ t}$$

Nachdem das PP gewaschen und getrocknet wurde, wird es im Extruder erhitzt und anschließend zu Regranulat geformt. Hier gehen ca. 3 % des erhitzten PP z.B. durch Anhaften verloren.

$$\text{Verlust im Extruder} = 76.388 \text{ t} * 0,03 = 2.292 \text{ t}$$

$$\text{neuer PP – Massenstrom} = 74.096 \text{ t}$$

Das Regranulat wird im Anschluss an die Hersteller geschickt. Die letzten Verluste treten beim Hersteller auf. Hier werden Verluste in Höhe von 15 % angenommen.

$$\text{Verlust beim Hersteller} = 74.096 \text{ t} * 0,15 = 11.114 \text{ t}$$

$$\text{PP – Massenstrom} = 62.982 \text{ t}$$

Aus 210.000 Tonnen PP konnten demnach 62.982 Tonnen PP wieder zurückgewonnen werden. Das ergibt eine Verwertungsquote von 30 %. Diese liegt deutlich unter der gesetzlichen Mindestverwertungsquote von 60 %.

Die Gesamteinnahmen aller Kunststoffverwerter aus dem Verkauf von 74.096 Tonnen PP betragen 65,95 Mio. € bei einem Preis für PP in Höhe von 890 €/t. [55] Dem gegenüber stehen die Kosten der Papierschlammbehandlung. Hierfür werden Unkosten in Höhe von 700 €/t angenommen, die sich insgesamt auf 44,1 Mio. € jährlich belaufen. Der Realgewinn beträgt somit 21,85 Mio. €.

Zum Vergleich wurde ein bedruckter Joghurtbecher gewogen und die Massenbilanz für diesen im Folgenden berechnet. Der Becher wiegt ohne Inhalt ebenfalls 5 g, siehe Abbildung 21. Die Ausgangsmasse an PP beträgt, wie bei der Rechnung für Joghurtbecher mit Papierbanderole, 210.000 Tonnen, da wieder ein Joghurtbecher-Anteil von 15 % des Verpackungsabfallstroms angenommen wird.

$$\text{Masse an PP} = 1.400.000 \text{ t} * 0,15 = 210.000 \text{ t}$$



**Abbildung 21 Bedruckter PP-Becher voll (links) und leer (rechts)**

Der Unterschied zur obigen Betrachtung ist, dass in der Sortieranlage diesmal 100 % der Joghurtbecher als PP erkannt werden. Die Verlustrechnung ist im Weiteren identisch zur Bilanzierung der Joghurtbecher mit Papierbanderole. Es treten auch hier Verluste durch Zerkleinerung (3 %), beim Waschen und Trocknen (25 %) und im Extruder (3 %) auf.

$$\text{Verlust durch Zerkleinerung} = 210.000 \text{ t} * 0,03 = 6.300 \text{ t}$$

$$\text{neuer PP – Massenstrom} = 203.700 \text{ t}$$

$$\text{Verlust durch Waschen und Trocknen} = 203.700 \text{ t} * 0,25 = 50.925 \text{ t}$$

$$\text{neuer PP – Massenstrom} = 152.775 \text{ t}$$

$$\text{Verlust im Extruder} = 152.775 \text{ t} * 0,03 = 4.583 \text{ t}$$

$$\text{neuer PP – Massenstrom} = 148.192 \text{ t}$$

Das Regranulat wird schließlich zum Hersteller geschickt, bei dem weitere Verluste in Höhe von geschätzt 15 % auftreten.

$$\text{Verlust beim Hersteller} = 148.192 \text{ t} * 0,15 = 22.228 \text{ t}$$

$$\text{PP – Massenstrom} = 125.963 \text{ t}$$

Aus 210.000 Tonnen PP können demnach 125.963 Tonnen PP wieder zurückgewonnen werden, was einer Verwertungsquote von 60 % entspricht. Diese genügt knapp den gesetzlichen Vorgaben. Damit ist die Verwertungsquote von bedruckten PP-Joghurtbechern doppelt so hoch wie die Verwertungsquote der PP-Joghurtbecher mit Papierbänderole. Die Ursache hierfür ist, dass die NIR-Einheiten in den Sortieranlagen die Hälfte der PP-Joghurtbecher mit Papierbänderole der Papierfraktion zuordnen. Dies zeigt, wie sich ein aus verschiedenen, verbundenen Materialien aufgebautes Verpackungsdesign aufgrund technischer Limitierungen negativ auf die Verwertbarkeit der Verpackung auswirken kann.

### 3.3. Glas- und PET-Ketschupflaschen

In diesem Kapitel wird das Verpackungssystem Ketschupflasche hinsichtlich seiner Verwertbarkeit analysiert. Hierbei werden die zwei Materialvarianten Glas und PET miteinander verglichen, um den Einfluss des Designs der Ketschupflasche auf ihre Verwertungsquote zu bestimmen. Um die Verwertungsquoten zu ermitteln, werden die Verwertungswege von Glas- und PET-Ketschupflaschen beschrieben und anschließend entsprechende Massenbilanzierungen aufgestellt. Zuvor wird das Design der Ketschupflasche im Kontext der Entstehungsgeschichte, der Verwendung und schließlich der Herstellung betrachtet.

#### **Entstehungsgeschichte der Glasflasche**

Die Anfänge der Glasflasche gehen auf das Jahr 1500 v. Chr. zurück. [56] Die frühesten Behälter aus Hohlglas fand man in den Gräbern der Pharaonen. Sie stellen einen Vorläufer der heutigen Flaschen dar. Es gab sie als Fläschchen, Gläschen und Kelche. Die Herstellung erfolgte mittels der Sandkerntechnik. Dabei wurden Fäden um einen mit Sand oder feuchten Ton gefüllten Sack gewickelt, der dann in geschmolzenes Glas getaucht wurde. Der Sandkern wurde anschließend entfernt, wodurch ein Glashohlkörper entstand. In diesen Fläschchen wurden Heilmittel und Kosmetika gelagert. Der Herstellungsvorgang war sehr aufwendig, weshalb Glas zum Luxusgut zählte. Bis zum 1. Jahrhundert v. Chr. hat man so Gefäße aus Glas hergestellt. [56]

Die Revolution der Glasherstellung erfolgte in Tyros und in Sidon im heutigen Libanon. Dort ansässige Glasmacher verwendeten beim Schmelzen ein Glasrohr. So waren sie in der Lage, einen Teil des geschmolzenen Rohres aus dem Schmelztiigel zu nehmen, um so das Rohr aufzublasen. Dieses konnten sie gestalten und in verschiedene Formen bringen. In der Folge entstanden Flaschen, Krüge und Fläschchen für jedermann. [56]

Lange Zeit hat sich an dieser Herstellungsmethode kaum etwas verändert. Erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden enorme Fortschritte bei der industriellen Herstellung von Glasgefäßen gemacht, wodurch die handwerkliche

Fertigung stark zurückgedrängt wurde und der Wert von Glasflaschen weiter sank. [56]

### Geschichte des Ketchups

Ursprünglich kam der Ketchup aus China und wurde dort „Kê-tsiap“ genannt, auf Deutsch Fischtunke. Ende des 17. Jahrhunderts wurde die eingedickte Fischsoße erstmals aus Singapur mitgebracht, was zu dieser Zeit noch unter britischer Herrschaft stand. Der Geschmack entsprach aber nicht dem der Engländer. Sie fügten daher der Fischsoße Zucker und Pilze hinzu. [57]

Der Ketchup, den wir heute kennen, wurde dagegen in den USA entwickelt. Der deutsche Auswanderer Henry John Heinz eröffnete 1869 ein Lebensmittelgeschäft, wo er eingelegtes Gemüse verkaufte. Die Kunden sollten schon vor dem Kauf das Produkt inspizieren können, daher wurde das Gemüse in durchsichtigen Glasflaschen angeboten. Als Henry Heinz 1876 von der alten chinesischen Soße hörte, entwickelte er eine neue Rezeptur und nannte sie „Heinz Tomato Ketchup“. Die grundlegenden Zutaten waren Tomatenmark, Zucker, Essig, Salz und Gewürze. Auch der Ketchup wurde in durchsichtigen Glasflaschen abgefüllt, siehe Abbildung 22. Heinz wollte dadurch hauptsächlich den hohen Anteil an Tomaten in der Sauce sichtbar machen. [57] [58] [59]



Abbildung 22 Entwicklung des Designs der Heinz Ketchup-Flaschen von Beginn an bis heute [60]

Während der Ketchup in den 1950er Jahren in Amerika bereits sehr beliebt war, wurde er erst zu dieser Zeit in Deutschland eingeführt. Schnell war er auch hier sehr erfolgreich und bald wurden andere Geschmacksrichtungen, wie „Schaschlik“, „Curry“ oder „Mango“, angeboten. [61]

Den Ketchup gibt es heutzutage nicht nur in Glas-, sondern auch in Kunststoffflaschen, die eine einfachere Handhabung beim Ausgießen ermöglichen und ein geringeres Gewicht haben. Neben Heinz gibt es auch andere Ketchuphersteller. So produzieren z.B. auch die Firmen „Werder“ und „Kraft“ Ketchup und bieten ihn mitunter ebenfalls in Kunststoffflaschen an.

### **Verwendung und Vergleich von PET- und Glasflaschen**

Das Design von Glasflaschen ist sehr vielfältig. Es gibt sie in verschiedenen Größen und Formen. Sie sind robust, praktisch und oftmals dekorativ. Glasflaschen lassen sich universell einsetzen und sind insbesondere für fast alle Getränke geeignet. Daher kommen sie im Lebensmittelbereich zum Einsatz, wo sie unter anderem als Verpackung für kohlenensäurehaltiges Wasser, Bier und Erfrischungsgetränke genutzt werden. Glasflaschen werden aber z.B. auch im Laborbereich benutzt. Außerdem gibt es Ausführungen von Glasflaschen, die als Infusionsbehälter in Krankenhäusern verwendet werden. In ihnen kann man außerdem Medikamente oder Kosmetika aufbewahren. [62] [63]

Die PET-Flasche stellt eine Alternative zur Glasflasche dar, insbesondere im Lebensmittelbereich. In PET-Flaschen lassen sich ebenso wie in Glasflaschen Produkte wie z.B. Marmeladen, Saucen, Milchprodukte, sterile Babynahrung oder Ketchup abfüllen, siehe Abbildung 23.



**Abbildung 23 PET- und Glasketchupflaschen**

Ein direkter Vergleich beider Verpackungsarten zeigt auf, dass jede ihre Vor- und Nachteile hat: Glasflaschen sind durchsichtig. Man kann somit von außen das verpackte Produkt betrachten und den Haltbarkeitszustand einschätzen. Glasflaschen sind außerdem gasdicht, wodurch es möglich ist, kohlenstoffhaltige Getränke einzufüllen. Sie sind zudem chemisch inert, was bedeutet, dass das Glas keine Wechselwirkung mit dem Füllgut eingeht und z.B. ein Getränk sich geschmacklich nicht verändert. [63] Glasflaschen besitzen außerdem keine gefährlichen Zusätze, wodurch mit keiner Gefährdung für die Gesundheit des Verbrauchers zu rechnen ist. Sie sind hinsichtlich der Wiederverwertbarkeit sehr effizient. So lassen sie sich etwa 50-mal wiederbefüllen, bevor sie recycelt werden müssen. [64] Durch die hohe Wiederbefüllbarkeit besitzen Glasflaschen laut Umweltbundesamt, das sich auf die Studie „Einweg und Mehrweg: Aktuelle Ökobilanzen im Blickpunkt“ des

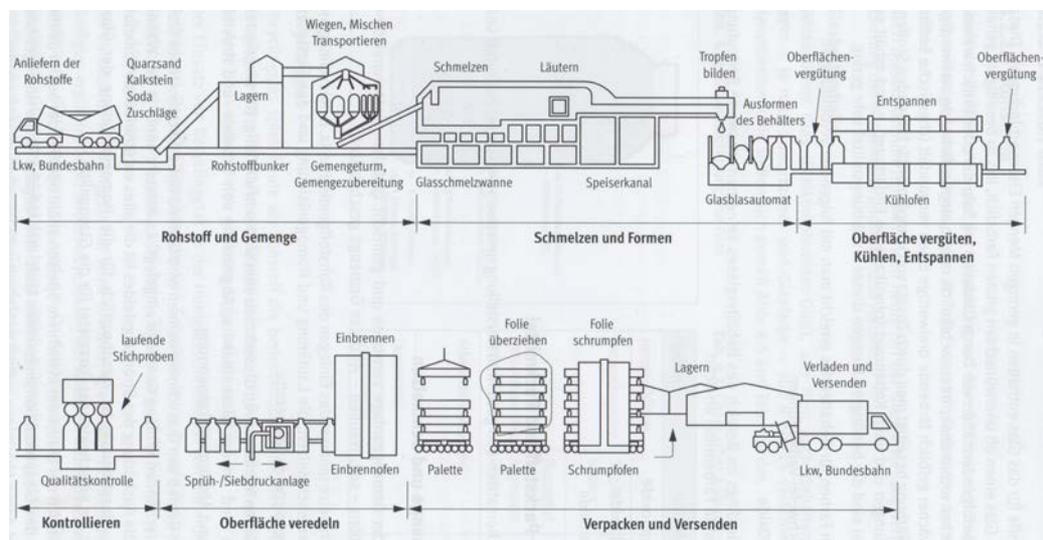
IFEU Instituts (Heidelberg) bezieht, folgende Vorteile: Einsparung von Rohstoffen, Reduktion der Abfälle und Reduktion der bei der Produktion entstehenden Treibhausgase. [65] Obwohl die Glasflasche viele Vorteile besitzt, gibt es auch einige bedeutende Nachteile. Glasflaschen zerspringen leicht, wenn sie auf etwas Hartes fallen oder stoßen. Außerdem haben sie ein sehr hohes Gewicht. Im Vergleich zu PET-Flaschen können daher weniger Glasflaschen auf einmal transportiert werden. [1]

Die PET-Flasche hat gegenüber der Glasflasche einige Vorteile. Sie kann genau wie die Glasflasche transparent sein und ebenso geschmacksneutral, ist dabei aber stabil und bruchfest. Der wichtigste Vorteil ist das geringe Gewicht der PET-Flasche, was vor allem für den Transport von Bedeutung ist. Neben den Vorteilen hat sie auch einige Nachteile. Die PET-Flasche kann maximal 25-mal wiederverwendet werden, also nur halb so oft wie die Glasflasche. [64] Außerdem werden bei jeder Wiederaufbereitung die Kunststoffmoleküle beschädigt, was dazu führt, dass nur etwa die Hälfte des recycelten PET wieder für neue PET-Flaschen geeignet ist. Die andere Hälfte muss durch fabrikneues PET ersetzt werden, wodurch Erdöl verbraucht wird. [64] Außerdem wird PET für manche Verwendungsfälle mit sogenannten Scavengers oder Blends modifiziert, die die Inhaltsstoffe des Füllguts z.B. vor schädlichen Lichteinflüssen schützen sollen. Granulat aus diesen PET-Flaschen führt bei der Herstellung neuer Produkte zu einer gelben Verfärbung. Es eignet sich daher in der Wiederverwendung nur für Textilfasern. Alternativ kann es verbrannt werden. [64] Ein weiterer Nachteil ist der erhöhte Verbrauch des endlichen Rohstoffs Erdöl bei der Herstellung von PET-Flaschen. Dies muss in Bezug gesetzt werden zum geringeren Erdölbedarf beim Transport der im Vergleich zu Glasflaschen leichteren PET-Flaschen: Bei einer Untersuchung wurde festgestellt, dass PET-Flaschen ca. 0,7 Kilogramm weniger Erdöl auf 1000 Liter abgefülltes Wasser beim Transport verbrauchen. Diese Bilanz hängt aber stark von der Entfernung zwischen Abfüller und Quelle ab. Ist diese gering, ist die Glasflasche ökologisch gesehen besser. [64]

## Material und Herstellung

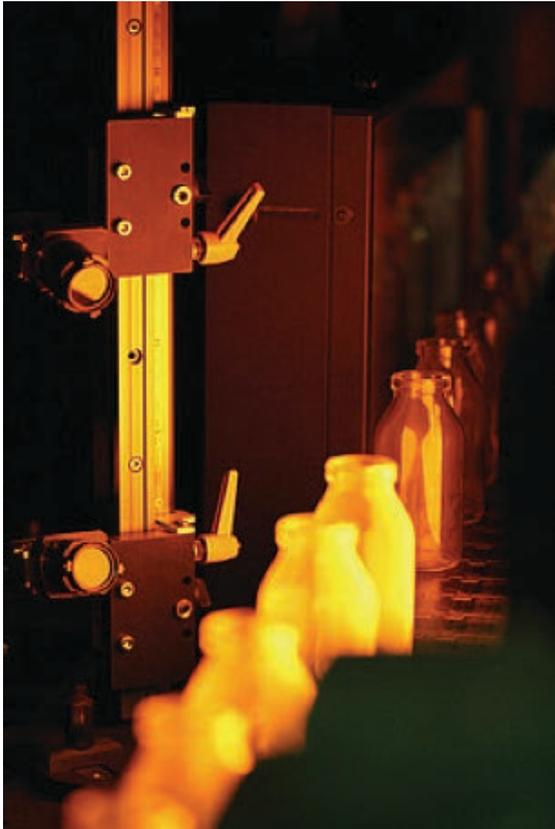
Glas besteht aus Quarzsand ( $\text{SiO}_2$ ), Soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), Kalk ( $\text{CaCO}_3$ ) und geringen Anteilen an Dolomit, Feldspat und Pottasche. Um die Eigenschaften und Herstellungsbedingungen optimieren zu können, werden noch weitere Bestandteile wie Aluminiumoxid, Magnesiumoxid und Kaliumoxid hinzugefügt. [66]

Die Herstellung der Behältergläser erfolgt in mehreren Schritten und ist in Abbildung 24 dargestellt.



**Abbildung 24** Ablauf der Glasflaschenherstellung [1]

Im ersten Schritt wird das Gemenge in einem Mischer gleichmäßig vermischt. Das Material wird über ein Fließband oder in Kübeln zu einer Glasschmelzwanne transportiert. Hier werden die einzelnen Bestandteile auf eine Temperatur von  $1200^\circ\text{C}$  aufgeheizt. Bei dieser Hitze entsteht aus Natriumoxid, Calciumoxid und Siliziumdioxid die Glasschmelze. Die Gläser werden anschließend im Floatverfahren geformt, welches der Herstellung von Flachgläsern dient. Sollen Behältergläser hergestellt werden, kommt die Individual Selection (IS)-Maschine zum Einsatz. Nach dem Formen des Glases muss es nur noch abgekühlt werden (Abbildung 25). Die durchschnittliche Abkühlzeit beträgt je nach Glasart 30 bis 100 Minuten.



**Abbildung 25 Glasflaschen in der Fertigung beim Abkühlen [66]**

Der letzte Schritt beinhaltet die Qualitätskontrolle. Schadhafte Gläser werden aussortiert und wieder eingeschmolzen. Die Flaschen werden außerdem, falls gewünscht, besprüht, bedruckt, mattiert oder etikettiert. [66]

Ketchupflaschen aus PET, PP oder PE werden durch Spritzgieß- und Streckblasverfahren hergestellt. Oftmals wird das sogenannte Spritzblasverfahren bevorzugt, bei dem die PET-Flaschen in nur einem Arbeitsvorgang hergestellt werden. Der Getränkehersteller füllt anschließend die fertigen PET-Flaschen in seinem Betrieb ab. Alternativ werden zuerst PET-Rohlinge in einem kunststoffverarbeitenden Betrieb hergestellt. Anschließend werden diese dann an den Abfüllbetrieb geschickt, wo die PET-Flaschen in einer Streckblasmaschine befüllt werden. Beide Verfahrensschritte sind voneinander unabhängig, was eine Flexibilität in der Auswahl an Rohlingstypen zulässt. Außerdem sind die Transportkosten, die auf dem Weg zwischen Hersteller und Abfüllbetrieb anfallen, geringer, weil die PET-Rohlinge leichter

als fertige PET-Flaschen sind. Die genannten Verfahren kommen auch bei der PP- und PE-Flaschenherstellung zur Anwendung. [67]

### **Verwertung von Glasketchupflaschen**

Die Glasflasche gibt es als Einweg- und Mehrwegprodukt. Beim Mehrwegsystem wird sie zurück zum Hersteller gebracht, dort gewaschen und neu befüllt. Bei Einwegflaschen ist der Verwertungsweg komplexer. Zuerst wird das Altglas nach Bunt- und Weißglas getrennt und anschließend mittels Förderband zur ersten Sortierstation befördert. [68] Ein Magnetabscheider entzieht dem Altglas eisenhaltige Fremdstoffe und sortiert diese aus. Die größeren Fremdstoffe werden durch Mitarbeiter manuell aussortiert. Sobald alle Fremdstoffe aus dem Altglasstrom entfernt wurden, wird das Altglas im Brecher in Vorbereitung auf den Schmelzvorgang auf eine Größe von 15 mm zerkleinert. [68] Auf der Lochsiebrinne wird das zerkleinerte Altglas weiter separiert. Sehr feinkörniges Altglas fällt durch das Sieb, während die größeren Stücke weiter zum zweiten Magnetabscheider transportiert werden. Vor der Lochsiebrinne werden sehr leichte Fremdstoffe abgesaugt. Im nächsten Schritt werden Fremdstoffe wie Keramik oder Aluminium durch ihre Lichtundurchlässigkeit optisch erkannt und aussortiert. Jetzt kann bei Bedarf das Altglas noch einmal manuell nachsortiert werden. Der letzte eisenhaltige Fremdanteil wird über einen dritten Magnetabscheider entfernt. Nachdem die Altglasscherben überprüft wurden, dienen sie als Sekundärrohstoff für andere Glasverpackungen. [68] Der Anteil an Sekundärrohstoff in der Glashütte liegt zwischen 60 % und 90 %. [69] Da gebrauchte Glasverpackungen eingeschmolzen und zu neuen Glasverpackungen geformt werden, ist dies eine Form von "Bottle-to-Bottle-Recycling". Der Anteil an Fremdstoffen muss dafür sehr gering gehalten werden. [69]

### **Verwertung von PET**

Es gibt zwei verschiedene Arten der PET-Verwertung: die Closed-Loop- und die Open-Loop-Verwertung. Die Closed-Loop-Verwertung ist detailliert im Buch "Recycling und Rohstoffe"; Bd. 3 beschrieben und wird hier kurz zusammengefasst. [70]

Die Verwertung von PET-Flaschen im Closed-Loop-Verfahren beginnt mit der Sortierung. Die PET-Flaschen stammen in der Regel aus einem Pfandrücknahmesystem. Sie werden in gepresster Form in Ballen oder in loser Form zu einer Aufbereitungsanlage transportiert. Dort werden zuerst die Metallumreifungsbänder der Ballen entfernt. Ballenaufreißer vereinzeln die PET-Flaschen. Dabei werden auch den Flaschen anhaftende Etiketten teilweise abgelöst. Reste der Umreifungsbänder und fehlsortierte Blechdosen werden mithilfe eines Trommelmagnetes separiert. Im Paddelsichter erfolgt die Ablösung großflächiger Etiketten und Folien. Anschließend gelangt das PET auf ein Förderband. Hier werden mittels spezieller Sensoren, welche hochfrequente elektromagnetische Signale aussenden, Nichteisenmetalle erkannt und durch Druckluftdüsen aussortiert. Dabei werden kleinere Metallverunreinigungen vernachlässigt, um den Verlust an PET gering zu halten. Im nachfolgenden Schritt werden Fremdkunststoffe (z.B. PLA oder PVC) mittels NIR-Spektroskopie abgeschieden. Im letzten Schritt der Vorsortierung erfolgt die Trennung der Flaschen nach ihrer Farbe durch ein CCD-Kamerasystem.

Nach der Vorsortierung werden die PET-Flaschen zu Flakes zerkleinert. Im Anschluss werden die PET-Flakes in einer Heißwäsche von anhaftenden Etiketten bzw. Restklebstoffen befreit. Im weiteren Verlauf kommt es im Schwimm-Sink-Verfahren zur Trennung des PET von den leichteren Kappen aus Polyolefin und den gelösten Etiketten. Auf einer Vibrationsrinne werden die PET-Flakes anschließend vereinzelt. Das zerkleinerte PET wird mithilfe weiterer Hochfrequenzsensoren von den übrig gebliebenen Metallverunreinigungen befreit.

Ziel der Verwertung der Flakes im Closed-Loop-Verfahren ist es, diese so aufzubereiten, dass sie sich wieder für die Herstellung von Lebensmittelverpackungen eignen. Hierfür kommt z.B. das amerikanische URRC-Verfahren oder das Verfahren des deutschen Herstellers Krone zum Einsatz. Dabei werden die Flakes erhitzt und mechanisch aufgearbeitet. Damit werden in der Deckschicht eingeschlossene Fremdstoffe herausgelöst und Bakterien abgetötet. Anschließend werden fehlfarbene und mit Kleber behaftete

Flakes in der Farbsortierung separiert. Gleichzeitig werden hierbei die Flakes nach der Farbe sortiert (Umsatz: 180 Millionen Flakes pro Stunde). Aufgrund von Farbänderungen durch die Hitzeeinwirkung können so auch noch verbliebene Fremdkunststoffe erkannt und aussortiert werden. Die Flakes sind jetzt in einem Zustand, in welchem sie in speziellen Extrudern zu Pellets verarbeitet werden können. Diese können zu neuen Flaschenpreforms verarbeitet werden (Bottle-to-Bottle-Recycling). Durch den Einsatz von recyceltem PET können 65 % der Energie, die für die Herstellung neuer PET-Produkte benötigt würde, eingespart werden. [53]

Es gibt neben dem Closed-Loop-Recycling auch das Open-Loop-Recycling von PET-Flaschen. Letzteres ist das für PET-Ketschupflaschen relevante Verfahren, da für diese Flaschen keine Pfandpflicht gilt und sie über ein duales System entsorgt werden. Prinzipiell verläuft die Aufbereitung des PET in beiden Recyclingsystemen ähnlich. Allerdings darf PET aus dem Open-Loop-Recycling nicht im Lebensmittelbereich eingesetzt werden. Es ist also hier kein Bottle-to-Bottle-Recycling möglich. Die Gründe dafür sind der höhere Verunreinigungsgrad sowie die größere Vielfalt der PET-Flaschen aus der Sammlung dualer Systeme. [71] Stattdessen wird PET-Regranulat aus dem Open-Loop-Recycling z.B. zur Herstellung von Textilprodukten eingesetzt. Für PET-Flakes aus der Sammlung dualer Systeme besteht ein höherer Sortier- und Reinigungsaufwand. Zudem sind die erzielten Erlöse auf dem Sekundärrohstoffmarkt relativ klein im Vergleich zu PET-Flakes aus den Pfandrücknahmesystemen. Daher ist das Erlöspotenzial für PET aus dem Open-Loop-Recycling vergleichsweise gering. [71]

### **Massenbilanz der Verwertung von Glasketschupflaschen**

Im Folgenden wird die Verwertungsquote von Glasketschupflaschen berechnet. Diese wird im nächsten Abschnitt mit der Verwertungsquote von PET-Ketschupflaschen verglichen. So soll ermittelt werden, wie sich die Wahl des Materials auf die Verwertbarkeit der Ketschupflasche auswirkt.

Jährlich fallen 2.807.100 Tonnen Altglas an. [72] Beim Recycling des Altglases treten die ersten Verluste bei der Abscheidung von eisenhaltigem Fremdanteil

auf, siehe Abbildung 26. Sie liegen bei ca. 3 %, weil ein Teil des aussortierten Metalls fest mit Glas verbunden ist.

$$\text{Verluste bei der Magnetabscheidung} = 2.807.100 \text{ t} * 0,03 = 84.213 \text{ t}$$

$$\text{neuer Glas – Massenstrom} = 2.807.100 \text{ t} - 84.213 \text{ t} = 2.722.887 \text{ t}$$

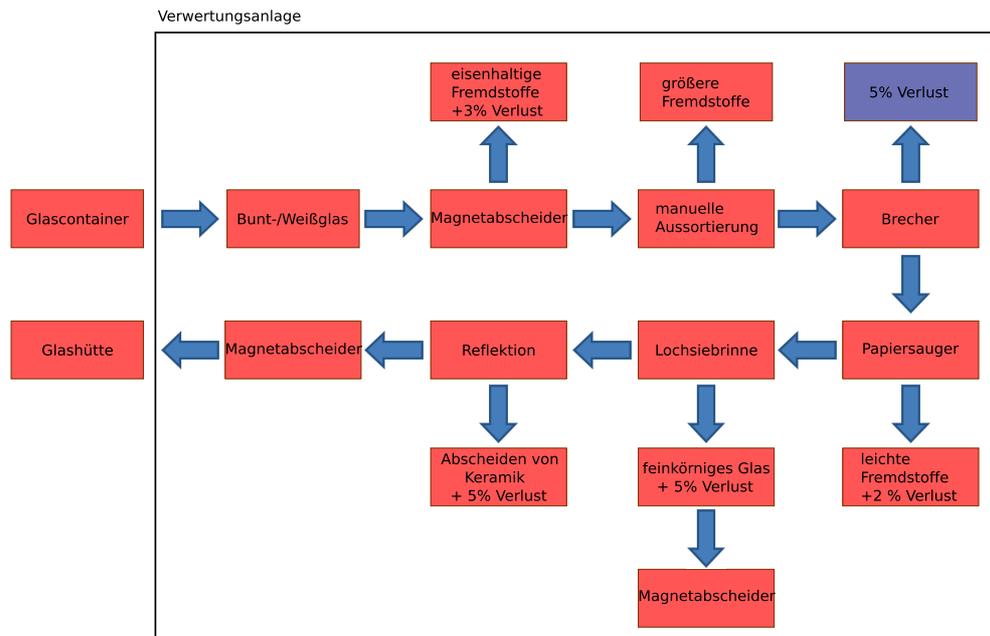


Abbildung 26 Fließdiagramm zur Verwertung von Altglas

Beim Brechen des Glases kann es passieren, dass Glassplitter neben das Förderband fallen und somit verloren gehen. Hier werden die Verluste auf etwa 5 % geschätzt.

$$\text{Verluste beim Brechen} = 2.722.887 \text{ t} * 0,05 = 136.144 \text{ t}$$

$$\text{neuer Glas – Massenstrom} = 2.722.887 \text{ t} - 136.144 \text{ t} = 2.586.742 \text{ t}$$

Der Papiersauger entfernt im nächsten Arbeitsschritt die leichteren Fremdstoffe. Dabei tritt ein Verlust an Altglas in Höhe von geschätzt 2 % auf, weil ein Teil der Glassplitter mit angesaugt wird.

$$\text{Verluste beim Papiersauger} = 2.586.742 \text{ t} * 0,02 = 51.734 \text{ t}$$

$$\text{neuer Glas – Massenstrom} = 2.586.742 \text{ t} - 51.734 \text{ t} = 2.535.008 \text{ t}$$

Im nächsten Schritt wird über eine Lochsiebrinne feinkörniges Glas abgeschieden und einem zweiten Magnetabscheider zugeführt. Hierbei ist mit Verlusten von ca. 5 % zu rechnen.

$$\text{Verluste bei der Lochsiebrinne} = 2.535.008 \text{ t} * 0,05 = 129.337 \text{ t}$$

$$\text{neuer Glas – Massenstrom} = 2.535.008 \text{ t} - 129.337 \text{ t} = 2.405.671 \text{ t}$$

Der letzte Arbeitsschritt beinhaltet das optische Abscheiden von Keramik und Aluminium durch Lichttransmissionsmessungen. Dabei können fälschlicherweise auch Altglasscherben abgeschieden werden. Der Verlust beträgt schätzungsweise 5 %. Anschließend passiert das Altglas einen dritten Magnetabscheider, wobei jedoch nur vernachlässigbar kleine Verluste auftreten.

$$\text{Verluste durch optischen Sortierer} = 2.405.671 \text{ t} * 0,05 = 126.750 \text{ t}$$

$$\text{neuer Glas – Massenstrom} = 2.405.670 \text{ t} - 126.750 \text{ t} = 2.278.920 \text{ t}$$

Aus 2.807.100 Tonnen Altglas können nach Abzug der Verluste 2.278.920 Tonnen zurückgewonnen werden. Die Verwertungsquote für Altglas beträgt demnach 81,2 %. Diese liegt deutlich über der gesetzlich vorgeschriebenen Mindestverwertungsquote von 75 %.

### **Massenbilanz der Verwertung von PET-Ketschupflaschen**

In diesem Abschnitt wird die Verwertungsquote von PET-Ketschupflaschen berechnet und mit der zuvor berechneten Verwertungsquote von Glasketschupflaschen verglichen.

Jährlich werden 70.000 Tonnen PET-Verpackungen über ein duales System gesammelt. [73] Die PET-Verpackungen gelangen von den Sortieranlagen in Form von Ballen zu den Verwertungsanlagen, wo die Ballen aufgerissen werden. Dabei entstehen Verluste in Höhe von geschätzt 3 %, da einige der PET-Verpackungen neben das Förderband fallen.

$$\text{Verluste beim Ballenaufreißer} = 70.000 \text{ t} * 0,03 = 2.100 \text{ t}$$

$$\text{neuer PET – Massenstrom} = 70.000 \text{ t} - 2.100 \text{ t} = 67.900 \text{ t}$$

Die nächsten Verluste treten beim Trommelmagneten auf. Hier wird wieder mit geschätzten Verlusten in Höhe von 3 % gerechnet, weil unbeabsichtigt auch PET-Flaschen mit Metalleinschlüssen abgeschieden werden.

$$\text{Verluste beim Trommelmagnet} = 76.900 \text{ t} * 0,03 = 2.037 \text{ t}$$

$$\text{neuer PET – Massenstrom} = 76.900 \text{ t} - 2037 \text{ t} = 65.863 \text{ t}$$

Im Paddelsichter erfolgt die Ablösung großflächiger Etiketten und Folien. Die Verluste, die hier auftreten können, werden auf 3 % geschätzt.

$$\text{Verluste beim Paddelsichter} = 65.863 \text{ t} * 0,03 \text{ t} = 1.976 \text{ t}$$

$$\text{neuer PET – Massenstrom} = 65.863 \text{ t} - 1976 \text{ t} = 63.887$$

Auf einem Sortierband werden die Nichteisenmetalle aussortiert. Hier können Verluste in Höhe von geschätzt 3 % erwartet werden, da auch hier wieder fälschlicherweise PET-Flaschen mit Metalleinschlüssen aus dem Sortierprozess entnommen werden können.

$$\text{Verluste auf dem Sortierband} = 63.887 * 0,03 = 1.917 \text{ t}$$

$$\text{neuer PET – Massenstrom} = 63.887 \text{ t} - 1.917 = 61.971 \text{ t}$$

Die Fremdkunststoffe werden mittels NIR-Spektroskopie abgeschieden. Hierbei gehen schätzungsweise 2 % des PET aufgrund von Fehldetektionen verloren.

$$\text{Verluste bei der NIR – Sortierung} = 63.887 \text{ t} * 0,02 = 1.239 \text{ t}$$

$$\text{neuer PET – Massenstrom} = 63.887 \text{ t} - 1.239 \text{ t} = 60.731 \text{ t}$$

Bei der Zerkleinerung der Flaschen können geschätzt 5 % der Flakes verloren gehen.

$$\text{Verluste beim Schreddern} = 60.731 \text{ t} * 0,05 = 3037 \text{ t}$$

$$\text{neuer PET – Massenstrom} = 60.731 \text{ t} - 3037 \text{ t} = 57.695 \text{ t}$$

Die PET-Flakes werden in einer Heißwäsche von anhaftenden Etiketten bzw. Restklebstoffen befreit. PET-Flakes, bei denen die Etiketten nicht abgelöst werden konnten, können zusammen mit den gelösten Etiketten abgeschieden werden. Hierbei betragen die PET-Verluste geschätzt 3 %.

$$\text{Verluste bei der Heißwäsche} = 57.695 \text{ t} * 0,03 = 1731 \text{ t}$$

$$\text{neuer PET – Massenstrom} = 57.695 \text{ t} - 1.731 \text{ t} = 55.964 \text{ t}$$

Im weiteren Verlauf der Verwertung werden die PET-Flakes über ein Sortierband geleitet, um restliche Metallverunreinigungen zu entfernen. Auch hierbei werden PET-Flakes zusammen mit dem Metallanteil abgeschieden. Es wird mit geschätzten Verlusten in Höhe von 3 % gerechnet.

$$\text{Verluste auf dem Sortierband} = 55.964 \text{ t} * 0,03 = 1679 \text{ t}$$

$$\text{neuer PET – Massenstrom} = 55.964 \text{ t} - 1679 \text{ t} = 54.285 \text{ t}$$

Die PET-Flakes werden erhitzt und mechanisch bearbeitet, um Fremdstoffe in der Deckschicht abzuscheiden. Bei diesem Vorgang treten schätzungsweise Verluste in Höhe von 2 % auf.

*Verluste beim Erhitzen und mechanischen Aufarbeiten*

$$= 54.285 \text{ t} * 0,02 = 1086 \text{ t}$$

$$\text{neuer PET – Massenstrom} = 54.285 \text{ t} - 1086 \text{ t} = 53.199 \text{ t}$$

Im letzten Schritt werden die PET-Flakes im Extruder zu Regranulat gepresst. Hier können durch Anhaften des erhitzten PET Verluste von geschätzt 3 % auftreten.

$$\text{Verluste im Extruder} = 53.199 \text{ t} * 0,03 = 1596 \text{ t}$$

$$\text{neuer PET – Massenstrom} = 53.199 \text{ t} - 1596 \text{ t} = 51.603 \text{ t}$$

Von 70.000 Tonnen PET können somit 51.603 Tonnen PET recycelt werden. Das ergibt eine Verwertungsquote von 73,7 %. Diese liegt deutlich über der gesetzlichen Mindestverwertungsquote für Kunststoffverpackungen von 60 %. Allerdings ist die Verwertungsquote von Glasflaschen ca. 7,5 % höher, als die der PET-Flaschen. Bei der Verwertung von PET-Flaschen wird zur Sortierung der Kunststoffe die NIR-Technologie eingesetzt, jedoch nicht bei der Glasverwertung. Deswegen hängt die Verwertbarkeit der PET-Ketchupflaschen z.B. auch von der farblichen Gestaltung ab. Die Verwertungsquote kann daher z.B. bei schwarzen Flaschen weit unter der hier

berechneten liegen. Dies zeigt, dass das Material und die Gestaltung der Ketchupflasche einen großen Einfluss auf ihre Verwertbarkeit haben.

### 3.4. Auswertung

Um den Einfluss von Gestaltung und Aufbau einer Verpackung auf ihre Verwertbarkeit quantifizieren zu können, wurden in den vorherigen Kapiteln Verwertungsquoten von drei verschiedenen Verpackungssystemen berechnet. Anhand des ersten Verpackungssystems, der Getränkekartonage, wurde beispielhaft untersucht, wie sich zusätzliche Gestaltungselemente bei ansonsten gleichem Design auf die Verwertbarkeit auswirken können. Die Untersuchung des zweiten Verpackungssystems PP-Joghurtbecher zeigt beispielhaft, wie eine Umhüllung aus einem anderen Material die Verwertbarkeit beeinflusst. Beim dritten Verpackungssystem, der Ketchupflasche, wurde untersucht, welchen Einfluss die Wahl des Verpackungsmaterials auf die Verwertbarkeit hat. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen werden im Folgenden zusammengefasst.

Aus den Bilanzrechnungen der Verwertung von Getränkekartonagen ergaben sich eine Verwertungsquote von 51,3 % für den Getränkekarton mit zusätzlichem Kunststoffausguss und eine Verwertungsquote von 55,8 % für den Getränkekarton ohne Ausguss. So wurden von jährlich 145.00 Tonnen 74.362 Tonnen bzw. 80.922 Tonnen Getränkekartonage-Abfall werkstofflich verwertet. Dabei wird nur der Zellstoff des Getränkekartons recycelt. Der PP-/PE-/Aluminiumanteil wird nicht werkstofflich verwertet, sondern dient z.B. als Substitutionsstoff für Bauxit in Zementwerken. Das hat zur Folge, dass die Verwertungsquote von Getränkekartons mit Ausguss nur ca. 92 % der Verwertungsquote von Getränkekartons ohne Ausguss beträgt. Dies zeigt, wie eine relativ kleine Designänderung in Form eines zusätzlichen Kunststoffelements die Verwertbarkeit einer Verpackung deutlich verringern kann. Die Verwertungsquote beider Verpackungstypen unterschreitet außerdem die gesetzlich vorgeschriebene Mindestverwertungsquote von 60 %. Betrachtet man hingegen nur den Zellstoffanteil des Getränkekartons, so werden davon ca. 74 % werkstofflich verwertet. Die geringe Verwertungsquote des Getränkekartons wird also durch den relativ hohen Anteil an Kunststoff und Aluminium bedingt. Im Sinne einer besseren Verwertbarkeit sollte dieser Anteil möglichst gering gehalten werden.

Bei der Untersuchung verschiedener Typen von PP-Joghurtbechern wurde festgestellt, dass sich eine Umhüllung der Becher mit einer Papierbanderole ungünstig auf ihre Verwertung auswirkt. In der Sortieranlage werden PP-Joghurtbecher mit Papierbanderole nur ungefähr zur Hälfte als Kunststoff erkannt. Die Verwertungsquote der PP-Joghurtbecher verringert sich durch die Papierbanderole somit von 60 % auf 30 %. In absoluten Zahlen ausgedrückt, werden von 210.000 Tonnen Joghurtbechern anstelle von 125.963 Tonnen nur 62.981 Tonnen recycelt. Das vermindert die Einnahmen der Recyclingbetriebe und verschlechtert die ökologische Bilanz dieses Verpackungssystems. Undurchsichtige Umhüllungen aus einem anderen Material erschweren also das Recycling von Kunststoffverpackungen, da NIR-Sortiereinheiten den Kunststoff so nicht korrekt identifizieren können. Daher ist es wünschenswert, dass Verbraucher, die Joghurtbecher mit Papierbanderole kaufen, die Papierbanderolen und die PP-Becher getrennt entsorgen. Ebenfalls problematisch in ihrer werkstofflichen Verwertung sind Joghurtbecher aus dem biologischen Kunststoff PLA. Sie werden in Sortieranlagen kaum detektiert und folglich nicht ordnungsgemäß verwertet. Stattdessen fallen sie zu 80 % als Sortierrest in der Sortieranlage an. Die übrigen PLA-Joghurtbecher werden der Papier/Pappe/Karton-Fraktion zugeordnet und werkstofflich verwertet, oder zusammen mit den PLA-Bechern aus den Sortierresten in Zementwerken energetisch verwertet. Somit wird der größte Teil der PLA-Joghurtbecher energetisch verwertet. Dies widerspricht nicht den gesetzlichen Bestimmungen, da gemäß § 6 Anhang I.1 Abs. 3 der Verpackungsverordnung bei Verpackungen aus nachwachsenden Rohstoffen die energetische Verwertung der stofflichen gleichgestellt ist. Insgesamt haben sich hinsichtlich der Verwertbarkeit von allen drei untersuchten Joghurtbecherarten bedruckte PP-Becher als am geeignetsten erwiesen, da sie in den Sortieranlagen zuverlässig identifiziert werden. Sie erfüllen knapp die gesetzliche Mindestverwertungsquote von 60 %.

Für das Verpackungssystem Ketchupflasche wurden die Materialvarianten Glas und PET hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit untersucht und miteinander verglichen. In beiden Fällen ergaben sich vergleichsweise hohe Verwertungsquoten von 81 % (Glas) bzw. 74 % (PET), die deutlich über den

gesetzlichen Mindestverwertungsquoten von 75 % bzw. 60 % liegen. So können aus 2.807.100 Tonnen Altglas 2.278.920 Tonnen recycelt werden. Von 70.000 Tonnen PET können 51.603 Tonnen werkstofflich verwertet werden. Allerdings wird bei der Verwertung von PET-Flaschen NIR-Technologie zur Kunststoffsortierung eingesetzt. Deswegen hängt die Verwertungsquote der PET-Ketschupflaschen z.B. auch von der farblichen Gestaltung ab. Die Verwertungsquote könnte z.B. bei schwarzen Flaschen weit unter der berechneten liegen. Im Gegensatz dazu ist die Verwertung der Glasketschupflaschen von der NIR-Technik unabhängig, wenngleich auch hier ein optisches Sortierverfahren zur Abscheidung von Fremdstoffen eingesetzt wird. Dies zeigt, dass sowohl das Material als auch die Gestaltung der Ketschupflasche einen großen Einfluss auf ihre Verwertbarkeit haben.

Die untersuchten Verpackungssysteme sind zwar hinsichtlich ihrer Materialien und Verwendungszwecke sehr unterschiedlich, lassen sich aber in ihrer Verwertbarkeit miteinander vergleichen. Glasverpackungen weisen die höchste Verwertungsquote auf, gefolgt von der PET-Flasche. An dritter Stelle steht der bedruckte PP-Joghurtbecher. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Verwertungsquoten.

<b>Verpackungssystem</b>	<b>Verwertungsquote</b>
Getränk karton ohne Ausguss	55,8 %
Getränk karton mit Ausguss	51,3 %
Bedruckter PP-Becher	60 %
PP-Becher mit Papierbanderole	30 %
Glasketschupflasche	81,2 %
PET-Ketschupflasche	73,7 %

Die Analyse der Verwertbarkeit der verschiedenen Leichtverpackungssysteme lässt sich teilweise verallgemeinern. Für die Sortierung von Leichtverpackungsmaterialien aus Kunststoff ist die NIR-Technologie von zentraler Bedeutung. Daraus können sich Nachteile für die Verwertung bestimmter Verpackungen ergeben. So besitzen z.B. Verpackungen, deren Oberflächen schwarz sind, ein hohes Lichtabsorptionsvermögen. Dadurch ist

das reflektierte Licht, das den Photodetektor einer NIR-Einheit erreicht, nur von geringer Intensität. Dies führt dazu, dass die Spektralanalyse nicht präzise durchgeführt werden kann. Ebenso problematisch sind lichtundurchlässige, umfassende Umhüllungen von Verpackungen, wie z.B. wasserfest verklebte Etiketten oder Banderolen. Die NIR-Technik identifiziert hier je nach Position der Probe ggf. nicht das Material der Verpackung, sondern das der Umhüllung. Die Verpackung wird folglich aussortiert oder einer falschen Abfallfraktion zugeordnet. Auch bei nichtwasserlöslichen Verunreinigungen von Kunststoffverpackungen wird die Transmission des NIR-Lichts blockiert, wodurch es zu Problemen bei der Identifizierung des Kunststoffs kommen kann.

Der beschriebene Zusammenhang zwischen der Detektionsrate der NIR-Einheit und der Verwertungsquote von Leichtverpackungen aus Kunststoff kann als allgemeine funktionale Abhängigkeit aufgefasst werden. Unter Berücksichtigung der Verlustfaktoren des Schredderns ( $V_{Sch}$ ), des Waschens und Trocknens ( $V_{WuT}$ ) und des Extrudierens ( $V_{Ext}$ ) ergibt sich folgende Abhängigkeit der Verwertungsquote  $Q_{KSV}$  von der Detektionsrate  $R_{NIR}$ :

$$Q_{KSV}(R_{NIR}) = R_{NIR} * (1 - V_{Sch}) * (1 - V_{WuT}) * (1 - V_{Ext}).$$

Dieser Zusammenhang ist in der folgenden Abbildung 27 für  $V_{Sch} = 0.03$ ,  $V_{WuT} = 0.25$  und  $V_{Ext} = 0.03$  als Funktionsgraf dargestellt.

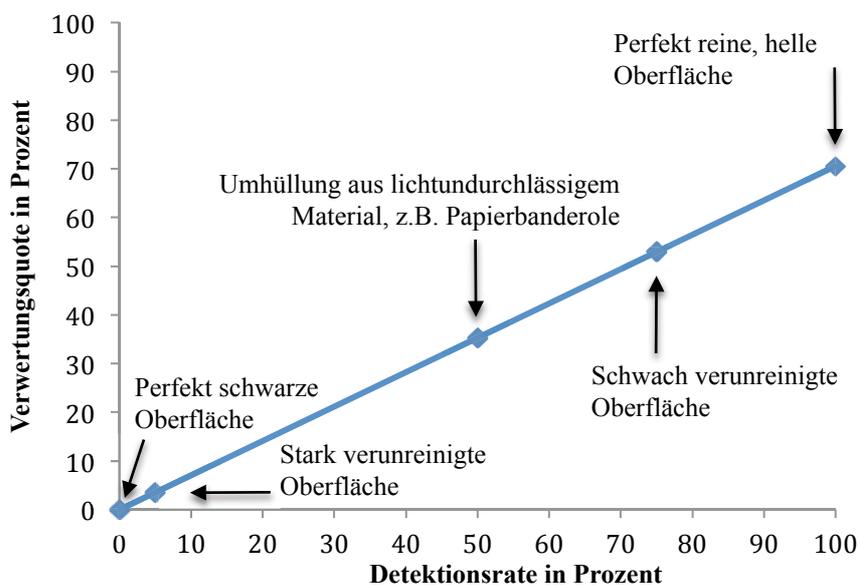


Abbildung 27 Abhängigkeit der Verwertungsquote von der NIR-Detektionsrate

## 4. Fazit und Ausblick

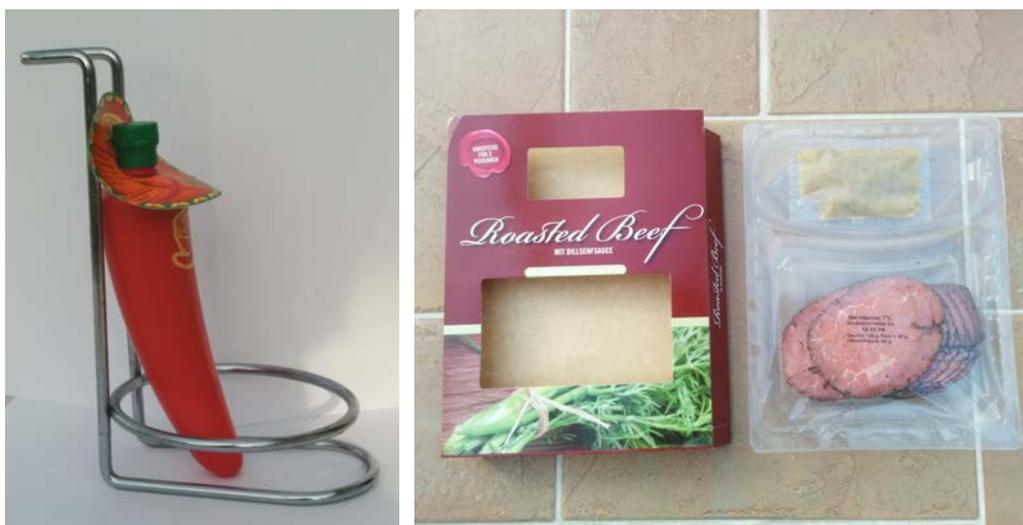
Moderne Verpackungen erfüllen viele anwendungsspezifische Anforderungen, wodurch z.B. Lebensmittel lange konserviert werden können. Zukünftig wird es durch den Einsatz intelligenter Materialien möglich sein, Verpackungsdesigns mit bisher unerreichter Funktionalität zu entwerfen. So werden z.B. optische Sensorfolien erforscht, die den Frischezustand verpackter Lebensmittel anzeigen können. [74] Dennoch sollte in Zukunft nicht nur die Funktionalität im Fokus der Verpackungsentwicklung stehen. Im Jahr 2012 betrug das Verpackungsaufkommen bereits 16,6 Mio. Tonnen. [75] Das sich daraus ergebende Abfallproblem kann nur durch ein verwertungsgerechtes Verpackungsdesign eingedämmt werden.

Die in dieser Arbeit erstellten Verwertungsbilanzierungen verschiedener Verpackungssysteme zeigen, dass im Allgemeinen komplexere Verpackungen schlechter durch die Recyclingsysteme verwertet werden. Die Glasflasche ist hier ein positives Beispiel: Durch ihren homogenen Aufbau aus einem robusten Material lässt sie sich effizient verwerten und häufig wiederverwenden. Der aseptische Getränkekarton hingegen wird aufgrund seines komplexeren Aufbaus wesentlich ineffizienter verwertet. Zusätzliche Gestaltungselemente aus Kunststoff reduzieren die Verwertungsquote weiter. Dies führte dazu, dass im Jahr 2011 gegen den Marktführer Tetra Pak eine Klage wegen irreführender Werbung eingereicht wurde: Tetra Pak bewarb seine Getränkekartonagen als vollständig recyclebar, obwohl moderne Getränkekartons die gesetzliche Mindestverwertungsquote von 60 % nicht mehr erfüllen. [76] Um die Verwertbarkeit des Getränkekartons zu steigern, könnte einerseits der Kunststoffanteil wieder gesenkt werden. Andererseits könnten technische Fortschritte in Bezug auf die bessere Verwertung des PP/PE/Aluminium-Anteils erreicht werden. Ein Vorreiter auf diesem Gebiet ist die Kunststoff AG (APK AG) in Merseburg. [35] Bereits seit 2010 werden hier die PE- und Aluminiumanteile voneinander getrennt, wodurch sie separat weiterverwertet werden können. Außerdem werden in Varkaus (Finnland) und Barcelona erste Pyrolyseanlage des Konzerns Stora Enso betrieben, in denen das PE/Aluminium-Gemisch aufbereitet werden kann.

Aber nicht nur der Aufbau, sondern auch die äußere Gestaltung einer Verpackung hat einen großen Einfluss auf ihre Verwertbarkeit. Bei Leichtverpackungen aus Kunststoff sollten Umhüllungen aus lichtundurchlässigen Materialien vermieden werden, da es sonst zu Fehldetektionen durch NIR-Einheiten in Sortieranlagen kommen kann. So ist es in dieser Hinsicht besser, anstatt eines großen Etiketts mehrere kleine auf die Verpackung zu kleben. Allerdings muss der dafür verwendete Leim gut löslich sein, um die Etiketten während des Recyclings wieder vom Kunststoff trennen zu können. Der Einsatz sehr dunkler Farben für Kunststoffverpackungen ist ebenfalls problematisch. Schwarze oder sehr dunkle Kunststoffe absorbieren das Licht der NIR-Quelle sehr stark und können so nicht zuverlässig sortiert werden.

Zusammenfassend haben sich insbesondere folgende Eigenschaften von Verpackungsdesigns als verwertungsfreundlich erwiesen: (i) ein einfacher Aufbau aus möglichst wenigen verschiedenen Materialien, (ii) eine leichte Trennbarkeit der einzelnen Komponenten der Verpackung, (iii) eine helle farbliche Gestaltung von Kunststoffverpackungen.

Neben der Anpassung von Verpackungsdesigns zugunsten einer besseren Verwertbarkeit stellt die Vermeidung von Verpackungsabfall einen zweiten Lösungsansatz für das Abfallproblem dar. Als erläuternde Beispiele werden in Abbildung 28 zwei Verpackungen gezeigt.



**Abbildung 28** Verpackung für Chilisoße (links) und Verpackung von Wurstwaren (rechts)

Die Verpackung einer Chilisoße (links) besteht aus einem einheitlichen Material, wodurch eine effiziente Verwertung möglich ist. Außerdem ist sie so gestaltet, dass möglichst wenig Material eingesetzt wird. Das zweite Bild (rechts) zeigt eine Roasted-Beef-Verpackung. Diese wurde so gestaltet, dass das Produkt von außen hochwertig erscheint. Bei der Herstellung der Verpackung wird jedoch viel Material benötigt, da die beigelegte Dillsensoße einzeln verpackt ist und neben der Kunststoffverpackung noch eine zusätzliche Verkaufsverpackung aus Papier vorhanden ist. Hier wurde also dem Marketing eine höhere Priorität eingeräumt als der Verwertbarkeit der Verpackung oder der Schonung von Rohstoffen. Ziel eines nachhaltigen Verpackungsdesigns sollte dagegen sein, Verpackungen so zu gestalten, dass sie möglichst ressourcenschonend hergestellt werden können.

Als weiterer Ansatz zur Schonung endlicher Rohstoffe wird der Einsatz biologischer Verpackungsmaterialien (z.B. PLA) diskutiert. Momentan stellt sich die werkstoffliche Verwertung dieser Kunststoffe jedoch noch als problematisch dar. Eine mögliche Lösung wäre die Entwicklung eines eigenen Sammelsystems für biologische Verpackungen. [77] Das Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackungen in Freising bei München forscht derzeit an besseren Verwertungswegen für PLA. [78] Das Ziel der Forschung ist hierbei, die übrigen Wert- und Reststofffraktionen vom PLA zu trennen. Hierzu wird versucht, reines PLA und die PLA-haltige Fraktion präziser durch NIR-Einheiten identifizieren zu lassen. Anschließend möchte man mit einem lösungsmittelbasierten Recycling Fremdpolymere (PLA-Blend) von den Nicht-Kunststoffen trennen, was auf mechanischem Wege nicht umsetzbar ist. Aus den gelösten PLA-Makromolekülen lassen sich nach einem vierstufigen Prozess hochwertige Polymerrezyklate herstellen, woraus mit gebräuchlichen Kunststoffverarbeitungsmaschinen neue Produkte erschaffen werden können. Neben der werkstofflichen ist auch die energetische Verwertung von PLA zugelassen, da PLA aus einem nachwachsenden Rohstoff, nämlich Mais, gewonnen wird. Bei der Verbrennung von PLA wird somit nur CO<sub>2</sub> freigesetzt wird, das zuvor von den Maispflanzen gebunden wurde. Dennoch ist auch der Einsatz von PLA mit ökologischen Risiken behaftet, z.B. durch eine intensive Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen für den Maisanbau. Dieses Beispiel zeigt, dass die Frage nach einem ökologisch vorteilhaften

Verpackungsdesign sehr vielschichtig ist, sowohl in Bezug auf die Verwertbarkeit als auch darüber hinaus.

## 5. Zusammenfassung

Verpackungen sind allgegenwärtig und erleichtern unser Leben in vielfacher Hinsicht. Der hohe Bedarf an Verpackungen führt jedoch zu einer großen Menge an Abfällen. Eine besonders umweltfreundliche Möglichkeit zur Beseitigung dieser Verpackungsabfälle ist das Recycling. Ziel des Recyclings ist es, die eingesetzten Rohstoffe zurückzugewinnen. Es lässt sich jedoch nicht jede Verpackung gleichermaßen gut wiederverwerten. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden verschiedene Verpackungssysteme hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit analysiert um zu ermitteln, wie stark sich das Verpackungsdesign auf die Verwertbarkeit auswirkt.

Verpackungsdesign steht in einem geschichtlichen, gesetzlichen und funktionellen Kontext. Fortschritte in der Materialforschung und die Entstehung moderner Herstellungstechnologien ermöglichen die Verwirklichung neuer Verpackungsdesigns. Richtlinien und Gesetze schaffen einen Rahmen, in dem Verpackungen frei gestaltet werden können. Wichtig sind in dieser Hinsicht die EU-Richtlinie 94/62/EG, das Kreislaufwirtschaftsgesetz und die Verpackungsverordnung. Bedeutend für die Verpackungsdesignproblematik waren vor allem die Einführung von Mindestverwertungsquoten und die Festschreibung des Verursacherprinzips. Dadurch wurden ökonomische Anreize geschaffen, umweltfreundlich zu verwertende Verpackungen zu entwickeln und einzusetzen. Natürlich bestimmen auch der Verwendungszweck und die Funktion einer Verpackung ihr Design. So existiert ein direkter Zusammenhang zwischen den produktspezifischen Eigenschaften und den Anforderungen an beispielsweise Material, Form oder Aufbau der Verpackung.

Das Design einer Verpackung steht in einem engen Bezug zu ihrer Verwertbarkeit. Um die Verwertbarkeit zu quantifizieren, wurden in dieser Bachelorarbeit Verwertungsquoten mithilfe von Massenbilanzrechnungen ermittelt. Dazu wurden die auftretenden Stoffströme betrachtet und bestimmt, wie viel Verpackungsmaterial durch die Recyclingprozesse zurückgewonnen werden kann. Aufgrund von Limitierungen der angewandten Sortiertechnologie sind die Recyclingverfahren für verschiedene Verpackungssysteme unterschiedlich effizient. So weist z.B. die bei der Kunststoffsortierung häufig eingesetzte NIR-Technologie bestimmte Einschränkungen auf. Bei Materialien

mit einem starken Absorptionsvermögen lässt sich die NIR-Technologie nicht zuverlässig anwenden. Außerdem können Kunststoffe mit einer beklebten oder stark verunreinigten Oberfläche nur schwer identifiziert werden, weil das von der NIR-Quelle ausgestrahlte Licht die Probe nicht erreicht.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden drei verschiedene Verpackungssysteme bezüglich ihrer Verwertbarkeit analysiert. Anhand des ersten Verpackungssystems „Getränk Kartonage“ wurde beispielhaft untersucht, wie sich zusätzliche Gestaltungselemente bei ansonsten gleichem Design auf die Verwertbarkeit auswirken können. Die Untersuchung des zweiten Verpackungssystems „PP-Joghurtbecher“ zeigt, wie eine Umhüllung aus einem anderen Material die Verwertbarkeit beeinflusst. Beim dritten Verpackungssystem „Ketchupflasche“ wurde untersucht, welchen Einfluss die Wahl des Verpackungsmaterials auf die Verwertbarkeit hat.

Aus der Bilanzrechnung der Verwertung von Getränkekartonagen ergaben sich eine Verwertungsquote von 51,3 % für den Getränkekarton mit zusätzlichem Kunststoffausguss und eine Verwertungsquote von 55,8 % für den Getränkekarton ohne Ausguss. Beide Verwertungsquoten unterschreiten die vom Gesetz geforderte Verwertungsquote von 60 %. Die Verwertungsquote von Getränkekartons mit Ausguss beträgt ca. 92 % der Verwertungsquote von Getränkekartons ohne Ausguss. Dies zeigt, wie sich eine relativ kleine Designänderung deutlich auf die Verwertbarkeit einer Verpackung auswirken kann. Im Sinne der Verwertbarkeit von Getränkekartons wäre es also vorteilhaft, auf zusätzliche Kunststoffelemente zu verzichten und den Kunststoffanteil möglichst gering zu halten.

Der Vergleich der Verwertungsquoten von PP-Joghurtbechern ohne und mit Papierbanderole ergab, dass die Verwendung von Materialverbunden die Verwertbarkeit von Verpackungen stark verringern kann. Die Berechnung der Massenbilanzen zeigte, dass bedruckte PP-Joghurtbecher eine doppelt so hohe Verwertungsquote (60 %) wie PP-Joghurtbecher mit einer Papierbanderole (30 %) aufweisen. Der Grund dafür ist, dass PP-Joghurtbecher mit einer Papierbanderole wegen Fehldetektionen von NIR-Sortierern nur zur Hälfte als Kunststoff erkannt werden.

Ein aus nachwachsenden Rohstoffen hergestelltes Verpackungsmaterial wie PLA kann sich ebenfalls negativ auf die werkstoffliche Verwertbarkeit auswirken. So werden PLA-Joghurtbecher nicht von den NIR-Sortiereinheiten erkannt. Stattdessen werden 20 % der PLA-Becher der Papierfraktion zugeordnet und anschließend zu einem großen Teil werkstofflich verwertet. Der übrige Anteil wird zusammen mit den Sortierresten abgeschieden und als Substitutionsstoff z.B. für Steinkohle in Zementwerken energetisch verwertet. Somit ist der werkstofflich verwertete Anteil von PLA sehr gering. Allerdings ist in diesem Fall die energetische Verwertung der werkstofflichen gesetzlich gleichgestellt.

Die Bilanzierung der Verwertung von Ketschupverpackungen ergab Verwertungsquoten in Höhe von 81,2 % für Glas- und 73,7 % für PET-Ketschupflaschen. Beide Verwertungsquoten liegen somit deutlich über den gesetzlich vorgeschriebenen Mindestverwertungsquoten von 75 % (Glas) und 60 % (PET). Allerdings ist die Verwertbarkeit der PET-Ketschupflasche von der Zuverlässigkeit der NIR-Sortiertechnik abhängig, und somit z.B. auch von der farblichen Gestaltung der PET-Flasche. Bei der Glasverwertung hingegen wird keine NIR-Technologie eingesetzt.

Der Zusammenhang zwischen Design und Verwertung von Leichtverpackungen aus Kunststoff wurde in einer verallgemeinerten Abhängigkeit dargestellt. Damit lässt sich die Verwertungsquote unter Berücksichtigung weiterer Verlustfaktoren des Recyclingprozesses als Funktion der Detektionsrate von NIR-Sortiereinheiten berechnen.

Die im Rahmen dieser Bachelorarbeit durchgeführten Analysen zeigen, dass sowohl der innere Aufbau als auch die äußere Gestalt einen starken Einfluss auf die Verwertbarkeit einer Verpackung haben. Die ermittelten Ergebnisse helfen zu verstehen, wie eine hinsichtlich der Verwertbarkeit vorteilhafte Verpackung beschaffen sein sollte.



## 6. Literaturverzeichnis

- 1 Kaßmann M. Grundlagen der Verpackung. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2011.
- 2 Krieg T. Verpackt und zugeklebt: Das Praxis-Handbuch für professionelles Verpacken. Dortmund: rokoko-Netzwerk für Kommunikation; 2004.
- 3 AP. Plastikmüll im Meer erstmals gezählt. [Internet]. 2014 [cited 2015 August 6.]. Available from: <http://images04.kurier.at/46-63211628.jpg/101.996.918>.
- 4 Zeter K. Planet Wissen. [Internet]. [cited 2015 August 4.]. Available from: <http://www.planet-wissen.de/technik/werkstoffe/verpackungen/pwwbverpackungen100.html>.
- 5 Krieger PDW. Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Verpackungsfunktionen. [Internet]. [cited 2015 August 4.]. Available from: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55210/verpackungsfunktionen-v7.html>.
- 6 Waldbauer M. Verpackungsabfälle im Hausmüll in der Europäischen Union und die Qualität ihrer Erfahrung mit Getrenntsammlensystemen am Beispiel der Staaten Deutschland und Frankreich. München: Oldenbourg Industrieverlag; 2005.
- 7 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). [Internet]. [cited 2015 August 4.]. Available from: <http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/abfallpolitik/kreislaufwirtschaft/eckpunkte-des-neuen-kreislaufwirtschaftsgesetzes/>.
- 8 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. [Internet]. [cited 2015 August 4.]. Available from: <http://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>.
- 9 Thomé-Kozmiensky KJ. Management der Kreislaufwirtschaft. Berlin: EF-

- Verlag für Energie- und Umwelttechnik; 1995.
- 10 Forster T, Knebelspieß S, Schindler R. 1974–2014: 40 Jahre Umweltbundesamt. Bonn: Umweltbundesamt; Mai 2014.
  - 11 Hartlep U, Souren R. Recycling von Einweggetränkeverpackungen in Deutschland: Gesetzliche Regelungen und Funktionsweise des implementierten Pfandsystems. [Internet]. Ilmenau: proWiWi e.V.; 2011 [cited 2015 August 4.]. Available from: [http://www.db-thueringen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-23503/IS-BWL\\_2011-02.pdf](http://www.db-thueringen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-23503/IS-BWL_2011-02.pdf).
  - 12 Benzler G, Halstrick-Schwenk M, Klemmer P, Löbke K. Wettbewerbskonformität von Rücknahmepflichten im Abfallbereich. Essen: Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung; 1995.
  - 13 Thomé-Kozmiensky S. Die Verpackungsverordnung - Rechtmäßigkeit, "Duales System", Europarecht. 1st ed. Berlin: Duncker & Humblot; April 1994.
  - 14 Velte R. Duale Abfallentsorgung und Kartellverbot. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft; 1999.
  - 15 de Bakker CP. Recycling von Verkaufsverpackungen: Das Duale System Deutschland im internationalen Systemvergleich und daraus resultierende Gestaltungsmodifikationen. Witten/Herdecke: Eigenverlag der Universität Witten/Herdecke; 1997.
  - 16 Thomé.Kozmiensky KJ. Abfallverminderung: duale Abfallwirtschaft und Kompostierung von Bioabfällen. Berlin: EF-Verlag für Energie-und Umwelttechnik GmbH; 1992.
  - 17 Finckh A. Regulierende Selbstregulierung im Dualen System. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft; 1998.
  - 18 Henselder-Ludwig R. Verpackungsverordnung 1998. Köln: Bundesanzeiger Verlag; 1999.
  - 19 Fachredaktion anwalt.de. MittelstandsWiki. [Internet]. 2014 [cited 2015 August 4.]. Available from:

- <http://www.mittelstandswiki.de/wissen/Verpackungsverordnung>.
- 20 Belland Vision. Was sind die Inhalte der Vollständigkeitserklärung? [Internet]. [cited 2015 September 23.]. Available from: <http://www.bellandvision.de/ve-inhalte.htm>.
- 21 Both G. Jenseits vom "Grünen Punkt": Alternativen zu Verpackungsordnung und Grünem Punkt. Darmstadt: Freiburg; 1995.
- 22 Philipp A. Duales System, Rücknahmepflichten und Pfandregelung: eine vergleichende Untersuchung unter besonderer Berücksichtigung des Einzelhandels. Mainz 1993.
- 23 Ewers HJ, Schatz M, Tegner H. Ein Markt für duale Systeme: Optionen für Wettbewerb und Effizienz in der Rücknahme von Verpackungen. Berlin Februar 2001.
- 24 Deutsche Bauchemie e.V. Verpackung und Entsorgung. [Internet]. 2015 [cited 2015 August 4.]. Available from: <http://www.deutsche-bauchemie.de/verpackung/verpackungsarten/uebersicht/>.
- 25 Schweizer Verpackung. Pack Know-how / Arten der Verpackung. [Internet]. [cited 2015 September 25]. Available from: [http://www.schweizer-verpackung.ch/html/arten\\_der\\_verpackung.html](http://www.schweizer-verpackung.ch/html/arten_der_verpackung.html).
- 26 Pfohl HC. Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 8th ed. Springer-Verlag; 2009.
- 27 dreamstime.com. [Internet]. [cited 2015 August 6.]. Available from: <http://thumbs.dreamstime.com/x/verpackungssymbole-359011.jpg>.
- 28 Chip. [Internet]. [cited 2015 August 6.]. Available from: <http://business.chip.de/bii/8/2/8/0/0/9/4/48f4a8a8720520e4.jpg>.
- 29 Wolters L. Kunststoff-Recycling: Grundlagen - Verfahren - Praxisbeispiele. München: Hanser Fachbuch; 1997.
- 30 Jungbauer A. Recycling von Kunststoffen. Würzburg: Vogel Fachbuch; 1994.
- 31 Nickel W, editor. Recycling-Handbuch: Strategien. Technologien.

- Produkte. Düsseldorf: VDI Verlag; 1996.
- 32 ALBA Group. Altpapiersortierung bei ALBA: Präzise Trennung am laufenden Band. [Internet]. [cited 2015 August 4.]. Available from: <https://www.recyclingnews.info/recycling/praezise-trennung-am-laufenden-band/>.
  - 33 Magistrat der Stadt Marburg, FD Stadtgrün, Umwelt und Natur. Der Gelbe Sack. [Internet]. 2007 [cited 2015 August 4.]. Available from: <https://www.marburg.de/sixcms/media.php/20/Der%20Gelbe%20Sack.pdf>.
  - 34 Trennstadt Berlin. [Internet]. [cited 2015 August 4.]. Available from: <http://trennstadt-berlin.de/wertstoffe/#.VcDk4Pk71vR>.
  - 35 Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e.V. (FKN). Trennung von Verbunden ist kein Hexenwerk. [Internet]. 2015 [cited 2015 August 4.]. Available from: <http://www.getraenkekarton.de/recycling/technik/trennung-von-verbunden-ist-kein-hexenwerk>.
  - 36 DUH: „Recyclinglüge von Getränkekartonherstellern beendet“. [Internet]. [cited 2015 August 6.]. Available from: <http://www.about-drinks.com/wp-content/uploads/2014/11/duh-getraenke-kartons.jpg>.
  - 37 Rasch U. Düsseldorfer Erfindungen: Der erste Getränkekarton Europas. Rheinische Post Online. 2015 März 23.
  - 38 Tetra Pak. Die Geschichte von Tetra Pak. [Internet]. [cited 2015 August 4.]. Available from: <http://www.tetrapak.com/de/about/history>.
  - 39 Golding A. Verpackungen: Umweltbelastungen und Strategien zur Vermeidung. Karlsruhe: Verlag C.F. Müller; 1992.
  - 40 VITA PAK. Getränkekarton. [Internet]. [cited 2015 August 4.]. Available from: <http://www.vita-pak.de/berichte/wiki.PDF>.
  - 41 Stern. [Internet]. [cited 2015 August 6.]. Available from: <http://s1.blogs.stern.de/wp-content/blogs.dir/81/2014/03/ende-mai-6.jpg>.
  - 42 Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e.V..

- Verbunde sind Hightech-Werkstoffe. [Internet]. [cited 2015 Oktober 5.]. Available from:  
<http://www.getraenkekarton.de/getraenkekarton/herstellung/verbunde-sind-high-tech-werkstoffe>.
- 43 Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e.V. (FKN). Der Getränkekarton im Kreislauf der Natur. [Internet]. 2007 [cited 2015 August 4.]. Available from:  
<http://www.getraenkekarton.de/media/file/2.kreislaufverpackung.pdf>.
- 44 Harant DM, Kröger W. Sortierung von Abfällen aus Haushalten. [Internet]. 2005 [cited 2015 August 4.]. Available from:  
[http://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/doc/verwertung/sortierung\\_abfaelle.pdf](http://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/doc/verwertung/sortierung_abfaelle.pdf).
- 45 avea. Recycling von Getränkekartons. [Internet]. [cited 2015 August 5.]. Available from: <http://www.avea.info/service/abfalltipps/recycling-von-getraenkekartons-34.html>.
- 46 WDR Fernsehen. So war's 1963: Der erste Joghurtbecher. [Internet]. 2013 [cited 2015 August 5.]. Available from:  
<http://www1.wdr.de/fernsehen/aks/rubriken/sowars/joghurtbecher108.html>.
- 47 hevo-plastics. Entwicklungsgeschichte der Kunststoffe. [Internet]. [cited 2015 Oktober 1.]. Available from: <http://www.hevo-plastics.com/geschichte-1.html>.
- 48 Knorr. Asia Thai Hot Chili Nudeln. [Internet]. [cited 2015 August 6.]. Available from: [http://www.knorr.de/Images/1022/1022-866033-knorr-asia-thai-hot-chili-nudeln\\_4000400157171.png](http://www.knorr.de/Images/1022/1022-866033-knorr-asia-thai-hot-chili-nudeln_4000400157171.png).
- 49 idealo.de. [Internet]. [cited 2015 August 6.]. Available from:  
[http://cdn.idealoo.com/folder/Product/4308/3/4308321/s1\\_produktbild\\_mid-dr-oetker-vitalis-muesli-im-becher-schoko-geniesser-80-g.jpg](http://cdn.idealoo.com/folder/Product/4308/3/4308321/s1_produktbild_mid-dr-oetker-vitalis-muesli-im-becher-schoko-geniesser-80-g.jpg).
- 50 Weinkötz P, Schade C. Jedem Joghurtbecher sein Polystyrol. [Internet]. 2006 [cited 2015 August 5.]. Available from:  
[http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de\\_DE/function/conversions/](http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/function/conversions/)

- publish/common/upload/technical\_journals/packaging/PE103545.pdf.
- 51 Danone GmbH, Deutschland. Ökobilanz von Danone Activia-Verpackungen aus Polystyrol und Polylactid. Heidelberg März 2011.
- 52 Kaplalachinski C, Palm R. Joghurtbecher aus Mais: Wie Ökoprodukte die Rohstoffpreise in die Höhe treiben. [Internet]. 2011 [cited 2015 August 5.]. Available from:  
<http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/joghurtbecher-aus-mais-probleme-beim-recycling/4178702-2.html>.
- 53 Francie2102. Kunststoffe und Recycling - Referat. [Internet]. [cited 2015 August 5.]. Available from: <http://www.lerntippsammlung.de/Kunststoffe-und-Recycling.html>.
- 54 CONSULTIC Marketing & Industrieberatung GmbH. Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland. 2013 Juli 31. Available from:  
<http://www.welt.de/dieweltbewegen/sonderveroeffentlichungen/nachhaltige-verpackungen/article118563931/Trennen-oder-nicht-trennen-das-ist-die-Frage.html>.
- 55 Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. bvse-Marktbericht Kunststoffe - Januar 2015. [Internet]. 2015 [cited 2015 August 5.]. Available from:  
<http://plasticker.de/preise/marktbericht2.php?j=15&mt=1&quelle=bvse>.
- 56 Die Geschichte der Glasflasche. [Internet]. [cited 2015 August 5.]. Available from: <http://glasflasche.org/die-geschichte-der-glasflasche/>.
- 57 Lessard M. Die kleine Geschichte des Ketchups. [Internet]. 2008 [cited 2015 August 5.]. Available from: [http://www.zentrum-der-gesundheit.de/pdf/ketchup-selbst-gemacht-ia\\_04.pdf](http://www.zentrum-der-gesundheit.de/pdf/ketchup-selbst-gemacht-ia_04.pdf).
- 58 H. J. Heinz Company. Eine Erfolgsgeschichte beginnt. [Internet]. 2012 [cited 2015 August 5.]. Available from:  
[http://www.heinzketchup.de/UeberHeinz/OurHistory/1869\\_Founder](http://www.heinzketchup.de/UeberHeinz/OurHistory/1869_Founder).
- 59 united vertical media GmbH. Wussten Sie schon ... Ketchup? [Internet].

- 2010 [cited 2015 August 5.]. Available from:  
<http://blog.speisekarte.de/2010/08/12/wussten-sie-schon-ketchup/>.
- 60 Heinz. Unsere Historie. [Internet]. [cited 2015 August 6.]. Available from:  
[http://www.heinzketchup.de/~//media/Europe/Images/History/HeinzBrandSite/Global/illustration\\_1948.ashx](http://www.heinzketchup.de/~//media/Europe/Images/History/HeinzBrandSite/Global/illustration_1948.ashx).
- 61 SEO GmbH. Wo wurde Ketchup erfunden? [Internet]. [cited 2015 August 5.]. Available from: <http://www.ketchup.net/>.
- 62 Paradisi-Redaktion. Tonflaschen und Glasflaschen. [Internet]. 2013 [cited 2015 August 5.]. Available from:  
[http://www.paradisi.de/Health\\_und\\_Ernaehrung/Getraenke/Flaschen/Artike1/22351\\_Seite\\_4.php](http://www.paradisi.de/Health_und_Ernaehrung/Getraenke/Flaschen/Artike1/22351_Seite_4.php).
- 63 B|BRAUN. Grundlegende Elemente der Fusionstherapie. [Internet]. [cited 2015 August 5.]. Available from:  
[https://www.bbraun.de/documents/Knowledge/Fach\\_Infus\\_Unterrichts\\_Die\\_Infusionsbehaelter\\_.pdf](https://www.bbraun.de/documents/Knowledge/Fach_Infus_Unterrichts_Die_Infusionsbehaelter_.pdf).
- 64 Dallmus A. Plastik oder Glas? Welche Flaschen sind umweltfreundlicher?. [Internet]. 2013 [cited 2015 August 5.]. Available from:  
<http://www.br.de/radio/bayern1/inhalt/expertentipps/umweltkommissar/flaschen-glas-einweg-mehrweg-pet-umwelt-100.html>.
- 65 ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Zusammenfassung der Handreichung zur Diskussion. [Internet]. 2010 [cited 2015 August 5.]. Available from:  
<http://www.ifeu.de/oekobilanzen/pdf/IFEU%20Handreichung%20zur%20Einweg-Mehrweg-Diskussion%20%2813Juli2010%29.pdf>.
- 66 Bundesverband Glasindustrie e.V.. Wie Glasprodukte entstehen. [Internet]. [cited 2015 August 5.]. Available from: <http://www.bvglas.de/derwerkstoff/glasproduktion/>.
- 67 Schneider RE. Polyethylenterephthalat wird bis 2020 zum wichtigsten Biopolymer. [Internet]. 2013 [cited 2015 August 5.]. Available from:  
<http://www.labo.de/produkt-innovationen/biokunststoff-pet->

- polyethylenterephthalat--wird-bis-2020-zum-wichtigsten-biopolymer.htm.
- 68 Austria Glasrecycling. Glas recyceln: Aus alten Glasverpackungen werden neue. [Internet]. [cited 2015 August 5.]. Available from: <http://www.agr.at/glasrecycling/glas-recyceln.html>.
- 69 Trenntstadt Berlin. Recyclingglas: Heute der wichtigste (Sekundär-) Rohstoff für Glasverpackungen. Berlin 2013.
- 70 Thomé-Kozmiensky KJ, Goldmann D, editors. Recycling und Rohstoffe. Vol 3. Neuruppin: TK Verlag; 2010.
- 71 PricewaterhouseCoopers AG WPG. Mehrweg- und Recyclingsysteme für ausgewählte Getränkeverpackungen aus Nachhaltigkeitssicht. Juni 2011.
- 72 Bundesumweltamt. [Internet]. 2013 [cited 2015 August 5.]. Available from: [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/2\\_tab\\_entwicklung-verpackungsaufkommen\\_2015-03-05.png](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/2_tab_entwicklung-verpackungsaufkommen_2015-03-05.png).
- 73 Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV Name: PET-Rezyklat aus Post-Consumer-Abfällen Zugriff: 1.10.2015 <http://www.ivv.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/kunststoff-rezyklate/pet-recyclat.html>. PET-Rezyklat aus Post-Consumer-Abfällen. [Internet]. [cited 2015 Oktober 10]. Available from: <http://www.ivv.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/kunststoff-rezyklate/pet-recyclat.html>.
- 74 Fraunhofer-Einrichtung für Mikrosysteme und Festkörper-Technologien. Verfahren zur Herstellung von optischen Sensorfolien. [Internet]. Available from: [http://www.emft.fraunhofer.de/content/dam/emft/de/documents/Infoblaetter/2\\_D\\_Verfahren%20zur%20Herstellung%20von%20optischen%20Sensorfolien.pdf](http://www.emft.fraunhofer.de/content/dam/emft/de/documents/Infoblaetter/2_D_Verfahren%20zur%20Herstellung%20von%20optischen%20Sensorfolien.pdf).
- 75 Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH. Entwicklung des Verpackungsaufkommens in Tausend Tonnen. [Internet]. 2014 Available from: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehlter->

abfallarten/verpackungsabfaelle.

- 76 Deutsche Umwelthilfe. Pressemitteilung: Deutsche Umwelthilfe verklagt Kartonhersteller Tetra Pak wegen irreführender Werbung. [Internet]. [cited 2015 Oktober 4]. Available from:  
[http://www.duh.de/pressemitteilung.html?&tx\\_ttnews\[tt\\_news\]=2703](http://www.duh.de/pressemitteilung.html?&tx_ttnews[tt_news]=2703).
- 77 Österreichisches Ökologie Institut. Vergleichende Ökobilanz verschiedener Bechersysteme beim Getränkeausschank. [Internet]. 2008 [cited 2015 August 5.]. Available from:  
[http://www.cupsolutions.at/files/2009\\_finale\\_trinationale\\_oekobilanz\\_a-ch-d\\_langfassung.pdf](http://www.cupsolutions.at/files/2009_finale_trinationale_oekobilanz_a-ch-d_langfassung.pdf).
- 78 Siebert T, Schlummer M, Mäurer A. Bioverpackungen wiederverwerten. [Internet]. 2013 [cited 2015 August 5.]. Available from:  
[http://www.ivv.fraunhofer.de/content/dam/ivv/de/documents/GF/2013\\_Bioverpackungen\\_wiederverwerten\\_PLA.pdf](http://www.ivv.fraunhofer.de/content/dam/ivv/de/documents/GF/2013_Bioverpackungen_wiederverwerten_PLA.pdf).