

# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Einführung Kunststoffrecycling“

von Natalie Rudolph, Raphael Kiesel und  
Chuanchom Aumnate

Print-ISBN: 978-3-446-45880-2

E-Book-ISBN: 978-3-446-46128-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45880-2>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Kunststoffe sind heutzutage überall in unserem Leben zu finden. Am Morgen benutzen wir sie in Form einer Zahnbürste und Zahnpastatube, auf dem Weg zur Arbeit im Auto als Scheibenwischer, Sitz oder Fensterheber, auf der Arbeit als Tastatur oder Werkzeuggriff und beim Einkaufen als Verpackungsfolie über unserem Gemüse oder der Tafel Schokolade. Wie diese Beispiele zeigen, haben Kunststoffe ganz unterschiedliche Einsatzzwecke und -nutzen. Während sie uns in den technischen Anwendungen oft Gewicht ersparen und somit den Kraftstoffverbrauch senken, gibt es auch viele Alltagsgegenstände, in denen ihr Einsatz immer wieder im Hinblick auf den gesamten Life Cycle überdacht werden sollte. Ist z. B. die Funktion, das Gewicht oder die Haltbarkeit verbessert, ist der Einsatz durch den positiven Einfluss auf den gesamten Life Cycle oft von Vorteil. Hat die Verwendung jedoch mehr negative als positive Folgen, so sollten Alternativen bereits in der Design-Phase in Erwägung gezogen werden. Trotz der unzähligen Innovationen, die durch Kunststoffe ermöglicht wurden und auch in Zukunft realisiert werden, ist der nachhaltige Umgang mit diesem wertvollen Material unabdingbar.

Stellt sich der Einsatz von Kunststoff als die beste Variante heraus, sollte die Wiederverwendung und Reparatur als nächste Option in Betracht gezogen werden. Hiervon haben wir uns im industriellen Einsatz weit entfernt, aber auch hier sind innovative Lösungen denkbar. Nach dem Motto „Reduce, Reuse, Recycle“, sollte das Recycling von Kunststoffabfällen erst die dritte Option darstellen. Das bedeutet aber nicht, dass diese unwichtig ist. Das Recycling von Kunststoffabfällen gewinnt von Tag zu Tag mehr an Bedeutung und ist nun auch in den Fokus der breiten Öffentlichkeit gelangt. Dies ist vor allem durch die alarmierenden Zahlen zum Kunststoffabfall in den Ozeanen begründet. Derzeit gelangen jährlich mehr als 8 Millionen Tonnen Kunststoffe in die Ozeane und diese Zahl wird noch steigen, wenn wir die Handhabung von Kunststoffabfällen nicht ändern. Das Bewusstsein über diese katastrophalen Auswirkungen hat bereits zu einem Umdenken der Bevölkerung geführt und die Verwendung von Plastiktüten beim Einkaufen ist mittlerweile so absurd wie das Entsorgen der Zahnbürste nach nur einmaliger Verwendung wäre.

Aus diesem Grund möchten wir in unserem Buch aufzeigen, welches ungenutzte Potenzial im Recycling von Kunststoffen steckt – sowohl aus ökologischer, ökonomischer als auch technologischer Sicht. Unser Fokus liegt dabei auf dem Recycling von Verpackungsabfällen. Diese stellen aktuell – insbesondere für die Umwelt – eine große Herausforderung dar, ihr Recycling bietet dafür umso mehr Möglichkeiten. Zudem ist das Nicht-Wiederverwenden von Kunststoffen mit dem Verlust von Rohöl gleichzusetzen und wird daher auch unter diesem Gesichtspunkt betrachtet.

Um dieses Potenzial darzustellen, beginnt das Buch mit einem allgemeinen Überblick über Abfallbehandlungsstrategien von Kunststoffen in Deutschland und Europa und stellt die Bedeutung der Kunststoffabfälle dar (Kapitel 1 und 2). Kapitel 3 fokussiert auf die technischen Aspekte und verschiedene Verfahren des Kunststoffrecyclings. In separaten Kapiteln werden die ökonomischen (Kapitel 4) sowie ökologischen Eigenschaften (Kapitel 5) verschiedener Abfallbehandlungsstrategien von Kunststoffen verglichen und bewertet. Die Analyse zeigt das Potenzial des Kunststoffrecyclings sowie die notwendigen Randbedingungen für einen Anstieg der Recyclingquote. Daher werden in Kapitel 6 verschiedene Szenarien zur Steigerung der Rentabilität des Recyclings analysiert. Nicht zuletzt wird in Kapitel 7 das weltweite Potenzial für die Abfallbehandlung und insbesondere das Kunststoffrecycling am Beispiel der USA und Chinas dargestellt.

Wir hoffen, dass wir Ihnen mit unserem Buch aufzeigen können, welche Bedeutung und Chancen das Recycling von Kunststoffen bietet und wie wir alle gemeinsamen einen Teil dazu beitragen können, dass unsere Welt ein kleines Stück verbessert wird – ob als Entscheider in einem großen Unternehmen, beim Wocheneinkauf im Supermarkt oder beim Entsorgen von Abfällen. Denn Sie werden im Laufe des Buches feststellen: Bereits die kleinen Dinge können eine riesige Wirkung haben!

Wir danken allen, die uns bei der Erstellung des deutschen Buches, sowie seiner englischen Erstausgabe unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt Andrea Homberg, Alexander Kies und Kerstin Cypris für die großartige Unterstützung bei der Übersetzung.

Die Autoren

Raphael Kiesel, Chuanchom Aumnate, Natalie Rudolph

Aachen/Bangkok/Santa Clara, CA im Oktober 2019

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Die Autoren</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Akronyme und Abkürzungen</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 Abfälle im Alltag – ein Überblick</b> .....	<b>1</b>
1.1 Siedlungsabfälle – Ein täglicher Begleiter .....	1
1.2 Behandlungsmethoden von Siedlungsabfällen .....	3
1.2.1 Deponierung .....	5
1.2.2 Verbrennung mit Energierückgewinnung .....	7
1.2.3 Recycling .....	9
<b>2 Kunststoffe – Steigender Wert, Sinkende Lebensdauer</b> .....	<b>13</b>
<b>3 Kunststoffrecycling – Schonung wertvoller Ressourcen</b> .....	<b>17</b>
3.1 Methoden des Kunststoffrecycling .....	18
3.1.1 Werkstoffliche Verwertung .....	18
3.1.2 Rohstoffliche Verwertung .....	19
3.2 Recycling verschiedener Arten von Kunststoffabfällen .....	20
3.2.1 Pre-Consumer-Abfälle .....	20
3.2.2 Post-Consumer-Abfälle .....	22
3.3 Trennung von Kunststoffabfällen .....	28
3.3.1 Manuelle Sortierung .....	28
3.3.2 Automatische Sortierung .....	28
3.4 Degradation von Kunststoffen .....	30
3.4.1 Mechanische Degradation .....	31
3.4.2 Thermische Degradation .....	32

3.4.3	Thermisch-oxidative Degradation .....	32
3.4.4	Auswirkung der Degradation auf Verarbeitungseigenschaften und Haltbarkeit .....	32
3.5	Verunreinigungen .....	40
3.6	Fazit: Technische Realisierbarkeit des Kunststoffrecycling .....	40
<b>4</b>	<b>Ökonomische Analyse der Behandlung von Kunststoffabfällen .....</b>	<b>45</b>
4.1	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsanalyse .....	45
4.1.1	Wirtschaftlichkeitsberechnung .....	45
4.1.2	Statische Wirtschaftlichkeitsberechnung .....	46
4.1.3	Gewinnvergleichsrechnung .....	47
4.2	Ökonomische Analyse der Deponierung .....	48
4.3	Ökonomische Analyse der Verbrennung mit Energierückgewinnung ...	52
4.4	Ökonomische Analyse des Kunststoffrecyclings .....	57
4.4.1	Kosten der Materialsortierungsanlage .....	58
4.4.2	Kosten der Kunststoffaufbereitung .....	63
4.4.3	Erlöse aus dem Verkauf von recycelten Kunststoffen .....	66
4.4.4	Rentabilität .....	66
4.4.5	Der Ölpreis als Faktor für die Rentabilität des Kunststoffrecyclings .....	67
4.5	Fazit: Wirtschaftlichkeit des Kunststoffrecyclings .....	69
<b>5</b>	<b>Ökologische Analyse der Kunststoffabfallverwertung .....</b>	<b>73</b>
5.1	Ökologische Analyse der Deponierung .....	73
5.2	Ökologische Analyse der Verbrennung mit Energierückgewinnung ...	75
5.3	Ökologische Analyse des Recyclings .....	77
5.4	Fazit: Notwendigkeit des Kunststoffrecyclings für die Umwelt .....	78
<b>6</b>	<b>Optimierung des Kunststoffrecyclings .....</b>	<b>81</b>
6.1	Optimierungsmöglichkeit I: Reduktion der Sortiervorgänge .....	81
6.2	Optimierungsmöglichkeit II: Upcycling von Kunststoffabfall durch das Mischen von PE-LD und PP .....	84
6.2.1	Zusätzliche Kosten durch PE-LD-PP Recycling .....	86
6.2.2	Zusätzliche Einnahmen durch PE-LD-PP Recycling .....	89
6.2.3	Gesamtgewinn durch Optimierungsmöglichkeit II .....	89

<b>7</b>	<b>Kunststoffabfälle Weltweit: Steigendes Recyclingpotenzial . . .</b>	<b>91</b>
7.1	Kunststoffabfallbehandlung in den USA . . . . .	95
7.2	Kunststoffabfallbehandlung in China . . . . .	99
7.3	Kunststoffabfälle in der Zukunft . . . . .	106
<b>8</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>111</b>
8.1	Ökonomische Analyse der Deponierung . . . . .	112
8.2	Ökonomische Analyse der Verbrennung mit Energierückgewinnung . . .	114
8.3	Ökonomische Analyse des Kunststoffrecyclings . . . . .	116
8.4	Optimierungsmöglichkeit I: Reduktion der Sortiervorgänge . . . . .	120
8.5	Optimierungsmöglichkeit II: Upcycling von Kunststoffabfall durch Mischen von PE-LD und PP . . . . .	122
	<b>Index . . . . .</b>	<b>125</b>

# Die Autoren



**Dr.-Ing. Natalie Rudolph** ist Entwicklungsleiterin bei AREVO, Inc. Zuvor war sie Assistant Professor an der University of Wisconsin-Madison. Sie konzentriert sich vorwiegend auf die Entwicklung innovativer Prozesse und Materialien im Bereich Faserverbund und Kunststoff mit Fokus auf Additive Fertigung und Nachhaltigkeit.



**Raphael Kiesel** ist Gruppenleiter und Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT sowie Doktorand an der RWTH Aachen. Er ist im Bereich der Digitalisierung der Produktion tätig, mit dem Ziel der Effizienz und der Ressourcenschonung. Zuvor hat er im Bereich des Kunststoffrecyclings an der University of Wisconsin-Madison geforscht.



**Dr. Chuanchom Aumnate** ist Forscherin am Forschungsinstitut für Metallurgie- und Materialwissenschaften der Chulalongkorn University, Thailand. Zuvor war sie Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der University of Wisconsin-Madison und Wissenschaftliche Mitarbeiterin am National Metal and Materials Technology Center, Thailand.

# 1

## Abfälle im Alltag – ein Überblick

Leere Plastikflaschen, die Zeitung vom Vortag, Eierschalen oder gebrauchte Teebeutel – sie alle haben eines gemeinsam: Sie gehören zum Siedlungsabfall, der üblicherweise als „Müll“ bezeichnet wird. Siedlungsabfall bezieht sich auf Haushalts-, Büro- oder Einzelhandelsmüll und ist Teil des täglichen Lebens aller Menschen. Jeder Mensch in Deutschland erzeugt täglich rund 1,7 kg Siedlungsabfall, was 2016 zu einer Gesamtabfallmenge von 52,1 Millionen Tonnen (t) führte. Deutschland liegt damit deutlich über dem europäischen Durchschnitt, der bei 1,3 kg Abfall pro Person pro Tag liegt. Aufgrund der konstanten Abfallmengen sind die Handhabung und Entsorgung ein Dauerthema der Gesellschaft. Insbesondere der Wandel der Zusammensetzung, z.B. durch konstant wachsende Anteile an Kunststoffmüll, steigert den Bedarf nach einer noch besseren Handhabung der Abfälle. [1, 2, 3] Um die Auswirkungen von Kunststoffen und deren Recycling im Abfallstrom zu verstehen, ist es wichtig, die Zusammensetzung von Siedlungsabfällen und die aktuellen Strategien für deren Verwertung zu kennen.

### ■ 1.1 Siedlungsabfälle – Ein täglicher Begleiter

Siedlungsabfälle werden generell als nicht gefährliche Abfälle deklariert. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) definiert Siedlungsabfälle als *„Abfälle aus privaten Haushalten und vergleichbaren Einrichtungen sowie hausmüllähnliche Abfälle aus Gewerbe und Industrie, zum Beispiel Abfälle aus Arzt- und Rechtsanwaltspraxen, Verwaltungsgebäuden, Schulen, Kindergärten, Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen; Ferner gehören zu den Siedlungsabfällen auch Sperrmüll, Marktabfälle, Straßenkehricht, Bioabfälle sowie getrennt erfasste Wertstoffe wie Glas und Papier.“* [4]

Die Siedlungsabfälle im Sinne der Abfallbilanz in Deutschland umfassen alle Abfälle des Abfallkapitels 20 (Haushaltsabfälle und ähnliche gewerbliche und industrielle Abfälle sowie Abfälle aus Einrichtungen, einschließlich getrennt gesam-

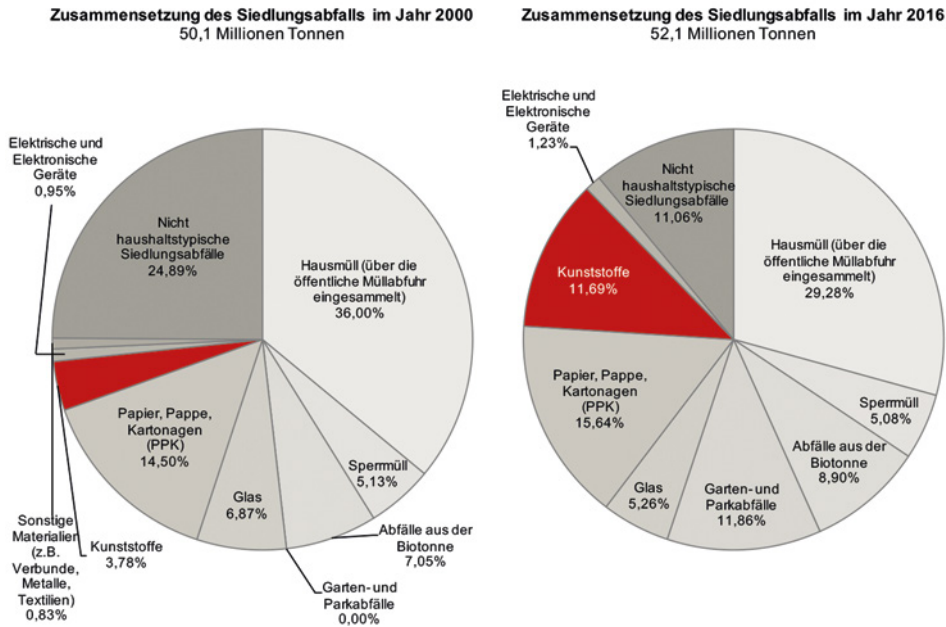


melter Fraktionen) und der Abfallgruppe 1501 (Verpackungen – einschließlich getrennt gesammelter, kommunaler Verpackungsabfälle). Die Siedlungsabfälle werden maßgeblich differenziert in *haushaltstypische Siedlungsabfälle* und *sonstige* bzw. *nicht haushaltstypische Siedlungsabfälle*. Haushaltstypische Siedlungsabfälle im Sinne der Statistik schließen die direkt vom Endverbraucher im Haushalt erzeugten Abfälle ein, z. B. Hausmüll, Sperrmüll, Verpackungen, Garten- und Parkabfälle. [5]

Die Gesamtmenge an Siedlungsabfällen ist seit 2000 relativ konstant geblieben. So ist bis 2016 lediglich ein Anstieg um 4 % zu verzeichnen (50,1 mt in 2000; 52,1 mt in 2016). Allerdings hat der Anteil an haushaltstypischen Siedlungsabfällen im selben Zeitraum deutlich zugenommen. Lag er im Jahr 2000 noch bei 36,3 mt, betrug seine Menge im Jahr 2016 46,6 mt. Pro Einwohner in Deutschland bedeutet dies einen Anstieg von über 100 kg erzeugter Siedlungsabfälle pro Jahr – von 458 kg/Einwohner in 2000 auf 565 kg/Einwohner in 2016. Dies ist gleichbedeutend mit einem Zuwachs von 23,7 %. Dieser enorme Anstieg des Indikators „Siedlungsabfälle pro Kopf“, der auch Bestandteil der europäischen Strukturindikatoren ist, zeigt die Notwendigkeit der Betrachtung der Abfallbehandlung. [5, 6]

Der verzeichnete Anstieg hat dabei mehrere Ursachen. So hängt die Menge der erzeugten Siedlungsabfälle unter anderem vom Bevölkerungswachstum, der individuellen Kaufkraft und den Regularien hinsichtlich Produktverpackungen ab. Eine detaillierte Betrachtung der Zusammensetzung der Siedlungsabfälle gibt weiteren Aufschluss über die Ursachen für den Anstieg der Abfallmenge. Bild 1.1 zeigt die Siedlungsabfallzusammensetzung in Deutschland in 2000 und 2016. Dabei fällt insbesondere die Verdreifachung des Kunststoffabfallanteiles (siehe auch Bild 2.1) ins Auge, welche einen maßgeblichen Anteil an der Zunahme der Siedlungsabfälle hat. Dies zeigt auch, wie wichtig eine genaue Analyse der Abfallbehandlung von Kunststoffen ist. Bild 1.1 gibt dabei erste Aufschlüsselung über die Trends im Verbraucherverhalten und in der Abfallproduktion von Kunststoffen (z. B. Single-Use Produkte, Verpackungsmüll), die in Kapitel 2 näher erläutert werden.

Im weiteren Verlauf des ersten Kapitels wird aufgezeigt, welche besondere Bedeutung die Zusammensetzung der Siedlungsabfälle für die Abfallbehandlung hat. [2]



**Bild 1.1** Vergleich der Siedlungsabfallzusammensetzung in Deutschland in den Jahren 2000 und 2016 (Gewichtsverteilung)

## ■ 1.2 Behandlungsmethoden von Siedlungsabfällen

Im Allgemeinen wird zwischen drei Behandlungsmethoden von Siedlungsabfällen unterschieden:

1. Deponierung
2. Verbrennung bzw. Thermische Behandlung mit Energierückgewinnung
3. Recycling

Bild 1.2 zeigt eine Übersicht der aktuellen Verteilung der drei Behandlungsmethoden in Europa und Deutschland im Jahr 2016, sowie den Stofffluss des Abfalls. Die Kompostierung von organischen Abfällen, die in einigen Quellen separat zu den drei genannten Verfahren aufgeführt ist, wird dabei dem Recycling zugeordnet. Da dieses Verfahren für die Abfallbehandlung von Kunststoffen nicht relevant ist, wird es in der Folge nicht weiter erläutert. Die 28 Länder der EU haben im Jahr 2016 insgesamt 249 mt Siedlungsabfälle produziert. Davon wurden 66 mt deponiert, 68 mt energetisch verwertet und 114 mt recycelt bzw. kompostiert (Recycling: 73 mt; Kompostierung: 41 mt). Von den 52 mt Tonnen Siedlungsabfällen

### 3.3.2.5 Lasergestützte Identifizierung

*Lasergestützte Systeme* erkennen Kunststoffe indem ein Laserstrahl auf die Materialoberfläche gerichtet wird um verschiedene Materialkennwerte wie den Absorptionskoeffizienten, Wärmeleitung und die Verteilung der Oberflächentemperatur zu ermitteln. Diese Kennwerte können zur Kunststoffidentifizierung verwendet werden. Diese Technik wird derzeit sehr selten in Recyclinganlagen verwendet.

### 3.3.2.6 Kennzeichnungssysteme

*Kennzeichnungssysteme* umfassen entweder die Kennzeichnung der Kunststoffbehälter oder des eigentlichen Kunststoffs mit einer leicht detektierbaren Markierung. Ein Kennzeichnungssystem von Continental-Container-Corporation erlaubt eine Trennung nach Kunststoffart, Farbe, Zusatzstoffen und Packungsinhalten. Diese Methode ist aufwendig, da jede Verpackungsproduktionslinie ein Kennzeichnungssystem und jede Recyclinganlage ein Erkennungssystem aufweisen muss. Eine alternative Methode wurde von der Eastman-Chemical-Company entwickelt, welche Molekularmarker zur Identifizierung der Kunststoffarten verwendet. Der Kostenaufwand für dieses zusätzliche Kennzeichnungssystem ist in der Theorie vergleichsweise niedrig, da lediglich die Aufbereiter und Polymerhersteller die Kosten tragen müssen. Zudem erleichtert die zunehmende Digitalisierung und Datenverfügbarkeit von Produktionsprozessen die Einführung eines solchen Kennzeichnungssystems. Allerdings sind alle aufgeführten Methoden höchstens in der Proof-of-Concept-Phase der Entwicklung, da alle Aufbereiter und Polymerhersteller weltweit das gleiche System nutzen müssten. [42]

## ■ 3.4 Degradation von Kunststoffen

Im Allgemeinen werden Kunststoffe nur zur Verarbeitung und einen ersten Lebenszyklus und nicht für weitere Verarbeitung oder weitere Anwendungszeiten stabilisiert. Dies ist vor allem für Kunststofffolien zu Verpackungszwecken bestehend aus Polyolefinen, wie PP und PE, welche normalerweise eine kurze Lebensdauer aufweisen, zutreffend.

Die Degradations- bzw. Abbaumechanismen von Kunststoffen resultieren aus der Einwirkung von Hitze, mechanischer Belastung, Sauerstoff und UV-Licht. Beispielsweise wird Polyethylenfolie, welche für kommerzielle Verpackungen verwendet wird, durch oxidative und photooxidative Degradationsmechanismen aufgrund der Verarbeitung und Nutzung abgebaut. Eine Wiederaufbereitung kann mechanische, thermische und thermisch-oxidative Degradationsmechanismen hervorrufen.

Die Degradation verursacht Änderungen der Polymerstruktur, typischerweise gekennzeichnet durch eine Zerteilung oder Spaltung der makromolekularen Ketten, welche eine Änderung der Stoffeigenschaften hervorruft. Radikalische Kettenreaktionen wie die Bildung von Hydroperoxid und Quervernetzungen können während der Degradation auftreten und somit auch Änderungen der Polymerstruktur hervorrufen. Während der Verarbeitung können Kettenspaltungen sowie Quervernetzungen auftreten, welche zu einem erhöhten Anteil an Polymerketten mit geringem Molekulargewicht und jeweils vermehrten Kettenverzweigungen führen. Folglich treten Zerstückelungen, Rekombinationen und Kettentransferreaktionen der Polymerradikale während der Degradation auf. [26] Polyolefine werden häufig oxidativ abgebaut.

Während der Verarbeitung und der planmäßigen Nutzung wird das Material Hitze, mechanischer Belastung, Sauerstoff und UV-Strahlung ausgesetzt. Abhängig vom Aufbau des Polymers und den Verarbeitungsbedingungen können die Belastungen mehr oder weniger Degradation hervorrufen. Im Allgemeinen können die Degradationseffekte wie folgt eingeteilt werden:

- Änderung des Molekulargewichts und der Molekulargewichtverteilung welche zu einer Änderung der Viskosität führen
- Bildung von Quervernetzungen und Kettenverzweigungen
- Entstehung von sauerstoffgesättigten Verbindungen und ungesättigten Verbindungen

Ein Verständnis für die Abbaukinetik von Polymeren ist wichtig, um den Wiederverwertungsprozess und die Prozesse zur Herstellung neuer Produkte aus Rezyklat zu gestalten. Während des Wiederverwertungsprozesses verändern sich die *Schmelzviskosität* und das *Fließverhalten* von Polymeren, was zu einer Änderung der Prozessparameter und somit unter Umständen zu Schwierigkeiten bei der Wiederverarbeitung führen kann. Verglichen mit dem Rohmaterial können die rezyklierten Produkte außerdem minderwertige mechanische Eigenschaften aufweisen. Die thermische Stabilität ist bei den meisten Polymeren nicht betroffen.

Die Degradationsmechanismen, welche als *mechanische Degradation*, *thermische Degradation*, *thermisch-oxidative Degradation* oder *photochemische Degradation* unterschieden werden können, sind abhängig von der verwendeten Polymerisationsmethode. Zusätzlich hängt die Art und der Grad der Degradation von den Verarbeitungsbedingungen und dem Polymerverhalten ab.

### 3.4.1 Mechanische Degradation

Die chemischen Verbindungen der Kohlenstoff-Kohlenstoff Polymerkette werden zerstört, wenn Schub- und Zugspannung (mechanische Spannungen), verursacht

durch Scherung und Dehnung, während des Extrusionsprozesses die innermolekularen Bindungskräfte übersteigen und somit zu mechanischer Degradation führen. Die mechanischen Spannungen nehmen mit steigender Kettenlänge und abnehmendem Abstand zum Kettenzentrum zu. Dies führt zu einer vermehrten Zunahme von Kettenspaltung bei längeren Polymerketten und tritt gehäuft im Kettenzentrum auf. Zusätzlich reduziert eine Abnahme der Temperatur die Beweglichkeit der Kettensegmente, was zu einer weiteren Zunahme der mechanischen Spannungen führt [27, 28]

### **3.4.2 Thermische Degradation**

Thermische Degradation wird durch Hitze verursacht. Das Aufheizen von Polymeren führt zu einer Erhöhung der Inneren Energie, was zu folgenden Effekten führt: Als Erstes nimmt die Rotationsrate der frei beweglichen Gruppen zu, wodurch die intermolekularen Kräfte geschwächt werden. Als Zweites steigt die Vibrationsenergie der Polymerbindungen, die statistisch verteilte Bindungsbrüche entlang der Kette auslöst und so zur Bildung von zwei Radikalen an je einem Ende des Bindungsbruches führt. Schlussendlich nimmt die Beweglichkeit der aufgenommenen Stoffe zu, was ihre Migration durch das Polymer und folglich auch ihre Reaktion mit reaktiven Stellen ermöglicht. [29, 30]

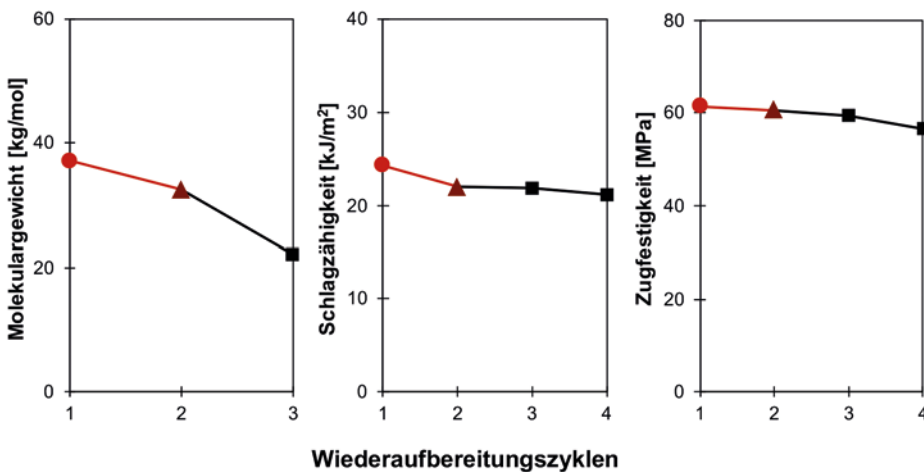
### **3.4.3 Thermisch-oxidative Degradation**

Thermisch-oxidative Degradation von Polymeren wird durch Autoxidation verursacht. Die Reaktion folgt denselben Schritten wie für die Polymerisation: Startreaktion, Reaktionsverbreitung und Abbruch. Abhängig von der vorherrschenden Reaktion während der Autoxidation kann das mittlere Molekulargewicht jeweils zu- oder abnehmen. Während  $\beta$ -Spaltung und Fragmentierung eine Abnahme des Molekulargewichts verursachen, kann eine Zunahme bei Rekombination beobachtet werden. [31, 32, 33]

### **3.4.4 Auswirkung der Degradation auf Verarbeitungseigenschaften und Haltbarkeit**

Es ist von Bedeutung die Degradationseffekte auf die Verarbeitungsparameter sowie die Lebensdauereigenschaften des gewünschten Produktes zu betrachten. Basierend auf der Anzahl der Wiederaufbereitungen muss deren Rate begrenzt oder die Menge an Rohmaterial, welches zum Rezyklat gemischt wird, angepasst werden, um den Verdünnungseffekt zu begrenzen. Im Folgenden werden Daten für diese Eigenschaftsänderungen für gebräuchliche Kunststoffarten dargestellt.

Wie bereits erwähnt ist PET das am häufigsten wiederaufbereitete Polymer, da es recht einfach im Recyclingprozess getrennt werden kann. Die Degradationsmechanismen von PET sind Kettenspaltungen, welche durch die Abnahme des Molekulargewichts von reinem PET zu wiederaufbereitetem PET über drei Produktionszyklen beobachtet werden können (Bild 3.3 *links*). Obwohl die Kettenlänge signifikant abnimmt, werden die mechanischen Eigenschaften nur leicht beeinflusst, wie in Bild 3.3 *mitte* und *rechts* zu sehen. Die Zugfestigkeit und Schlagfestigkeit nehmen leicht über drei Extrusionszyklen ab. In der Praxis wird PET-Rohmaterial genutzt, um Rezyklat aufzufrischen. Das Mischungsverhältnis und die daraus resultierende Verdünnung (Bild 3.1) hängt von den gewünschten Produkteigenschaften ab. Bild 3.4 zeigt die Veränderungen des Molekulargewichtes und Schlagfestigkeit für verschiedene Mischungsverhältnisse. Das Diagramm in Bild 3.3 *links* zeigt, dass das Molekulargewicht von 100 % wiederaufbereitetem PET (wie im Wiederaufbereitungsschritt 2 in Bild 3.3) in etwa 20 % niedriger als das von PET-Rohmaterial ist (wie im Wiederaufbereitungsschritt 1 in Bild 3.3). Die vermischten Materialien folgen dem linearen Trend basierend auf dem Mischungsverhältnis von Roh- zu wiederaufbereitetem PET. Beide Datensätze zeigen die Machbarkeit der Wiederaufbereitung und die Möglichkeit der Auffrischung durch Rohmaterial, um Degradationsprozesse signifikant zu reduzieren.



**Bild 3.3** Gewichtsgemitteltetes Molekulargewicht und mechanische Eigenschaften von Roh-Polyethylenterephthalat (PET) und wiederaufbereitetem PET, in Abhängigkeit der Anzahl der Wiederaufbereitungsschritte (Extrusion) [34]

Eine Abnahme des Molekulargewichtes führt zu einer Reduktion der Schmelzviskosität, welche eine Maßeinheit zur Beurteilung des Fließwiderstandes darstellt und beeinflusst somit das Prozessverhalten. Aus diesem Grund müssen die Prozesseinstellungen hierfür angepasst werden. Beispielsweise kann der Einspritzdruck

## ■ 4.2 Ökonomische Analyse der Deponierung

Wie in Abschnitt 1.2.1 beschrieben, sind Deponien zur Einhaltung von behördlichen Vorschriften verpflichtet, die unter anderem standortbezogene Beschränkungen, Gestaltungsspezifikationen, Betriebsstandards und Verschlussvorschriften umfassen. Diese Vorschriften haben einen großen Einfluss auf die Kosten für den Bau, den Betrieb und die endgültige Stilllegung von Deponien. [8, 9]

Neben regulatorischen Aspekten sind die *Deponiekosten* standortspezifisch; sie variieren daher je nach Gelände, Bodenart, Klima, Standortbeschränkungen und Menge der entsorgten Abfälle. Für ökonomische Analysen werden die Kosten von Deponien hauptsächlich in vier Kategorien eingeteilt: [9, 10, 11, 12, 13]

- Baukosten
- Betriebskosten
- Schließungskosten
- Folge- und Wartungskosten

Da die Daten hinsichtlich der Größe teilweise aus einem amerikanischen Fallbeispiel stammen, werden die Größen teilweise auch in einem angloamerikanischen Einheitssystem angegeben. Daher enthält auch der Anhang (Kapitel 8) die Berechnungen für das angloamerikanische, als auch das metrische Einheitensystem.

Zur Wirtschaftlichkeitsanalyse der Deponierung wird eine Deponie mit der Grundfläche  $366\text{ m} \times 366\text{ m}$  ( $1.200\text{ ft} \times 1.200\text{ ft}$ , ca. 33 acres) analysiert. Die betrachtete Deponie verfügt über eine jährliche Entsorgung von 200.000 t, beziehungsweise 500 t bis 600 t täglich. Tabelle 4.1 fasst wichtige Annahmen zusammen, die für die wirtschaftliche Analyse erforderlich sind. [11, 12, 13]

Um den Gewinn der Deponierung zu berechnen, müssen zunächst die Kosten ermittelt werden. Daher werden die Gesamtkosten der 13,5 ha (33 acres) großen Deponie zusammengefasst und schließlich durch das Gesamtgewicht der über die gesamte Lebensdauer der Deponie (2.200.000 t) entsorgten Siedlungsabfälle dividiert.

Zunächst werden dafür die Kosten für die *Konstruktion*, die sich in Kosten für den Hilfsanlagenbau und für die Liner-Protection unterteilt, betrachtet. Basierend auf der Grundfläche von  $366\text{ m} \times 366\text{ m}$  ( $1.200\text{ ft} \times 1.200\text{ ft}$ ) hat die Zugangsstraße der Deponie eine Länge von ca. 381,00 m (1.250 ft), das heißt bei vier Seiten insgesamt 1.524,00 m (5.000 ft). Einschließlich möglicher Rückstellpotenziale für die Deponie aus der von der staatlichen Aufsichtsbehörde geforderten Grundstücksgrenze und zusätzlicher Flächen für andere Anlagen ergibt sich daraus eine Länge des Sicherheitszauns von 1.830 m (6.000 ft). Die Kosten pro Fuß oder Meter Straße und Zaun sind im Anhang in Tabelle 8.1 (metrisch) bzw. Tabelle 8.2 (angloamerikanisch) angegeben. Der Raum und die Kosten für Nebengebäude, einschließlich Bürogebäude, Wartungsgebäude, Hütten und Geräteschuppen, sind in Tabelle 8.1

(metrisch) bzw. Tabelle 8.2 (angloamerikanisch) aufgeführt. Darüber hinaus benötigt jede Deponie eine modulare Fahrzeugwaage und ein dazugehöriges Computersystem. [13]

**Tabelle 4.1** Annahmen für die wirtschaftliche Analyse der Deponierung

Lebensdauer [Jahre]	11	
Nachsorgezeitraum [Jahre]	30	
Endgültige Oberflächengüte [acres]   [Hektar (ha)]	34,00	13,76
Boden der Deponie [acres]   [Hektar (ha)]	33,50	13,56
Entsorgungskapazität bebaute Fläche [yd <sup>3</sup> /acre]   [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	60.000	19,39
Gesamtkapazität [yd <sup>3</sup> ]   [m <sup>3</sup> ]	4.000.000	3.058.104
Dichte des Abfalls in der Anlage [t/yd <sup>3</sup> ]   [t/m <sup>3</sup> ]	0,55	0,72
Gewichtskapazität pro Hektar [t/acre]   [t/m <sup>2</sup> ]	33.000	49,42
Abfallmenge pro Tag [t]	500–600	
Abfallmenge pro Jahr [t]	200.000	
Gesamtgewichtskapazität [t]	2.227.500	
Gesamtgewicht der Deponie (11 Jahre) [t]	2.200.000	

Der Boden der Deponie mit einer Fläche von 14 ha (33,5 acres) benötigt ein Liner- und Sickerwassersystem. Nach einer Standortbestimmung muss zunächst der untere Bereich geräumt und gerodet werden. Nach der Fertigstellung werden die Steigungen und Erhöhungen des Linerbaus durch Aushub ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass die Deponie eine minimale strukturelle Damm-Berme aufweist, die entlang des Umfangs der Deponie konstruiert wurde, um die Verankerung der Liner-Construction und die strukturelle Stabilität der Damm-Zehe für die endgültige Entsorgungsböschung zu gewährleisten. Nach Festlegung der grundlegenden Eigenschaften wird das Liner- und Sickerwasser-Managementsystem der Deponie, einschließlich Tonauskleidung, Geomembran, Geokompositboden und Granulatboden, erstellt. Neben diesen physischen Handlungen des Baus und der Installation sind Management und Qualitätskontrolle erforderlich, die in der Regel von unabhängigen externen Beratern durchgeführt werden. Die detaillierte Kostenaufstellung ist auch in Tabelle 8.1 (metrisch) bzw. Tabelle 8.2 (angloamerikanisch) enthalten.

Im Durchschnitt betragen die *gesamten Konstruktionskosten* für die fertige Deponie **18.067.905 €**, wie in Tabelle 4.2 dargestellt. [11, 13]



# 6

## Optimierung des Kunststoffrecyclings

Kapitel 5 hat gezeigt, dass das Recycling die beste Option für den Umgang mit Kunststoffabfällen aus ökologischer Sicht ist und wesentlich zur Minimierung der Luft-, Boden- und Meeresverschmutzung beitragen kann.

Aber wie in den Kapiteln 2, 3 und 4 dargestellt, gibt es beim Recycling zwei zentrale Fragen: Einerseits werden europaweit – trotz steigender Tendenz – nach wie vor nur ein Drittel der Kunststoffabfälle recycelt. Andererseits ist das Recycling derzeit wirtschaftlich unrentabel (siehe Kapitel 4). Das Recycling und der Verkauf von 1 t recyceltem Kunststoff führt zu einem Verlust von ca. 80 €.

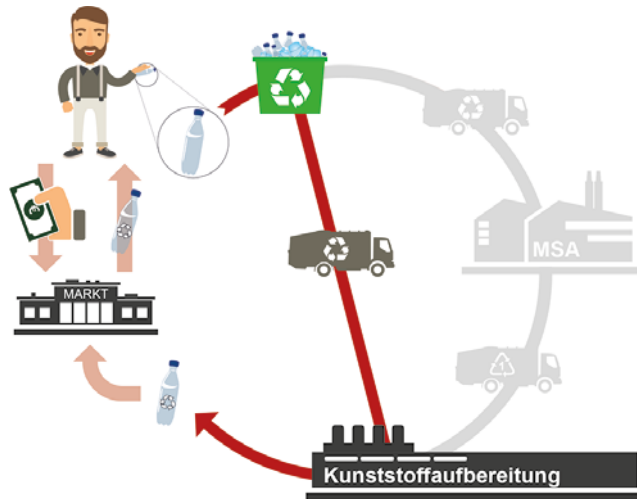
Um sowohl die Rentabilität, als auch die Recyclingquote zu verbessern, werden in diesem Kapitel zwei Möglichkeiten zur Prozessoptimierung vorgestellt.

### ■ 6.1 Optimierungsmöglichkeit I: Reduktion der Sortiervorgänge

Die erste vorgeschlagene Prozessoptimierung ist die Reduzierung der Anzahl der Sortierprozesse. Daher wird das in Kapitel 1 beschriebene Dual-Stream bzw. Zweistrom-Recycling betrachtet. Dual-Stream-Recycling bedeutet, dass die Kunststoffabfälle von den Verbrauchern in ihren Haushalten direkt getrennt werden, was in einigen Ländern Europas schon sehr verbreitet ist (siehe Abschnitt 1.2.3). Somit entfällt der Sortierprozess in der Materialrückgewinnungsanlage (MSA). Der optimierte Prozess ist in Bild 6.1 dargestellt. [1]

Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit des optimierten Prozesses wird die ursprüngliche Wirtschaftlichkeitsberechnung des Kunststoffrecyclingprozesses zugrunde gelegt. Die Kosten für die Verarbeitung von PET sowie die Einnahmen aus dem Verkauf von recyceltem PET bleiben unverändert. Die Verarbeitung von 1 t Kunststoffabfall kostet **54,81 €** und die Verkaufserlöse von 1 t recycel-

tem Kunststoff betragen **44,53 €**. Um den Kunststoff jedoch in der gleichen Anlage zu verarbeiten, müssen einige zusätzliche Maschinen und Prozesse installiert werden. Die Analyse der zusätzlichen Kosten, wie z. B. Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten, erfolgt in zwei Schritten. Die Annahmen für diese Optimierung sind in Tabelle 6.1 und ausführlicher in Tabelle 8.19 im Anhang dargestellt.



**Bild 6.1** Optimierungsmöglichkeit I: Reduktion der Sortiervorgänge

**Tabelle 6.1** Optimierungsmöglichkeit I: Annahmen

Lebensdauer [Jahre]	20
Jährliche Arbeitsstunden [h]	6.240
Jährlich Kunststoffabfallkapazität [t]	100.000
Gesamte Kunststoffabfallkapazität [t]	2.000.000
Jährlich PET Kapazität [t]	15.000
Gesamte PET Kapazität [t]	300.000
Trenneffizienz [%]	91

Die zusätzlichen Investitionskosten werden in Gebäude- und Standortkosten, Maschinen- und Anlagenkosten aufgeteilt. Um Kunststoffabfälle in nur einer Anlage zu behandeln, sind zusätzliche Grundstücke, Baustellenarbeiten und Gebäude sowie ein Waagenhaus erforderlich. Diese Bau- und Baustellenkosten belaufen sich auf 1.775.000 €. Darüber hinaus müssen drei neue Maschinen installiert werden: ein Dosierbehälter, eine optische PET-Sortiermaschine und eine Ballenpresse. Die Investitionskosten aller Maschinen belaufen sich auf 925.000 €. Für zusätzliche Förderbänder, Schienenfahrzeuge und Entsorgungswagen betragen

# Index

## A

Abbau  
– Kinetik 31  
– mechanisch 30, 31  
– photochemisch 31  
– thermisch 30, 31, 32  
– thermisch-oxidativ 30, 31  
Absolute Rentabilität 46, 47  
Aufbereitung 9  
Automatische Sortierung 28  
Automobilbauanwendungen 25

## B

Balistikseparator 59  
Ballenpresse 60  
Bauwesen 25  
Betriebskosten 50  
Betriebs- und Wartungskosten 54, 65

## D

Deponieklassen 6  
Deponiekosten 48  
Deponierung 3, 5  
Dichte 28  
Dosiersystem 59  
Dual-Stream Recycling 9  
Dynamische Verfahren 46

## E

Elektro- und Elektronik-Altgeräte 27  
Erweiterung der analysierten PET-Wieder-  
aufbereitung 84

## F

Fixkosten 47  
Fließverhalten 31

## G

Gewinnvergleichsrechnung 47

## H

Haushaltstypische Siedlungsabfälle 2  
High-Density-Polyethylen (HD-PE) 14  
High-Density-Polyethylen (PE-HD) 22

## I

Initiale Investitionskosten 47  
Investitionskosten 53, 64

## K

Kapitalkosten 47  
Kaufkraftparität (KKP) 53  
Kennzeichnungssysteme 30  
Konstruktion 48  
Konstruktionskosten 49  
Kosten für die Nachbereitung und War-  
tung 51  
Kunststoffabbau 30  
Kunststoffabfallbehandlungsquoten 4  
Kunststoffanwendungen 23  
Kunststoffaufbereitungsanlage 63  
Kunststoffrecycling 17  
– Methoden 18

**L**

- Landwirtschaftliche Anwendungen 26
- Lasergestützte Systeme 30
- Lebensdauer 24
- Lochtrommelsieb 59
- Low-Density-Polyethylen (LD-PE) 14
- Low-Density-Polyethylen (PE-LD) 22

**M**

- Manuelle Sortierung 28
- Materialsortierungsanlage (MSA) 58
- Melt-Flow-Index (MFI) 34
- Mikrokunststoffe 74
- Molekulargewicht 19

**N**

- Nahinfrarottrennung (NIR) 29

**O**

- Ökologische Sicht 73
- Optischen Sortierer 60

**P**

- Pearson-Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient  $r_{x,y}$  68
- Polyethylenterephthalat (PET) 22
- Polypropylen (PP) 14, 22
- Polystyrol (PS) 22
- Polyvinylchlorid (PVC) 22
- Postconsumer-Kunststoffabfall 17, 20
- Preconsumer-Kunststoffabfall 17, 20
- Prozessenergieemissionen 77
- Prozessoptimierung 81

**R**

- Recycling 3, 9
  - gemischter Kunststoffe 17
  - Kunststoff 17
  - Verschlechterung der Leistung 41

- Recycling-Code 22
- Recyclingquote 18
- Reduzierung der Kunststoffproduktion 77
- Relative Rentabilität 46
- Rohstoffliche Verwertung 18, 19
- Röntgenfluoreszenz 29

**S**

- Sammlung 9
- Schaumflotation 29
- Schlitztrommelsieb 60
- Schmelzeviskosität 31
- Schmelzflussindex-(MFI)-Messungen 85
- Schwimm- und Sink-Verfahren 28
- Sickerwasser 74
- Siedlungsabfall 1
- Siedlungsabfallzusammensetzung 2
- Single-Stream Recycling 9
- Sortierung 28
- Statische Verfahren 46
- Stilllegungskosten 51
- Stofffluss 3

**T**

- Thermische Behandlung 3

**U**

- Umwandlung 9

**V**

- Variable Kosten 47
- Verbrennung 3, 7
- Verdünnung 20
- Verkauf 9
- Verkehrsemissionen 77
- vernetzte Polymere 19
- Verpackung
  - Anwendungen 24
- Verunreinigungen 40

**W**

Wärme 7

Werkstoffliche Verwertung 18

– Primär 19

– Sekundär 19

Wiederverarbeitung 17

Wirbelstrom-Separator 60

Wirtschaftlichkeitsberechnung 45

**Z**

Zeitungspapiersieb 60