
1 Einleitung

In der modernen Gesellschaft sind Kunststoffe ein zentraler Werkstoff, der vielfältige Anwendungsmöglichkeiten bietet. Häufig werden diese jedoch für Produkte mit einer kurzen Nutzungs- und Lebensdauer verwendet, sodass die stetig steigenden Mengen an Plastikabfällen eine große Herausforderung darstellen und bisher überwiegend in der Umwelt oder auf Deponien landen. Um den Stoffkreislauf insbesondere für stark verunreinigte und gemischte Kunststoffabfälle zu schließen, werden neue Technologien benötigt, die die etablierten mechanischen Recyclingverfahren komplementär ergänzen. Ein vielversprechender Ansatz stellt dabei das chemische Recycling zur Rückgewinnung von hochwertigen Monomeren aus Polykondensaten wie Poly(ethylenterephthalat) (PET) dar. Hierbei ist eine maßgebliche Anforderung an die Qualität der Monomere, dass daraus Polymere synthetisiert werden können, deren Eigenschaften vergleichbar zur Neuware sind. Nur so kann sichergestellt werden, dass die mittels chemischem Recycling gewonnenen Monomere jene aus fossilen Rohstoffen substituieren.

1.1 Einordnung des Themas

Um den weltweit großen Kunststoffabfallmengen gerecht zu werden, ist die Entwicklung robuster, flexibler und skalierbarer Technologien notwendig. So müssen nicht nur unterschiedliche Qualitäten und Quantitäten an Inputmaterialien verarbeitet werden können, sondern diese Technologien müssen auch ökonomisch und ökologisch tragfähig sein. Dies ist notwendig, um einerseits eine langfristige Etablierung am Markt zu gewährleisten und andererseits einen Beitrag zur Reduzierung der negativen Umweltauswirkungen der menschlichen Gesellschaft zu leisten. Da zu Beginn einer Verfahrensentwicklung die größte Entscheidungsfreiheit vorliegt, sollten diese beiden Aspekte neben der technologischen Machbarkeit frühzeitig berücksichtigt werden. Aus der Entwicklung anderer (Recycling-) Prozesse und gemäß der Empfehlungen für eine nachhaltige Prozessindustrie sind einige Merkmale, wie beispielsweise eine kontinuierliche Prozessführung bei hochvolumigen Materialien oder Prozessintensivierung, als vorteilhaft bekannt^[1,2]. Um hochwertige Monomere aus Polymeren gewinnen zu können, müssen die Polymerketten zunächst zerlegt und die Monomere anschließend aufgereinigt werden. In der Literatur sind verschiedene Ansätze zur Depolymerisation von PET mittels Aminolyse, Glykolyse, Hydrolyse, Methanolyse beschrieben. Diese wurden jedoch meist absatzweise in Rührkesseln unter Verwendung großer Mengen an Lösungsmitteln untersucht^[3]. Dem gegenüber stehen vereinzelte

Studien zur Untersuchung einer alkalischen Hydrolyse von PET durch den Einsatz von festen Basen wie Natriumhydroxid (NaOH), die absatzweise oder kontinuierlich mit einer geringen Ausbeute an Monomeren durchgeführt wurden^[4,5]. Oku et al.^[6] stellt in seiner Arbeit die Hypothese auf, dass zur Steigerung der Bildung des Zwischenproduktes Dinatriumterephthalat (DNT) eine mechanische Erneuerung der Oberfläche von Vorteil ist. Die experimentellen Ergebnisse von Biermann^[4] in einem Laborknetter zeigen, dass eine intensive Durchmischung der Reaktionsmasse zur Erzielung höherer Ausbeuten notwendig ist und durch den Einsatz eines Doppelschneckenextruders (TSE) realisiert werden kann.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein kontinuierliches, skalierbares Verfahren zur Depolymerisation von PET entwickelt werden. Dazu werden verschiedene Einflussparameter auf die kontinuierliche Depolymerisation von PET durch Verwendung von festem NaOH in einem TSE im Technikumsmaßstab untersucht. Im Anschluss an einen Überblick zum Stand des Wissens werden der Versuchsaufbau und das Vorgehen bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen vorgestellt. Zur Charakterisierung der kontinuierlichen Depolymerisation werden neben der Ausbeute an Terephthalsäure (rTA) und deren Farbwert auch die Prozessparameter wie das Drehmoment der Schnecken und die Temperatur der Reaktionsmasse im Extruder herangezogen. Der TSE als chemischer Reaktor wird hinsichtlich seines Verweilzeitverhaltens charakterisiert und die Raum-Zeit-Ausbeute für unterschiedliche Betriebspunkte bestimmt.

Da der Prozessschritt der Depolymerisation ein zentrales Element für die Entwicklung eines chemischen Recyclingverfahrens für PET-haltige Abfälle darstellt, sollen die Ergebnisse und das Verfahrenskonzept sowohl aus technologischer als auch aus ökologischer und ökonomischer Sicht eingeordnet werden. Als Vergleichspunkt dient hierzu ein absatzweiser Verfahrensansatz, bei dem in einem Rührkessel eine enzymatisch katalysierte, alkalische Hydrolyse durchgeführt und langfristig ebenfalls in den industriellen Maßstab überführt werden soll^[7,8].

2 Stand des Wissens

2.1 Poly(ethylenerephthalat)

Das thermoplastische Polymer Poly(ethylenerephthalat) gehört zur Gruppe der Polykondensate und ist der bekannteste Polyester. Dieses ist neben Polyvinylchlorid (PVC) und den Polyolefinen Polypropylen (PP) und den beiden Polyethylen(PE)-Typen HDPE (high-density polyethylene) und LDPE (low-density polyethylene) eines der wichtigsten Kunststoffe, den sogenannten „Big five“^[9]. Es findet als Blasform, Folie oder Faser vielfach Anwendung im Bereich der Verpackungen und Textilien.

2.1.1 Ausgangsstoffe und Synthese

PET wird großindustriell durch Polykondensation aus den Monomeren Terephthalsäure (PTA) und Monoethylenglykol (MEG) hergestellt. Im Folgenden wird sowohl auf die Syntheserouten der Monomere als auch deren Spezifikationen zur Herstellung von hochwertigem PET eingegangen. Das Reaktionsschema der Polykondensation ist in Abbildung 1 dargestellt.

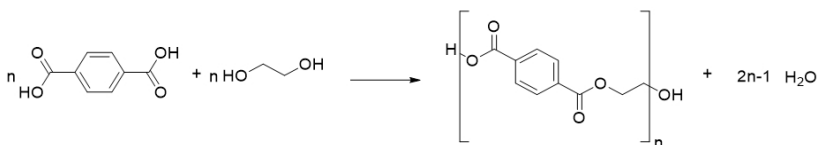


Abbildung 1: Vereinfachtes Reaktionsschema der kontinuierlichen PET-Herstellung aus PTA und MEG^[4]

2.1.1.1 Terephthalsäure

Die industrielle Herstellung von Terephthalsäure erfolgt seit Anfang der 1970er Jahre üblicherweise über den Amoco-Prozess. Dabei wird mittels Luftsauerstoff p-Xylol oxidiert, welcher aus Pyrolysebenzin über thermische Trennverfahren zunächst als aromatenreiche Fraktion gewonnen wird. Da diese Fraktion jedoch auch andere Isomere des Xylols enthält, wird zur weiteren Aufreinigung über eine Kühlungskristallisation das p-Xylol isoliert und durch eine anschließende Wäsche mit Toluol eine Reinheit von 99,5 % erzielt.^[10,11]

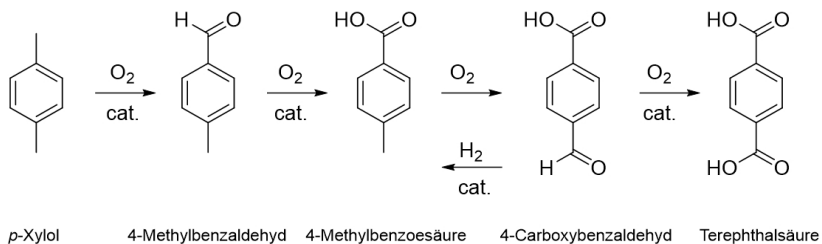


Abbildung 2: Vereinfachtes Reaktionsschema des Amoco-Prozesses zur Terephthalsäuregewinnung^{[1][2]}

Die Umsetzung von p-Xylol zu Terephthalsäure erfolgt in Essigsäure als Lösungsmittel mit Hilfe eines löslichen Kobalt/Mangan-Bromid-Katalysators. Durch die stark korrosiven Bedingungen muss der Prozess in titanbeschichteten Apparaten durchgeführt werden. Der Reaktor wird bei 175 bis 225 °C und bei 15 bis 30 bar kontinuierlich betrieben. Da die Reaktion stark exotherm ist, wird die Reaktionswärme durch Verdampfung von Essigsäure und dem entstehenden Wasser abgeführt. Die Terephthalsäure fällt auf Grund ihrer geringen Löslichkeit unter den Reaktionsbedingungen als Feststoff aus. Die Oxidation von p-Xylol zu Terephthalsäure erfolgt über mehrere Zwischenstufen, wie in Abbildung 2 dargestellt. Um die für die PET-Herstellung notwendige Reinheit der Terephthalsäure, gemäß der Spezifikation in Tabelle 1, zu erzielen, erfolgt anschließend die Aufreinigung. So würden beispielsweise zu hohe Konzentrationen an 4-Methylbenzoesäure (4-MBS) und 4-Carboxybenzaldehyd (4-CBA) bei der Polykondensation zu einem Kettenabbruch und damit zu geringen Molmassen des erzeugten PETs führen. Dazu wird die rohe Terephthalsäure zunächst in Wasser suspendiert und bei über 260 °C gelöst. Durch Zugabe von Wasserstoff und in Kontakt mit einem kohlenstoffmodifizierten Palladium-Katalysator erfolgen die selektive Umsetzung der färbenden Verunreinigungen zu farblosen Komponenten sowie die Umwandlung von beispielsweise 4-CBA zu p-Toluol. Anschließend erfolgt die Kristallisation der Terephthalsäure über eine schrittweise Senkung des Druckes, sodass über die Abkühlungskaskade die gewünschte Partikelmorphologie eingestellt wird. Die umgesetzten Verunreinigungen verbleiben in der Mutterlauge. Durch eine anschließende Filtration und Trocknung wird die hochreine Terephthalsäure gewonnen. Diese wird häufig als „purified terephthalic acid“ mit PTA abgekürzt.^[1]

Tabelle 1: Spezifikation von Terephthalsäure (PTA) für die PET-Produktion („polymer grade“)^[11], *Testmethode 5 % (w/v) Lösung in DMF

	Grenzwert	Einheit
Säurezahl	675 ± 2	mg KOH/g
Asche	≤ 15	ppm
Gesamtmetallgehalt	≤ 8	ppm
4-CBA	≤ 25	ppm
4-MBS	≤ 150	ppm
Wassergehalt	$\leq 0,20$	%(w/w)
Farbwert, APHA*	≤ 10	Hazen

2.1.1.2 Monoethylenglykol

Die industrielle Herstellung von Monoethylenglykol erfolgt fast ausschließlich über eine thermische Hydrolyse von Ethylenoxid ohne Katalysator. Das benötigte Ethylenoxid wird durch Direktoxidation von Ethylen mit reinem Sauerstoff bzw. Luftsauerstoff gewonnen. In Abbildung 3 ist eine Glykolanlage schematisch dargestellt.

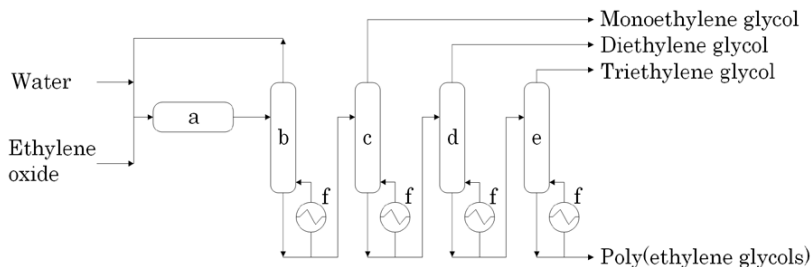


Abbildung 3: Fließschema einer Glykolanlage a) Reaktor, b) Trocknungskolonne, c) MEG Kolonne, d) DEG Kolonne, e) TEG Kolonne, f) Wärmeübertrager^[11]

So wird zunächst das Wasser-Ethylenoxid-Gemisch auf etwa 200 °C erwärmt. Dabei entstehen neben Monoethylenglykol auch Di-, Tri-, Tetra- und Polyglykole, deren Ausbeuten stetig abnehmen. Zur Minimierung der Bildung der höheren Glykole wird ein großer Überschuss an Wasser ($20 \text{ mol}_{\text{Wasser}}/\text{mol}_{\text{Ethylenoxid}}$) eingesetzt, da das Ethylenoxid schneller mit Ethylenglykol (EG) als mit Wasser reagiert. Dadurch können etwa 90 % des Ethylenoxids zu Monoethylenglykol umgesetzt werden. Anschließend erfolgen die Abtrennung des Wasserüberschusses und die Trennung der unterschiedlichen Glykole über eine Destillationskaskade mit sinkenden Drücken. Da bei der Hydrolyse neben den Glykolen auch geringe Mengen an

Aldehyden entstehen, ist es notwendig, bei der Rückführung des Wasserüberschusses deren Aufkonzentrierung zu vermeiden. Diese Aldehyde werden über einen Seitenstrom aus dem Prozess abgeführt. Um das Monoethylenglykol für die Herstellung von qualitativ hochwertigem PET einsetzen zu können, müssen durch weitere Aufreinigungsschritte die in Tabelle 2 dargestellten Grenzwerte erreicht werden.

Tabelle 2: Spezifikation von Monoethylenglykol für die PET-Produktion^[11]

	Grenzwert	Einheit
Monoethylenglykol	$\geq 99,0$	%(w/w)
Diethylenglykol	$\leq 0,08$	%(w/w)
Essigsäuregehalt	$\leq 0,005$	%(w/w)
Wassergehalt	$\leq 0,08$	%(w/w)
Acetaldehydgehalt	≤ 30	ppm
Eisengehalt	$\leq 0,07$	ppm
Asche	$\leq 0,005$	g/100 ml
Farbwert, APHA	≤ 10	Hazen

Neben der fossilen Herstellungsrouten existieren verschiedene, in der Entwicklung befindliche Ansätze, MEG aus sogenannten C₁-Einheiten zu gewinnen. Dabei kommen beispielsweise Synthesegas oder Kohlenstoffmonoxid, aber auch Zellulose oder andere Biomasse zum Einsatz. Einen guten Überblick über die verschiedenen, meist umfangreicheren Syntheserouten gibt es in der Literatur^[11,13]. Bisher haben diese Ansätze jedoch gemein, dass sie wirtschaftlich nicht mit der fossilen Herstellung aus Ethylen über Ethylenoxid zu Ethylenglykol konkurrieren können. Dies kann sich ändern, wenn der Preis für Rohöl steigt.^[11,13]

2.1.1.3 Synthese

Da eine ökonomisch tragbare Herstellung von Terephthalsäure in der für die Faserproduktion notwendigen Reinheit bis zum Ende 1960er Jahre nicht möglich war, wurde PET zunächst durch Umesterung von Dimethylterephthalat (DMT) mit einem Überschuss an Monoethylenglykol hergestellt. Dabei wurde das geschmolzene DMT bei 150 bis 200 °C mit Ethylenglykol gemischt und das entstehende Methanol kontinuierlich destilliert. Danach wurde die Schmelze in einen Polykondensationsreaktor überführt, um bei 270 bis 280 °C und einem Vakuum von <0,1 bar die gewünschte hohe Molmasse des PETs zu erzielen. Sowohl für die Umesterung des DMTs als auch die Polykondensation zu PET ist der Einsatz von Katalysatoren notwendig.^[11]

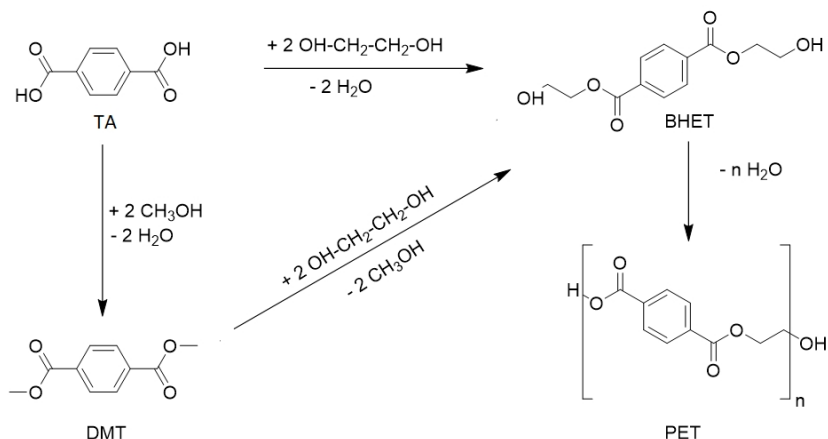


Abbildung 4: Darstellung der verschiedenen PET-Syntheserouten, adaptiert nach Aguado et al.^[14]

Wirtschaftlich vorteilhaft und daher auch mittlerweile in der Industrie fast ausschließlich eingesetzt ist die direkte Produktion von PET aus den Monomeren Terephthalsäure und Monoethylenglykol. Dieser Prozess erfolgt ebenfalls in zwei Stufen. So wird zunächst durch Veresterung der beiden Monomere Bis(2-hydroxyethyl)terephthalat (BHET) hergestellt. Die Reaktionszeit bei 185 bis 290 °C und 0,35 bis 5,8 bar beträgt ein bis fünf Stunden. Währenddessen werden kontinuierlich das sich bildende Wasser und der geringfügige Überschuss an MEG durch Destillation abgetrennt, sodass das Reaktionsgleichgewicht auf die Produktseite verschoben wird. Diese Reaktionszeit kann reduziert werden, wenn die direkte Veresterung unter Druck (0,27 bis 0,55MPa) und oberhalb der Siedetemperatur des MEGs bei 220 bis 260 °C durchgeführt wird.^{[11,15][15,11]}

Anschließend erfolgt bei einer Reaktionstemperatur von 205 bis 305 °C und einem Vakuum <1 mbar die Polymerisationsreaktion zu PET. In diese zweite Stufe wird häufig ein Antimonkatalysator zur Unterstützung der Reaktion eingesetzt. Anschließend wird zur Erzielung des gewünschten Molekulargewichtes von >24.000 g/mol das PET in einem Solid-State-Polycondensation (SSP) Prozess weiterverarbeitet^[16]. Dies erfolgt über mehrere Stunden bei Temperaturen zwischen der Glasübergangstemperatur und dem kristallinen Schmelzpunkt des Polymers und dient dazu, die optischen sowie mechanischen Eigenschaften für die Anwendung als PET-Flasche einzustellen. Die verschiedenen Ausgangsstoffe und deren Routen zur Synthese von PET sind in Abbildung 4 dargestellt.^[11,15–17]

2.1.2 Eigenschaften und Verarbeitung

PET ist ein Polymer, das sich durch eine gute Beständigkeit gegenüber verdünnten Basen und Säuren, Kohlenwasserstoffen und Alkoholen auszeichnet, jedoch unbeständig gegenüber Ketonen sowie starken Basen und Säuren ist^[18,19]. PET wird hauptsächlich für die Herstellung von Verpackungen über Spritzgussverfahren und als Faser über Schmelzspinnverfahren für die Textilproduktion verwendet. Bei der Anwendung der beiden Verfahren ist die intrinsische Viskosität (IV) des geschmolzenen PETs als Maß für dessen Molekulargewicht eine zentrale Materialeigenschaft^[20,3]. Verbreitet sind drei unterschiedliche Arten von PET: kristallines PET (PET-C), amorphes PET (PET-A) und glykol-modifiziertes PET (PET-G). Abhängig vom Kristallisationsgrad beträgt die Dichte von PET 1,33 bis 1,40 g/cm³ und die Schmelztemperatur 250 bis 260 °C. So zeichnet sich PET-A durch eine hohe Steifigkeit und Transparenz aus, sodass dieses für die Herstellung von Verpackungen und Getränkeflaschen bevorzugt wird. Um den amorphen Bereich und damit die Transparenz zu steigern, werden in der PET-Produktion oft Isophthalsäure (IA) und/oder 1,4-Cyclohexadimethanol (CHDM) als Co-Monomere hinzugefügt. Zudem zeichnet sich PET durch eine geringe Durchlässigkeit von Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid und einer Dauergebrauchstemperatur von -40 bis 60 °C aus, sodass es sich insbesondere für den Einsatz als Getränkeflasche eignet.^[11,18,19]

Bei der Herstellung von Lebensmittelverpackungen liegt der Fokus auf der Realisierung der Eigenschaften zur Sicherstellung einer möglichst langen Haltbarkeit und eines einfachen Transports des umschlossenen Produktes. Der typische Aufbau und einige häufig eingesetzte Materialien einer Lebensmittelverpackung sind in Abbildung 5 dargestellt. Insbesondere bei der Barrierschicht ist die Bandbreite der eingesetzten Materialien sehr groß und beinhaltet neben Polymeren auch anorganische Schichten. So wird in Getränkeflaschen zur Permeationsminderung beispielsweise Aluminium oder Siliziumoxid mittels plasmagestützter chemischer Gasphasenabscheidung aufgebracht^[21]. In Verpackungen von Käse wird beispielsweise häufig eine Sperrschicht aus Ethylenvinylalkoholcopolymer (EVOH) eingebettet, um die Durchlässigkeit gegenüber Feuchtigkeit und Sauerstoff zu hemmen. Da einige Polymere nicht direkt miteinander verbunden werden können, kommen oft zusätzliche Schichten aus Polyurethanen oder Säure/Säureanhydrid funktionalisierten Polyolefinen zum Einsatz, die als Haftvermittler zwischen den unterschiedlichen Polymeren dienen.^[22]







	Funktion	Materialien
	Siegelschicht	PE, EVA, PP, PA, PET
	Barrierschicht	PE, EVA, PP, PA, PVDC, PET, SiOx
	Verbindungsschicht	Polyurethane, funktionalisierte Polyolefine
	Strukturschicht	PE, PET, PA, EVA
	Außenschicht	PE or PET
	Beschichtung	Spezialpolymere

Abbildung 5: Typischer, schematischer Aufbau von Mehrschichtverpackungen für Lebensmittel und häufig eingesetzte Materialien^[22]

Während die Barrierschichten vor allem der Haltbarkeit des Lebensmittels dienen, ist für den Transport auch der Schutz vor mechanischen Einwirkungen entscheidend. Um die Stabilität und Robustheit der Verpackung zu gewährleisten, wird eine Strukturschicht benötigt, die meist die größte Dicke (bis zu 350 μm) aufweist und aus PET oder PE besteht. PET ist besonders geeignet, da es zu einer guten Langzeitstabilität bei Temperaturen bis 130 $^{\circ}\text{C}$ aufweist und als biaxial orientiertes PET mit verschiedenen Verfahren direkt bedruckt werden kann. Nach außen hin wird diese Schicht in manchen Anwendungsfällen durch eine dünne Beschichtung abgeschirmt, um etwaige Aufdrucke zu schützen. ^[11,22]

Das größte Anwendungsfeld von PET stellt jedoch die Herstellung von Fasern für die Textilproduktion dar. Da zum einen die Schmelztemperatur von PET deutlich niedriger als die Zersetzungstemperatur ist, kann die Verarbeitung über ein Schmelzspinnverfahren erfolgen. Zum anderen erstarrt das PET auf Grund seiner hohen Glasübergangstemperatur als stabile, unterkühlte Schmelze, dessen Moleküle in Garnrichtung orientiert sind. Dadurch weist die Faser eine vergleichsweise hohe Zugfestigkeit auf. Neben der Ausrichtung der Moleküle wird durch die Wahl der Parameter beim Spinnprozess, wie insbesondere die Spinnengeschwindigkeit, der Kristallisationsgrad des PETs in der Faser beeinflusst, der bei Fasern bis zu 50 % betragen kann. Daher wird für Fasern hoher Güteklassen PET mit einem deutlich höheren Kristallisationsgrad und einem möglichst geringen Anteil an Co-Monomeren wie IA gegenüber dem amorphen PET für die Flaschenherstellung bevorzugt. Entscheidend für den Erfolg des Spinnprozesses ist die vorherige Trocknung des PET Granulats <0,01 Gew. %, da schon kleinste Gehalte an Wasser zu einem hydrolytischen Abbau und damit einer Schädigung des Produktes führen.

Durch die anschließende thermische Nachbehandlung des Garns werden dessen Eigenschaften gemäß der Anwendung eingestellt, sodass dieses gefärbt, gewebt und mit Ausrüstungsstoffen veredelt werden kann. Insgesamt ist die Faserherstellung ein hoch-komplexer Prozess, sodass dafür nur PET mit definierten Eigenschaften eingesetzt werden kann.^[11]

Daher werden zur Befriedigung der großen Nachfrage nach recyceltem Material fast ausschließlich hochreine PET-Abfallfraktionen aus der Pfandflaschensammlung eingesetzt^[23]. Dadurch werden zuvor für den Kontakt mit Lebensmitteln zugelassene Materialien mit einer Vielzahl von Farb- und Ausrüstungsstoffen sowie Fremdmaterialien wie Baumwolle versetzt^[24]. Diese hochkomplexen Textilien stellen eine große Herausforderung für Recyclingprozesse dar, da sämtliche Verunreinigungen zuverlässig abgetrennt werden müssen. In der Literatur werden verschiedene Verfahren vorgestellt, die sich dieser Problematik stellen^[24,25].

2.1.3 Produktions- und Abfallmengen

Von 460 Mio. Tonnen Plastik, die 2019 weltweit produziert wurden, endeten 353 Mio. Tonnen als Abfall, wovon 50 % deponiert und nur 9 % recycelt werden^[26]. Diese erheblichen Mengen an Abfall entstehen durch die überwiegende Verwendung des Kunststoffes für Produkte mit einer relativ kurzen Nutzungs- und Lebensdauer, wie Verpackungen oder Textilien, insbesondere im Bereich der sogenannten Fast Fashion^[23,27]. 2016 umfasste die weltweite Produktionsmenge von PET 82 Mio. Tonnen^[28]. Während davon 66 % zur Herstellung von Fasern genutzt wurden, betrug der Anteil an Verpackungen 28 % und an Polyesterfolien 5 %^[28]. Bei allen drei Anwendungsbereichen handelt es sich um Produkte, die zwar auch als Monomaterialien genutzt werden können, jedoch in den meisten Fällen mit anderen Polymeren, Farben- und Ausrüstungsstoffen kombiniert werden. Dies führt zu erheblichen Mengen an Abfall in unterschiedlichen Qualitäten bzw. Zusammensetzungen. Es gibt nur wenige Abfallfraktionen, die großtechnisch zur Herstellung neuer Produkte recycelt werden. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Getränkeflaschen aus der Pfandsammlung, die entweder für die Produktion neuer Getränkeflaschen oder für die Herstellung von Fasern genutzt werden. So betrug in 2021 der Anteil an recycelten Polyesterfasern lediglich 14,8 %^[23]. Dies hat einerseits ökonomische Gründe, da aktuell die Herstellung aus fossilen Rohstoffen günstiger ist als der Einsatz recycelter Materialien, und andererseits, wie in Kapitel 2.1.2 dargestellt, oft auch technische Gründe, da die Anforderungen an die Rohstoffe zur Sicherstellung der Faserqualität sehr hoch sind^[11,23].