

Industrielle Rezyklate und Verunreinigungen



Diplomarbeit

Matthias Graff



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



Master Thesis

Industrielle Rezyklate und Verunreinigungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung
des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Maria-Vasiliki Archodoulaki
Mitwirkung Projektass. Dipl.-Ing. BSc Lorenz Pinkas Bichler
Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, E308-02-1

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Matthias Graff



Wien, am . . .2024

Unterschrift

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich meine Diplomarbeit mit dem Titel *Recycling von PE und PE* selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass ich alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat bisher in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Wien, den2024

(Matthias Graff)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich meine Diplomarbeit mit dem Titel *Recycling von PE und PE* selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass ich alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat bisher in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Wien, den . . . 2024

(Matthias Graff)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich meine Diplomarbeit mit dem Titel *Recycling von PE und PE* selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass ich alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat bisher in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Wien, den . . . 2024

(Matthias Graff)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich meine Diplomarbeit mit dem Titel *Recycling von PE und PE* selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass ich alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat bisher in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Wien, den2024

(Matthias Graff)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt dass ich meine Diplomarbeit mit dem Titel *Recycling von PE und PE* selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass ich alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat bisher in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Wien, den . . . 2024

(Matthias Graff)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich meine Diplomarbeit mit dem Titel *Recycling von PE und PP* selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass ich alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat bisher in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Wien, den . . . 2024

(Matthias Graff)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich meine Diplomarbeit mit dem Titel *Recycling von PE und PE* selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass ich alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat bisher in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Wien, den2024

(Matthias Graff)

turmaterialeien im Vordergrund standen, wurden Telefongehäuse wie in Abbildung 1.1 rechts, Lichtschalter oder Mikrofone aus dem vorher erwähnten Bakelit hergestellt, Puppen, Messergriffe oder Kugelschreiber aus Zelluloid. Nach dem zweiten Weltkrieg wurden die ersten Kunststoffwaren für deutlich kürzere Lebenszyklen entwickelt. So wurde Nylon, welches zuvor für Fallschirme eingesetzt wurde, nun ebenfalls für Damenstrümpfe verwendet.

Das im Jahre 1933 von Chemikern aus dem Vereinigten Königreich entwickelte Polyethylen war im Zweiten Weltkrieg in Produktionsreife gekommen und vom Kunststoffkonzern DuPont produziert worden. Ein ehemaliger Mitarbeiter dieses Konzerns namens Earl Silas Tupper bekam von DuPont Polyethylen zum Experimentieren. Dieser produzierte damit die erste 'Wonderbowl', ein leichter, bruchsicherer, flexibler, weitestgehend geruchs- und geschmacksneutraler Behälter mit hermetisch schließendem Deckel. Ein Verkaufshit, welcher sich nahtlos in die technischen Errungenschaften im Haushalt einreihete wie Tiefkühler bzw. Kühlschrank, Waschmaschine oder Waschautomat. Mit der 'Wonderbowl' und seiner neuartigen Vertriebsart, den sogenannten 'Tupperparties', wurde Earl Silas Tupper mit seiner Firma 'Tupperware' in der ganzen westlichen Welt berühmt. [6]

Selbst die Verbreitung des Supermarktes hat mit Kunststoff zu tun. Das Selbstbedienungsprinzip, welches zuvor auf Metallkonserven oder Glas angewiesen war, hatte nun auch Kunststoff zur Verfügung. Fleisereien, Bäckereien und Gemüsehändler mit ihrem Frischeangebot hatten durch die Haltbarkeitsverlängerung der Lebensmittel aufgrund von Kunststoffverpackungen immer mehr den Nachteil im Vergleich zu Supermärkten mit dem 'All-in-One' Prinzip.

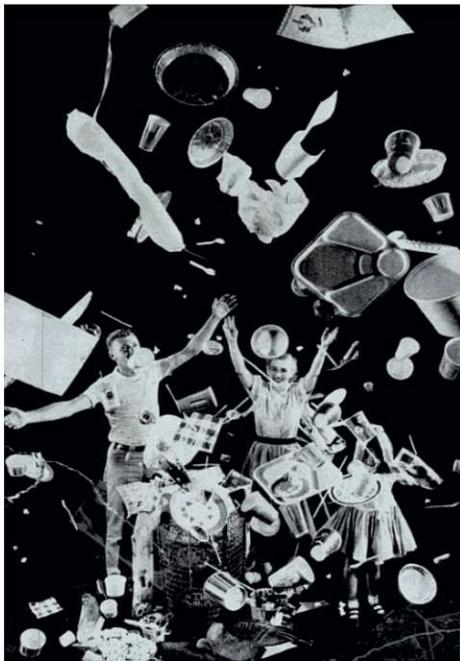


Abbildung 1.1: Rechts: Titelbild zu "Throwawy Living" [7]
Links: Telefon aus Bakelit [8]

Kunststoff als Verpackung in Form eines Wegwerfprodukts mit einem Lebenszyklus von nur einigen Tagen war von der Bevölkerung anfangs sehr in Frage gestellt worden, da Kunststoff, wie zuvor erwähnt, für langlebige, haltbare Produkte stand und auch dementsprechend von der Industrie angepriesen wurde. Im amerikanischen 'LIFE' Magazin vom 1. August 1955 wurde eine neue Ära des Kunststoffes eingeläutet. 'Throwaway Living - Disposable items cut down Household Chores' hieß die Headline, welche unter einem Bild einer Familie, die in Abbildung 1.1 links zu sehen ist, die eine Menge Kunststoff-Wegwerfartikel

durch die Luft schleuderte, prangert. Im Artikel wurden alle möglichen Einwegprodukte wie Teller, Becher, Aschenbecher, Besteck und vieles mehr genannt, welche die Aufräum- und Abwaschzeit drastisch verringern sollten. Die Einwegwindel wurde sogar als Grund des Anstiegs der Geburtenrate in den USA genannt. Dieser Artikel war natürlich kein Zufall, sondern Teil einer gezielten Kampagne. Spätestens nach der Konferenz der 'Society of the Plastic Industry' 1956, auf der man sich offiziell dafür aussprach dem:r Konsument:in die Entbehrlichkeit des Materials zu vermitteln, war der Kampagnencharakter deutlich erkennbar. [9] Ein besonderes Augenmerk in dieser Hinsicht kann auf den Journalisten Lloyd Stouffer gelegt werden, der für das Magazin 'Modern Plastics' schrieb. Dieser sorgte mit dem Satz "the future of plastics is in the trashcan" [10] Section 6-A, Page 1 für Aufsehen, wohl noch unwissend, welches Gewicht seine Worte haben sollten. Damit meinte er natürlich nicht, dass die Kunststoffindustrie zum Scheitern verurteilt sei, sondern, dass das Wachstumspotential der Industrie in der Einwegverpackung liege. Sieben Jahre später, bestätigt durch die Zahlen der Industrie, schrieb er, dass erst, wenn keiner mehr beim Wegschmeißen einer Kunststoffverpackung die Augenbraue zuckt, der "Glückstag" der Industrie erreicht sei. Dies sei, seiner Meinung nach, nur zu erreichen, wenn der Preis des Kunststoffes unschlagbar günstig gegenüber anderen Materialien wie beispielsweise Holz oder Glas sei. [10] Auch dieses Statement hatte Gewicht, wie man in den Produktionsvolumina seit den 1950ern leicht erkennen kann (Abbildung 1.2).

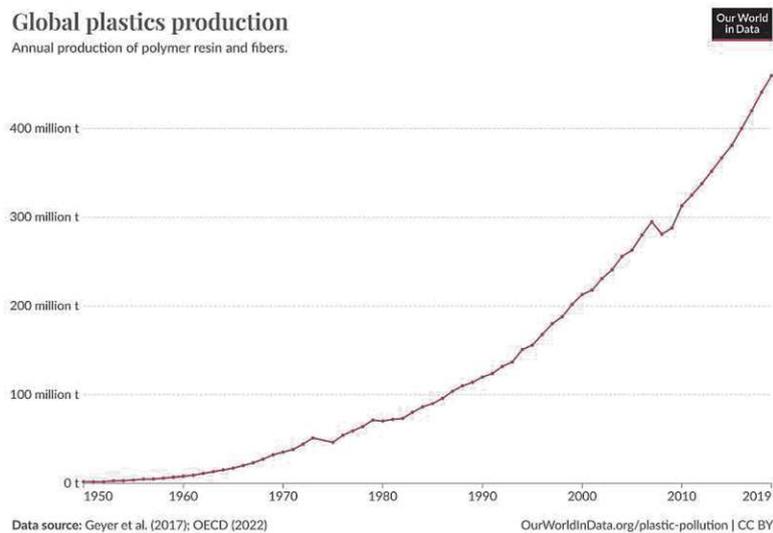


Abbildung 1.2: Die Abbildung zeigt die globale Kunststoffproduktionsmenge seit 1950 [11]

Wie in der oberen Grafik erkennbar, ist Kunststoff mit einem Jahresproduktionsvolumen von fast 460 Millionen Tonnen erfolgreich in alle Lebensbereiche der Menschen eingezogen. Die Eigenschaften des Materials, die den Erfolg ausmachen, sollen in der folgenden Übersicht skizziert werden:

- Ungeschlagene Designvielfalt:
Mit den gängigen Kunststoffverarbeitungsverfahren wie Extrudieren, Kalandrieren, Blasformen, Spritzgießen oder Heißpressen lassen sich klassische Folienverpackungen, extrem filigrane Bauteile, wie beispielsweise Schraubverschlüsse für PET-Flaschen, oder auch riesige gepresste oder gespritzte Freiformteile für Verkleidungen von Maschinen oder Spielzeug herstellen.
- Gute Temperaturbeständigkeit
Schon billige Massenkunststoffe haben einen hohen Temperaturverwendungsbereich. Abwasserrohre aus Polypropylen müssen eine Heißwasserbeständigkeit von 95°C im Langzeittest standhalten und eine gewisse Biegesteifigkeit sowie Schlagzähigkeit bis -20°C vorweisen. [12] Bei Spezialkunststoffen liegt der Verwendungsbereich bei bis zu 150°C.

- Sehr gutes Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht:
Dies ist ein wichtiger Punkt in Bezug auf Einwegverpackungen und vor allem Globalisierung. Die Gewichts-, Preis- und Haltbarkeitsvorteile von in Kunststoff verpackten Waren ist ungeschlagen. Im Durchschnitt macht eine Kunststoffverpackung ein bis drei Prozent des Bruttogewichts eines Produktes aus. Eine 1,5 Liter Flasche wiegt beispielsweise 38 Gramm, ein Jogurtbecher circa 4,5 Gramm. Die Ökobilanz von Kunststoffverpackungen, d.h. die Summe des entsprechenden Energieverbrauchs für Produktion, Transport und Entsorgung sowie anderer Umweltauswirkungen ist oft besser als die von konkurrierenden Materialien. [13]
- Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit:
Durch die richtige Auswahl einer Polymerfamilie kann man widerstandsfähige Materialien in Bezug auf äußere Einflüsse herstellen. Als Beispiel sind säurebeständige Kunststoffe, stark alkalischen Medien Widerstand bietende sowie lösungsmittelbeständige Polymere zu nennen. [14]
- Steifigkeit und Zähigkeit:
Aufgrund guter Steifigkeitswerte, welche sich unter anderem durch materialbedingte Festigkeitswerten ableiten, und wegen des geringem Gewicht können bestimmte Polymerfamilien als Ersatz für metallische Werkstoffe eingesetzt werden. Im Maschinenbau sind hier sind zum Beispiel Führungselemente, Riemenscheiben, Kugellagerkäfige, Lagersitze, Pumpengehäuse und Zahnräder zu nennen.
- Biokompatibilität:
Biokompatibilität bezeichnet Materialien, welche keinen negativen Einfluss aufgrund von Wechselwirkungen auf ihre Umgebung haben. Dazu gehören neben Keramiken und einigen Metallen auch Kunststoffe. Die Biokompatibilität ist vor allem für medizinische Produkte wie Implantate oder medizinische Apparaturen relevant. In weiterem Sinne ist Biokompatibilität auch der Grund, warum Lebensmittel mit Kunststofffolien bedenkenlos verpackt oder Kunststofffasern für Bekleidung verwendet werden können.
- Kostenvorteil gegenüber anderen Materialien (bei großen Losgrößen):
Auch wenn die zuvor besprochenen Punkte schon für die Verwendung von Kunststoff sprechen, ist natürlich der wichtigste Faktor in einer kapitalistischen Gesellschaft der Kostenfaktor. Den größten Kostenfaktor stellt in der Regel die Maschine bzw. das Werkzeug zur Verarbeitung des Kunststoffes dar. Bei Massenkunststoffen wie Polypropylen oder Polyethylen ist der Grundstoff für verarbeitende Betriebe, das Granulat, sehr kostengünstig. Der Verschleiß von Spritzgusswerkzeugen oder Schneiden bei spanender Fertigung ist extrem gering, weshalb die Initialkosten, wie etwa der Extruder und das Spritzgusswerkzeug genannt, bei Kunststoffprodukten zwar hoch, aber die laufenden Kosten sehr gering sind.

1.2 Die Grundstoffe: Ethylen und Propylen

Nun wurde schon mehrmals der Kostenvorteil von Kunststoffen hervorgehoben. Vor allem bei Massenkunststoffen, welche größtenteils als Verpackungsmaterial dienen, muss neben den Gewichtsvorteilen und den damit einhergehenden geringeren Transportkosten und die Verarbeitungsflexibilität auch der Grundstoff dementsprechend günstig im Einkauf sein. Im nächsten Abschnitt werden anhand von Ethylen und Propylen, den Grundstoffen unter anderem für Polypropylen und Polyethylen, diese Aspekte beleuchtet. In Abbildung 1.3 ist ein Ablaufdiagramm dargestellt, wie aus Erdgas bzw. Erdöl die Grundstoffe Ethylen und Propylen für unsere Massenkunststoffe gewonnen werden.

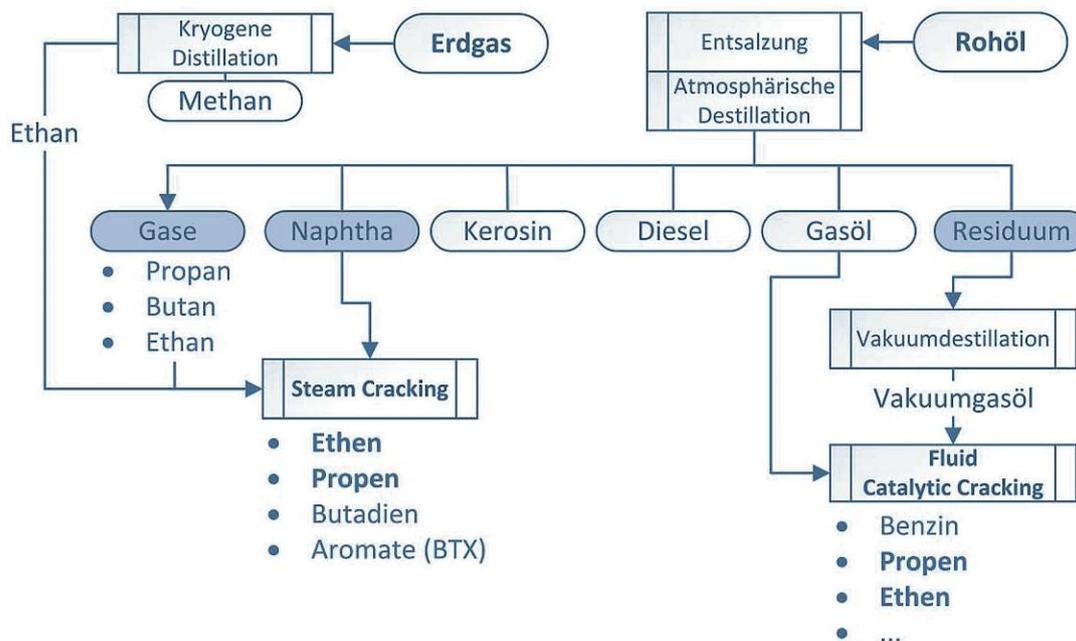


Abbildung 1.3: Vom Rohstoff bis zum Grundstoff - Gewinnung von Propylen und Ethylen

Für Erdöl ist der erste Verfahrensschritt die Erdölrektifikation bei Normaldruck, welche auch atmosphärische Destillation genannt wird. Im Ablaufdiagramm sind alle Fraktionen, welche aus dem Rohöl gewonnen werden, angeführt. Die für die Herstellung von Ethylen und Propylen wichtigen Fraktionen sind das Residuum, Gasöle, Naphtha, eher bekannt unter dem Namen Rohbenzin, und die Flüssiggase, bestehend aus überwiegend Propan und Butan. Die für die Olefine, ein Oberbegriff für Kohlenwasserstoffe mit Kohlenstoff-Kohlenstoff Doppelbindungen, relevanten Fraktionen sind in Abbildung 1.3 nochmal farblich hervorgehoben. [15]

Bei Erdgas wird das aus dem Boden geförderte Gasgemisch durch kryogene Destillation getrennt. Wie der Name schon verrät, handelt es sich hier um einen Prozess bei niedriger Temperatur und zusätzlich hohem Druck, der zur Verflüssigung des Erdgases dient. Anschließend wird das Gemisch in einer Destillationskolonne erhitzt. Durch die verschiedenen Siedepunkte der Bestandteile des geförderten Gases kann das Erdgas erfolgreich in seinen Einzelkomponenten getrennt werden. Je nach Beschaffenheit des Erdreichs des Fördergebiets besteht Erdgas meist zu einem großen Anteil aus Methan und in weiterer Folge aus Ethan, Propan oder Butan. [16] In Abbildung 1.3 wird hier stellvertretend für alle anderen anfallenden Gase neben dem Hauptbestandteil Methan, Ethan angeführt.

Da die Destillation des Erdöls bzw. Erdgases noch nicht das gewünschte Ausgangsprodukt für die Kunst-

stoffherstellung liefert, wird ein weiterer Prozessschritt benötigt. Das sogenannte 'Cracking' dient dazu langkettige Kohlenwasserstoffe bzw. gesättigte Kohlenwasserstoffe in kürzerkettige bzw. ungesättigte Kohlenwasserstoffe zu spalten. Zu den ungesättigten Kohlenwasserstoffen gehören Alkene. Alkene sind beispielsweise Ethen und Propen, welche als Grundstoff für die Erzeugung von Polyethylen bzw. Polypropylen dienen. Die zwei am häufigsten verwendeten Cracking-Verfahren sind das 'Steam Cracking' und das 'Fluid Catalytic Cracking'. 50-60% der Olefine werden weltweit mithilfe des Steamcracking-Verfahrens hergestellt. Die Rohstoffe für den Steamcracking-Prozess sind hierbei Ethen, Propen, Buten und Naphtha.

Im Gegensatz zu Nordamerika, wo mehrheitlich Ethan und Propan aus dem geförderten Erdgas verwendet wird um Ethen und Propen zu produzieren, wird in Europa zum Großteil auf Naphtha zur Herstellung dieser Alkene zurückgegriffen.

Unabhängig vom Grundstoff, welcher dem Steamcracker zugeführt wird, stellt Ethen immer den größten Anteil der erhaltenen Spaltprodukte dar. [17]

Der zweitmeist verwendete Prozess um Olefine zu erhalten ist das sogenannte 'Fluid Catalytic Cracking'. Hierfür wird das Residuum verwendet, das auch als Atmosphärenrückstand bezeichnet wird. Das Residuum beinhaltet immer noch verwendbare Kohlenwasserstoffe, welche durch die sogenannte Vakuumdestillation getrennt werden müssen. Neben den Gasölen, welche der Fluid Catalytic Cracking Anlage zugeführt werden, erhält man Wachsdestillate und den Vakuumsrückstand, welcher als Bitumen weiterverwendet wird. [15] Die Gasöle werden nach dem Vakuumdestillieren dem Cracker zugeführt, wobei je nach Grad der Reaktion Ethen, Propen, Buten und Naphtha, also Rohbenzin, entstehen.

Ein weiterer wirtschaftlicher und aufstrebender Prozess, aufgrund der Verknappung von Rohöl, den damit einhergehenden steigendem Marktpreis und des erhöhten Verbrauchs von vor allem Polypropylen, ist die Propandehydrierung zur Herstellung von Propen. Wie der Name schon verrät, wird bei der Dehydrierung von Propan Wasserstoff abgespalten, sodass Propen und Wasserstoff als Nebenprodukt entstehen. Dieser 'On Purpose' Prozess hatte 2011 einen Marktanteil von ca. 11% und hat mit immer mehr gebauten Anlagen, wie zuletzt die 2022 in Betrieb genommene Anlage in Belgien mit einer Jahreskapazität von 750 000 Tonnen pro Jahr, noch immer Wachstumspotential. [18]

In Hinsicht auf die Herstellung von Olefinen sind nicht nur Erdgas und Erdöl mögliche Rohstoffe. Es gibt auch Ansätze für die nachhaltige Produktion von Olefinen mittels Sythesegas aus biogenen, erneuerbaren Quellen sowie aus Wasserstoff und CO_2 . Dazu zwei erfolgsversprechende Methoden [19]:

- Synthesegas wird zu Methanol umgewandelt, welches anschließend mit dem Methanol-to-Olefins Prozess zu Alkenen umgewandelt wird.
- Die sogenannte Fischer-Tropsch-Synthese bildet längerkettige Kohlenwasserstoff-Fractionen, die anschließend mittels Steamcracker zu den gewünschten Stoffen gespalten werden.

Eine Analyse der TPC (total production cost) der verschiedenen Prozesse zur Herstellung von Olefinen zeigt, dass Erdgas und Rohöl in Sachen Wirtschaftlichkeit immer noch die Vorreiter sind. Als Referenz wurde dabei das Steamcracking Verfahren von Naphtha herangezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass beispielsweise das Steamcracking von Ethan, Dehydration von Propan oder Fluid Catalytic Cracking in der TPC Analyse sogar etwas billiger kommen als das Referenzverfahren. Als billigstes Verfahren hat sich die Gasifikation von Kohle mit anschließender Umwandlung des Synthesegases zu Methanol und des weiteren mittels des Methanol-to-Olefin Prozesses zu den gewünschten Alkenen herauskristallisiert.

Nun muss man beachten, dass der größte Anteil der Kosten der TPC meist die Rohmaterialien sind, was zurzeit noch gegen alternative Verfahren spricht. Die ölverarbeitenden Prozesse haben zwar ebenfalls hohe Rohmaterialkosten, aber die verwendeten Verfahren ergeben, durch die wertvollen, in den Prozessen

entstehenden, Nebenprodukte, wie beispielsweise das Rohbenzin beim Fluid Catalytic Cracking, wieder eine Verminderung der TPC. [20]

Erdgas hat hier eine besondere Stellung. So wurde in den Anfängen der Ölförderindustrie Erdgas als Nebenprodukt beim Fördern von Rohöl einfach verbrannt. Es war der sicherste und wirtschaftlichste Weg aufgrund der hohen Entzündbarkeit des Gases. Es gab natürlich auch keine Infrastruktur um das Erdgas zu transportieren, vor allem da viele Gebiete, wo Erdöl gefördert wurde, sehr abgelegen von jeglicher Zivilisation liegen. Erst in den 1970er Jahren gab es die ersten Verträge zwischen der Sowjetunion und Deutschland zum Bau von Pipelines und der Lieferung von Erdgas nach Westeuropa. Erdgas, welches in den Pipelines transportiert wird, ist Methan. Methan ist aber nur eine von mehreren Fraktionen, welche beim natürlich Erdgas anfallen. Die beim Trennen des Erdgases anfallenden Gase Ethan, Propan und Butan sind Nebenprodukte. Das bedeutet, dass, solange Erdgas in großen Mengen gefördert wird, auch die Nebenprodukte in großen Mengen zur Verfügung stehen. Das ist ein weiterer Grund, warum die Verwendung der nicht nachwachsenden Rohstoffe in der Kostenfrage bei der Herstellung von Olefinen das zurzeit wirtschaftlichste Modell darstellt. In weiterer Folge ist dadurch auch die Konkurrenzfähigkeit von recyceltem Kunststoff im Gegensatz zu neu hergestelltem Granulat aus wirtschaftlicher Sicht oft nicht gegeben. [21]

1.3 Zahlen, Fakten und neuzeitliche Probleme

Im folgenden Abschnitt werden kurz allgemeine Zahlen und Fakten zu Kunststoffen dargestellt sowie die Probleme, die sich mit dem neuartigen Werkstoff und dessen inflationäre Verwendung entwickelt haben. Die Kunststoffproduktion verzeichnet ein kontinuierliches Wachstum, da die Nachfrage, vor allem an Wegwerf- bzw. Einwegkunststoffen stetig steigt, wie unschwer in Grafik 1.2 zu erkennen ist. Seit den 1960er Jahren hat sich die Kunststoffproduktion um mehr als das Zwanzigfache erhöht und erreichte im Jahr 2022 eine Jahresproduktionsmenge von über 400 Megatonnen. Wie bereits im Abschlussatz des vorigen Abschnitts erwähnt, ist die Polymerproduktion mit Grundstoffen fossilen Ursprungs der zurzeit wirtschaftlichste Prozess. Dies ist klar in den Daten der Abbildung 1.4 zu sehen. Denn von den weltweit produzierten 400 Megatonnen Polymeren sind über 90% aus fossilen Grundstoffen, also Erdöl oder Erdgas, hergestellt. Die Recyclingquote, das heißt der Anteil aus gesammeltem und sortiertem Material, das zu verarbeitbarem Granulat wiederverarbeitet wird, liegt weltweit lediglich bei 8,9%. In Europa liegt dieser Wert bei 18,5% und bezieht sich auf das Regranulat, welches in Europa wieder in Umlauf kommt und verarbeitet wird. [22] Zusätzlich wird die Recyclingquote in 'post consumer' (nach Verbraucherabfall) und 'pre consumer' (innerbetriebliche Ausschuss) unterteilt. Die post consumer Quote in Europa, also der Anteil an recyceltem Material aus dem öffentlichen Abfallstrom, liegt bei 12,9%. Die restlichen 5,6% sind innerbetriebliche Ausschussquoten, welche gehäckselt bzw. zerkleinert und dem frischen Kunststoffgranulat wieder beigemischt werden. [23] Die Anteile der chemisch recycelten bzw. aus biogenen Quellen gewonnenen Monomere sind verschwindend gering, wobei man erwähnen muss, dass beide Technologien noch im Aufbau und zurzeit für Massenproduktion unwirtschaftlich sind. Im Zuge des europäischen Green Deals soll eine Recyclingquote der Kunststoffverpackungsabfälle von 55% angestrebt werden.

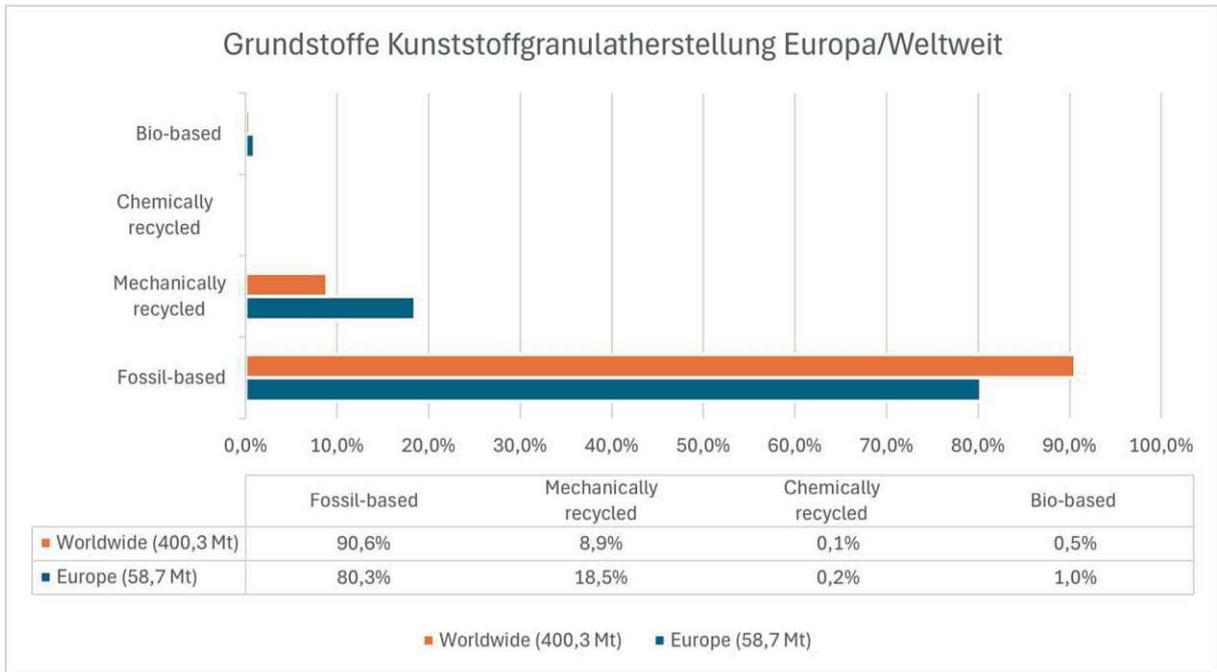


Abbildung 1.4: Insgesamt produzierter Kunststoff sowie dessen Ausgangsstoffe in Millionen Tonnen in Europa und weltweit (2022) [23]

In Abbildung 1.5 ist eine zusätzliche Aufschlüsselung der europäischen Kunststoffproduktion zu sehen. Im linken Diagramm wird gezeigt, welche Polymere aus der Gesamtproduktion von 58,7 Megatonnen produziert werden. Polypropylen, Polyethylen-High Density, -Medium Density, -Linear Low Density, -Low Density und Polyvinylchlorid kommen auf einen Marktanteil von über 46%. Diese haben gemeinsam, dass zu ihrer Erzeugung die zugrunde liegenden Ausgangsstoffe Ethen und Propen sind, welche ebenfalls die höchsten Ausbeuten bei den beleuchteten Cracking Prozessen haben. Zu erwähnen ist hierbei, dass zur Herstellung von Vinylchlorid, das Monomer für Polyvinylchlorid, ebenfalls zum Großteil Ethen benötigt wird.

Im rechten Diagramm der Abbildung 1.5 ist die Aufteilung der Verwendung der hergestellten Kunststoffe zu sehen. Hier sieht man, dass der größte Anteil des produzierten Polymere mit 39% als Verpackung verwendet werden. In dieser Zahl liegt auch das Problem der heutigen Zeit: Kunststoff, ein Hightech-Material, welches durch seine inerten Eigenschaften, welche aus technischer Sicht viele Vorteile bringen, kann nicht vollständig abgebaut werden, er zerfällt stattdessen nur in immer kleinere Partikel. Diese kleinsten Partikel werden als Mikroplastik bezeichnet.

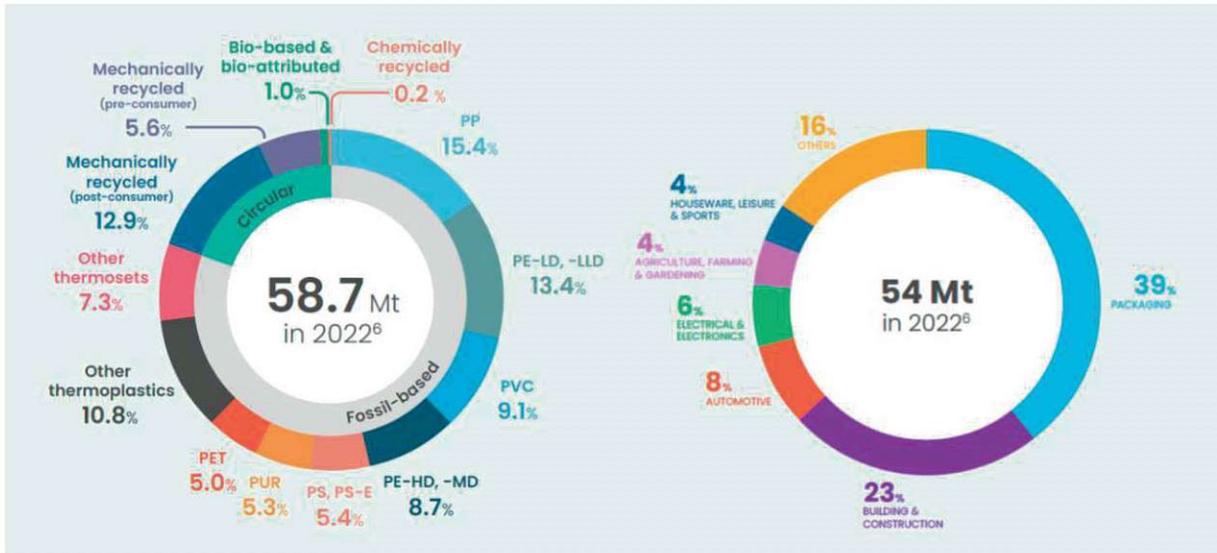


Abbildung 1.5: Prozentuale Anteile der Kunststoffsorten (rechts) sowie Kunststoffverwendung(links) in Europa [23]

1.4 Abfallströme

Die global produzierten Mengen an Kunststoff fallen früher oder später als Abfall an. In den Analysen der Kunststoffabfallströme in Deutschland, welche von der Zusammensetzung her der der restlichen europäischen Staaten ähneln, bestimmen ca. 70% des Abfalls fünf verschiedene Thermoplaste, welche im folgenden, geordnet nach Häufigkeit, aufgelistet werden: [24]:

- Polyethylen PE
- Polypropylen PP
- Polyvinylchlorid PVC
- Polyethylenterephthalat PET
- Polystyrol PS

Alle erwähnten Kunststoffe, außer Polyvinylchlorid, erfreuen sich in der Verpackungsindustrie großer Beliebtheit. Sobald Kunststoffprodukte das Ende ihres Lifecycles erreicht haben, beginnt das sogenannte 'End-of-Life Management'. Hier gibt es in der europäischen Union drei Möglichkeiten des Abfallhandlings [25]:

- 42,6% des Kunststoffmülls werden zur Energierückgewinnung verwendet, das heißt, thermisch verwertet,
- 24,9% der Abfälle werden in Deponien entsorgt und
- 32,5% werden recycelt. Wovon, wie in Abbildung 1.4 gezeigt, nur knapp 19% wieder in Europa als Regranulat auf dem Markt abgesetzt werden. Der Rest wird in nicht europäischen Ländern, als Müllexport, recycelt.

Hier sei noch zu erwähnen, dass über 30 Millionen Tonnen Abfall, in diesem Fall nicht nur Kunststoff, von der europäischen Union in Drittstaaten zur Weiterverwertung transportiert werden. Die Hauptabnehmer sind die Türkei, Ägypten, siehe Abbildung 1.6, und Indien. Bis vor wenigen Jahren war China der größte

Kunststoffmüllabnehmer der europäischen Union. Schon in den 1990er Jahren wurde Kunststoffmüll nach China verschifft, welcher dort verwertet wurde. Das war nicht nur für die europäische Union sondern für die gesamte westliche Welt eine angenehme Möglichkeit den durch die ungebrochene Nachfrage nach Einwegplastik und die einhergehenden 'Müllberge' zu managen. Die Volksrepublik China hat aber bereits 2010 das erste Mal reagiert und die Einfuhrregeln für Müll geschärft und Verunreinigungsobergrenzen des importierten Mülls festgelegt. Die Regeln wurden immer weiter verschärft, bis China 2017 den kompletten Handelsstopp für Müllimporte ausrief.



Abbildung 1.6: Manshiyyet Nasser - die Müllstadt in Kairo. Hier wird nicht nur nordafrikanischer Müll sortiert [26]

Dies war offensichtlich ein Schlag für die meisten mülexportierenden Länder, da die Infrastruktur für Müllmanagement, insbesondere Kunststoff, nicht gegeben war bzw. ist. [27] Die sich dadurch ergebene erste Reaktion war, dass der Müll zu erhöhten Anteilen in die thermische Verwertung wanderte bzw. auf Deponien landete. Nun ist die thermische Verwertung von vor allem Polypropylen und Polyethylen relativ unproblematisch, da die Verbrennung von zumindest reinem Polyethylen bzw. Polypropylen weder giftige Dämpfe bzw. Verbrennungsrückstände hinterlässt, aber für einen enormen Treibhausgasausstoß verantwortlich ist, welcher in Folge des europäischen Green Deals ebenfalls unerwünscht ist. Durch Farbstoffe, Schmiermittel bzw. Stabilisierungsadditive können aber durchaus giftige Abgase beim Verbrennen entstehen. Die Deponielösung ist aufgrund der enormen Mengen an entstehendem Müll allein aufgrund von Platzproblemen und natürlich der einhergehenden unvermeidbaren Ausbringung des Kunststoffes in die Natur nicht in Betracht zu ziehen. Daher ist die vorübergehend einzige Antwort die Verlängerung des Nutzungszylkluses durch Kreislaufwirtschaft und das recyceln des anfallenden Kunststoffabfalls. Die EU-Kommission hat im Januar 2018 prompt die europäische Plastik-Strategie adaptiert. Grundsätzlich zielt die Kunststoffstrategie, wie oben beschrieben, darauf ab Kunststoffverschmutzung der Umwelt insbesondere der Meere zu reduzieren, Treibhausgase einzusparen und durch Recycling und alternative Technologien auf importierte fossile Rohstoffe zur Herstellung zu verzichten. Außerdem soll den Konsumenten ein wertschätzender Umgang mit Kunststoff vermittelt werden. [28]

Angesichts der Probleme und Gefahren werden die gesetzten Anreize der EU durch wenige Richtlinien von einigen Institutionen als zu lasch eingestuft, wie beispielsweise Verbote von Kunststoffstrohhalm und anderen wenigen Einwegprodukten, die Verwendung von Rezyklaten in Einwegkunststoffverpackungen und die Einbeziehung der Hersteller an Reinigungsmaßnahmen. Vor allem, da wie oben schon angemerkt

nicht die produzierenden Konzerne, sondern die Verbraucher:innen in den Fokus zur Vermeidung von Kunststoff rücken. Das Institut für Forschung für Nachhaltigkeit im Auftrag des deutschen Bundesministeriums für Bildung und Forschung kommuniziert in seiner Publikation, dass eigentlich die Reduzierung der Kunststoffproduktion und die intensive und kritische Auseinandersetzung mit dem Thema 'Wo kann Kunststoff sinnvoll durch andere Systeme ersetzt werden' das Gebot der Stunde ist. Dies reicht von ordnären Ansätzen der Kreislaufwirtschaft und Recyclen über gesamtgesellschaftliche Suffizienzdebatten bis zu regionalen sozialökologischen Versorgungssystemen, wo ein Einsatz von Einwegverpackung zur Haltbarmachung obsolet werden, da dort produziert wird, wo auch konsumiert wird. [29] Sieht man zum Beispiel nach Nordamerika, wo große Mengen Ethan als Beiprodukt beim Fracking anfallen, und dementsprechend viel Geld von Ölkonzernen in Gascrackinganlagen, auch Ethengeneratoren genannt, zur Herstellung von Ethen investiert wird, klingen die zuvor erwähnten Forderungen zur Kunststoffproduktionsreduzierung wie ein Wunschtraum. [30]

1.5 Aktuelle Probleme

Nicht nur die Tatsache, dass China den europäischen Kunststoffmüll nicht mehr kauft und die weiterhin wachsende Kunststoffindustrie mit den einhergehenden Produktionssteigerungen sind Gründe, warum ein Umdenken bezogen auf den Umgang mit dem Werkstoff stattfindet. Es ist von größter Relevanz, Abfallströme zu leiten, um 'mismanaged waste', also nicht verwalteter Müll und dessen Einbringung in die Natur, zu verringern, um Ökosysteme, Lebewesen und schlussendlich auch den Menschen zu schützen. Das Recycling von Kunststoff ist in diesem Zusammenhang ein integraler Bestandteil. Die Problematik wurde sehr treffend vom Chemiker Tony Andrady des amerikanischen Research Triangle Institute formuliert:

“Every little piece of plastic manufactured in the past 50 years that made it into the ocean is still out there somewhere.” [31]

Man geht davon aus, dass vom gesamten Plastikmüllaufkommen der Welt circa 10% auf direktem oder indirektem Weg den Weltmeeren zugeführt werden. In Publikationen dazu angeführte Zahlen reichen von 9-23 Millionen Tonnen für das Jahr 2016. Etwa 80% des Kunststoffmülls in den Ozeanen wird am Festland 'entsorgt' und gelangt über Umwege wie Flussysteme ins Meer, der Rest des Plastikmülls wird durch maritime Tätigkeiten, wie Fischerei, verursacht. Die einhergehenden Analysen der Zusammensetzung des Kunststoffabfalls in den Weltmeeren deklariert einen Anteil von fast 50% als Einwegverpackungen. Neben der Art des Kunststoffmülls wird dessen Größe analysiert, welcher in drei Hauptkategorien klassifiziert wird [32]:

- Makroplastik: Alle Bestandteile, die eine Ausdehnung von größer 25 Millimeter aufweisen
- Mesoplastik: Kleinteile mit einer Ausdehnung zwischen 5 und 25 Millimeter
- Mikroplastik: Der wohl bekannteste Vertreter dieser Unterteilung steht für alle Bestandteile kleiner als 5 Millimeter. Bei Mikroplastik wird weiters unterschieden in:
 - Primäres Mikroplastik: Beschreibt alle Kunststoffartikel, welche als fertiggestelltes Produkt unter die Kategorie Mikroplastik fallen. Hier sind beispielsweise Reibkörper in Kosmetikartikeln anzuführen.
 - Sekundäres Mikroplastik: Darunter versteht man Mikroplastik, welches durch die Zerteilung, in welcher Form auch immer, eines größeren Kunststoffobjekts anfällt. Hier ist als Beispiel der Abrieb von Mikroplastikpartikeln durch Verschleiß zu nennen.

1.6 Gefahren

Kunststoffe zersetzen sich nur langsam durch Prozesse wie Fotodegradation, thermooxidative Degradation und hydrolytische Degradation. Diese Prozesse sind hauptsächlich für die Bildung von sekundärem Mikroplastik verantwortlich. Chemische Zusätze, also Additive, in Kunststoffen können während der Zersetzung in die Umwelt gelangen und zusätzliche Gefahren verursachen. Plastik, insbesondere Mikroplastik, kann persistente organische Schadstoffe (POPs) wie DDT, PCB und Dioxine aus der Umwelt aufnehmen und durch Meeresströmungen über weite Strecken verteilen, wodurch es unterschiedlichste Ökosysteme erreicht. Eine Studie von 2017 zeigte, dass 84 Prozent der Müllproben aus dem Nordpazifik mindestens eine Chemikalie in schädlicher Konzentration enthielten. [33] Viele Meereslebewesen wie Seevögel und Meeressäuger verheddern sich in Kunststoffteilen, was ihre Beweglichkeit und Überlebenschancen verringert. Mikroplastik und größere Kunststoffteile schaden nicht nur dem Meeresleben, sondern auch Landtieren, die Kunststoffe über die Nahrung aufnehmen. Einige Meereslebewesen, wie Meeresschildkröten, nehmen Kunststoffteile aktiv auf, weil es ihrer Nahrung ähnelt, während andere, wie planktivore Fische und Seevögel, Kunststoffpartikel unabsichtlich verschlucken. Mikroplastik wird von Organismen auf allen Ebenen der Nahrungskette aufgenommen, da es ähnliche Größen wie ihre Nahrung hat und in allen Tiefen des Ozeans vorkommt. Die Aufnahme von Kunststoffpartikeln ist besorgniserregend, da Chemikalien in den Blutkreislauf gelangen und verschiedene Gewebe und Zellen schädigen können. Diese Chemikalien können sich durch die Nahrungskette bioakkumulieren und größere Fische sowie den Menschen erreichen. Zudem kann Kunststoffmüll, durch dessen Akkumulation zu sogenannten schwimmenden Müllinseln im Meer, natürliche Prozesse wie die Photosynthese beeinträchtigen und Ökosysteme, einschließlich deren Wärmeregulierung, stören. Menschen sind nicht gefeit gegen die Aufnahme von Plastikpartikeln und die damit verbundenen Chemikalien. Mikroplastik wird durch den Verzehr von Lebensmitteln aufgenommen. Die Auswirkungen von Mikroplastik auf die menschliche Gesundheit sind noch nicht vollständig geklärt, aber es gibt Hinweise darauf, dass chronische Exposition das Immunsystem und das Hormonsystem stören kann. [34] Auch das Vorhandensein von Mikroplastik in menschlichen als auch tierischen Arterien ist mittlerweile bewiesen und könnte eine Verbindung zur Arterienverkalkung darstellen, welche die häufigste krankhafte Veränderung der Arterien darstellt. [35] Die Produktion und Verbrennung von Kunststoffen verursacht Kohlendioxid und ist somit in Hinsicht auf den menschengemachten Klimawandel problematisch. [34]

1.7 Abfallmanagement

In Europa gilt das sogenannte 'Waste Framework Directive', welches die grundsätzlichen Konzepte wie mit dem in Europa anfallenden Müll umgegangen werden soll, beschreibt. In Abbildung 1.7 ist eine Hierarchie des Müllhandlings, ähnlich der Ernährungspyramide, gezeigt, welche die Präferenzen der Entsorgung darstellen. Laut dieser Richtlinie ist die Müllvermeidung der wichtigste Punkt, gefolgt von der Wiederverwendung. Der Punkt Wiederverwendung trifft unter anderem Elektronikprodukte, welche man heutzutage gern unter dem Attribut 'refurbished' am Markt wieder findet. Anschließend ist der Punkt Recycling oder auch regenerative Abfallverwertung zu finden, um die sich auch diese Diplomarbeit dreht. Hier ist vor allem bei Kunststoffen das Ziel downcycling zu minimieren und upcycling bzw. recycling zu forcieren. Unter Recovery versteht man die anteilmäßige Verwertung von Produkten. Auch hier sind wieder Elektronikprodukte zu nennen, wo wertvolle Materialien extrahiert werden. Der kleinste Anteil des Mülls soll natürlich auf Deponien landen. Außerdem wird mit der Richtlinie das „Verursacherprinzip“ und die „erweiterte Herstellerverantwortung“ größere Verantwortung für herstellende Unternehmen eingeführt. [36]



Abbildung 1.7: Kunststoffabfallverwertung [22] und Müllhandhabungspyramide laut der EU Direktive [36]

Weiters werden von der europäischen Union Prinzipien der Abfallwirtschaft umrissen:

- Es soll weder die menschliche Gesundheit noch die Umwelt belastet oder geschädigt werden.
- Es soll keine Gefahr für Wasser, Luft, Pflanzen und Tiere darstellen.
- Belästigung durch Geräusche oder Geruch soll vermieden werden.
- Es soll die Landschaft oder Orte von besonderem Interesse nicht beeinträchtigen.

1.8 Recycling

Um einen kurzen Überblick zu bekommen, wie eine Kunststoffsortieranlage grundsätzlich funktioniert, folgt eine Aufzählung der Prozessschritte. Es kommt natürlich auf die Recyclingbetriebe und auf den Fokus dieser an, welche Anlagen betrieben bzw. benötigt werden. Grundsätzlich sind vor allem beim post consumer Kunststoffmüll folgende Prozessschritte zur Trennung und Aufbereitung usus [37]:

- Manuelle Sortierung z.B. zur Entfernung großer Störstoffe wie Blechteile
- Zerkleinerungs- und Aufschlussanlagen wie Ballenauflöser, De-Labeler, Shredder
- Diverse Siebe zur Sortierung nach Größe
- Trocken- und Nassdichtentrennungsverfahren wie Schwimm-Sink-Trennung, Windsichtung, ballistische Separation von beispielsweise Hohlkörpern und flachen Partikeln
- Metallabscheidung durch Magnet- oder Wirbelstromaggregate
- Optische Sortierung
- Nahinfrarot Sortierung
- Laserspektroskopische Sortierung
- Waschanlagen
- Trockenanlagen

Mit Hilfe der aufgezählten Prozessschritte und einer intelligenten Vernetzung dieser ist ein hoher Automatisierungsgrad der Müllsortierung und eine Trennung in unterschiedliche Kunststofffraktionen möglich.

1.9 Recycling von Polyethylen und Polypropylen

In der Literatur und vielen Aufschlüsselungen von Kunststoffsortieranlagen wird die Möglichkeit der Sortierung in verschiedene Kunststofffraktionen aufgezeigt. Es ist bekannt, dass nur bei PET-Produkten bzw. Flaschen ein signifikanter Anteil der produzierten Waren aus bzw. anteilig aus recykliertem PET-Material besteht, wie in Grafik 1.8 dargestellt. Bei PE- bzw. PP-Produkten ist der Rezyklatanteil aus Konsumabfällen mit maximal 7%, außer bei HDPE, sogar geringer als die wiederverwendeten Industrieabfälle. Industrieabfälle bestehen meist aus Ausschusswaren bei der Herstellung der Kunststoffprodukte selbst. Der Vorteil ist, dass sorten- und farbreiner 'Müll' anfällt, welcher ohne große Probleme dem Herstellungsprozess zugeführt werden kann.

Recycling-Anteil bei Plastik

Anteile nach Kunststoffsorten in Prozent (gerundet)

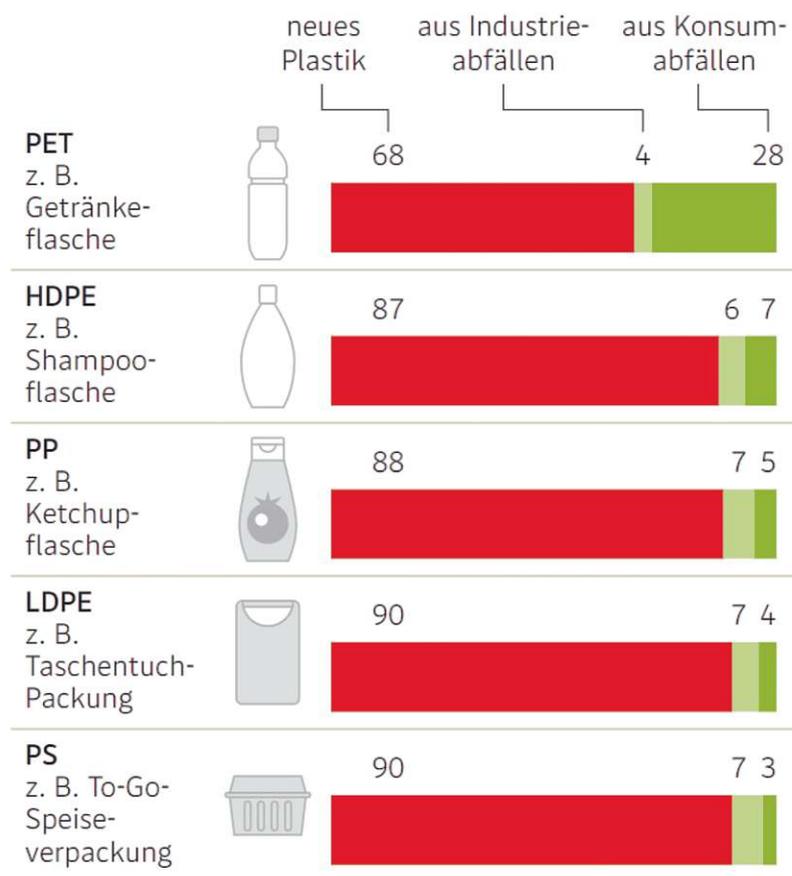


Abbildung 1.8: Recyclinganteile nach Kunststoffart (2018) [38]

Nun stellt sich die Frage, warum PET um ein vielfaches mehr recycelt wird als PE bzw. PP. Obwohl diese den größten Anteil an Einwegverpackungen ausmachen. Welche Probleme ergeben sich beim Recycling dieser Stoffe?

Grundsätzlich liegt die Wurzel des Problems in der Aufbereitung und der Qualität des recycelten Materials. PET kann aufgrund des chemischen Aufbaus um ein Vielfaches besser recyclet werden. Es wird beispielsweise in sogenannten 'Solid State Polymerization' Prozessen eine erneute Polymerisation durchgeführt, um eine Erhöhung der Molmassenverteilung und eine verbesserte Wiederverarbeitbarkeit zu erzielen. [39] Da der Prozess bei Temperaturen von ca. 220°C und zumeist in Vakuum abläuft, ist die-

se Aufbereitungsart auch für die Dekontamination des Materials zuständig. Dieser Prozessschritt, neben beispielsweise Waschen in ätzenden Medien und Extrudieren in einem Vakuumentruder erlaubt es, PET-Kunststoffflaschenmüll nach dem Recycling wieder für Kunststoffartikel, welche mit Lebensmitteln in Kontakt kommen, zu verwenden. Die Risiken im Zusammenhang mit der Verwendung von recycelten Kunststoffmaterialien, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen, ergeben sich aus der möglichen Migration von Chemikalien in das Lebensmittel in Mengen, die die menschliche Gesundheit gefährden könnten. [40] Das bedeutet man hat bei PET-Flaschen bereits eine Möglichkeit gefunden Verpackungsmüll von Lebensmittel so zu recyceln, dass es wieder für Lebensmittelverpackungen eingesetzt werden kann.

Bei Polyethylen und Polypropylen ist das aufgrund einiger Punkte nicht so einfach möglich:

- Im Gegensatz zu PET, bzw. PET-Flaschen, ist PE- und PP-Müll nicht ganz so trivial in 'Foodgrade' und 'Non-Foodgrade' Verpackungen zu unterscheiden. 'Foodgrade'-Verpackungen bestehen aus Kunststoffen, die gemäß der EU-Verordnung 10/2011/EU für den Lebensmittelkontakt zugelassen sind. Im Rahmen der Zulassung, die verschiedene Untersuchungen unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen umfasst, wird überprüft, ob das Material, das mit Lebensmitteln in Kontakt steht, Chemikalien freisetzt bzw. diese in das Lebensmittel migriert und ob diese eine potenzielle Gefahr für Menschen darstellen. Die Müllzusammensetzung ist um einiges komplexer, da PE und PP viel universeller eingesetzt werden. So werden von Kunststoffkanister für Gefahrgut und Hygieneartikelverpackungen aus HDPE, Folien für Lebensmittelkontakt und Etiketten aus LDPE bzw. PP, Takeawayverpackungen aus PP hergestellt um einige wenige Einwegverpackungen zu nennen. Dazu kommen natürlich noch langlebigere Artikel wie Bauteile in der Technik und im Bau sowie Spielzeuge aus diesen Kunststoffen, welche im Müll landen.
- Ein großes Problem liegt auch in der Dichtentrennung von Polyethylen und Polypropylen. Beide Kunststoffe, sowie ihre Variationen, haben eine ähnliche Dichte von $0,9\text{ g/cm}^3$ bis circa 1 g/cm^3 , was die beliebte Schwimm-Senkentrennung der beiden Kunststoffe nicht möglich macht bzw. eine sortenreine Trennung erschwert.
- Die für Unternehmen teure manuelle optische Vorsortierung wird vor allem für die Sortierung von Hohlkörpern wie Kanister oder beispielsweise Eiverpackungen verwendet.
- Bei der Windsichtung werden leichte Kunststoffe von schweren getrennt. Da Etiketten und Labels oft aus PP oder PE bestehen, kann man hier auch keine sortenreine Trennung der beiden Kunststoffe sicherstellen.
- Nahinfrarot und Laserspektroskopie funktionieren zwar sehr zuverlässig, aber auch hier ist das Problem, dass 'Foodgrade' und nicht 'Foodgrade' Kunststoff vermischt werden.
- Beim Waschen mittels Waschlauge erzielt man bei PE und PP schlechtere Ergebnisse in Bezug auf Dekontamination von Mikroorganismen als beispielsweise bei PET [41]
- Im Gegensatz zu PET kann bei PE und PP keine erneute Polymerisation durchgeführt werden um die mechanischen und verarbeitungstechnischen Eigenschaften zu verbessern. Das bedeutet, dass das Wiederverarbeiten dieser Thermoplaste immer auch noch mit einer zusätzlichen Degradation verbunden ist.

Durch die gerade angeführten Punkte ist ersichtlich, dass 'foodgrade' to 'foodgrade' Verpackungen zurzeit nur vereinzelt in sogenannten 'Closed Loop Systems' verwirklicht werden können. Denn nur hier ist zu

garantieren, dass keine ungewollten Additive, Druckertinte oder gefährliche Verunreinigungen zu erwarten sind. Das bedeutet auch, dass Regranulat zum Teil immer ein downcycling darstellt, da foodgrade Verpackungen im post consumer Müll aktuell zwangsläufig downgecyclt werden müssen. Trotz alledem muss eine Verlängerung des Lebenszyklus des Einwegplastiks, insbesondere von PE und PP, forciert werden bevor es, zumindest in Europa, thermisch verwertet wird. Einen kleinen Beitrag dazu soll diese Arbeit geben, wo verschiedene Fraktionen von sortiertem PE- und PP-Abfall vor allem in Bezug auf mechanische Kennwerte untersucht und mit einer Modellserie aus virgin Kunststoffen nachgebildet werden sollen.

1.10 Erwartungen

Das Hauptaugenmerk der Arbeit liegt in der mechanischen Prüfung und thermischen Analyse von Polyethylen sowie Polypropylen Sortierungen. Die getesteten Kunststoffe teilen sich in zwei Gruppen auf, eine Modellserie und eine Recyclingserie. Die Modellserie soll eine vereinfachte Nachstellung der zur Verfügung gestellten Polyethylen- bzw. Polypropylensortierung der Recyclingserie darstellen. Diese ist notwendig, da Recyclingprozesse zurzeit nie ein zu 100% sortenreines Ergebnis liefern können. Neben einer bestimmten nicht vermeidbaren Fehlerquote der Vorgänge kommen Multilayer-Kunststoffe bzw. beabsichtigte Kunststoffblends als Kontamination dazu. Zusätzlich ist bekannt, dass bei Polyethylen- bzw. Polypropylensortierung jeweils der andere Kunststoff den größten Anteil der Kontamination ausmacht. Die einzelnen Materialmischungen der Modellserie bestehen demnach aus zwei virgin Kunststoffen, wobei ein Kunststoff als Hauptmaterial und der zweite Kunststoff zur absichtlichen Kontamination verwendet wird. Das soll ähnliche Kontaminationsverhältnisse wie beim Sortieren des Kunststoffabfalls nachstellen. Das Ziel der Arbeit ist zu untersuchen, ob sich bei den thermischen Analysen sowie den mechanischen Prüfungen Korrelationen zwischen der Modellserie und der Recyclingserie finden lassen. Außerdem soll die Materialdegradierung bei Mehrfachverarbeitungen beider Serien beschrieben werden. Die Materialien der Recyclingserie liegen zusätzlich in verschiedenen Konfigurationen vor, z.B. als heiß- und kaltgewaschene Sortierungen. Das bedeutet, dass die sortierten und mittels Schredder zerkleinerten Flakes entweder mit heißem oder kaltem Wasser gereinigt wurden. Zusätzlich wurden neben den Flakes auch lieferantenseitig hergestellte Granulate aus den selben Chargen bereitgestellt. Weiters sollen verarbeitungstechnische Unterschiede zwischen den Flakes und den Granulaten sowie das Degradierungsverhalten aufgrund der Mehrfachverarbeitungen der Materialien durch mechanische Prüfung und thermische Analyse untersucht und beschrieben werden.

Kapitel 2

Methoden und Materialien

2.1 Materialien

Im folgenden Abschnitt werden die verwendeten Materialien beschrieben. Grundsätzlich lassen sich die geprüften Kunststoffe in zwei Obergruppen darstellen, die Recycling- und die Modellserie. Wobei die Modellserie zusätzlich in eine Haupt- und Miniserie unterteilt ist. Die Miniserie unterscheidet sich zur restlichen Modellserie dadurch, dass die mechanische Prüfung ausgelassen und nur eine thermische Analyse durchgeführt wurde. Im Bild 2.1 sieht man eine grundsätzliche Übersicht aller verarbeiteten Materialien grafisch aufbereitet.

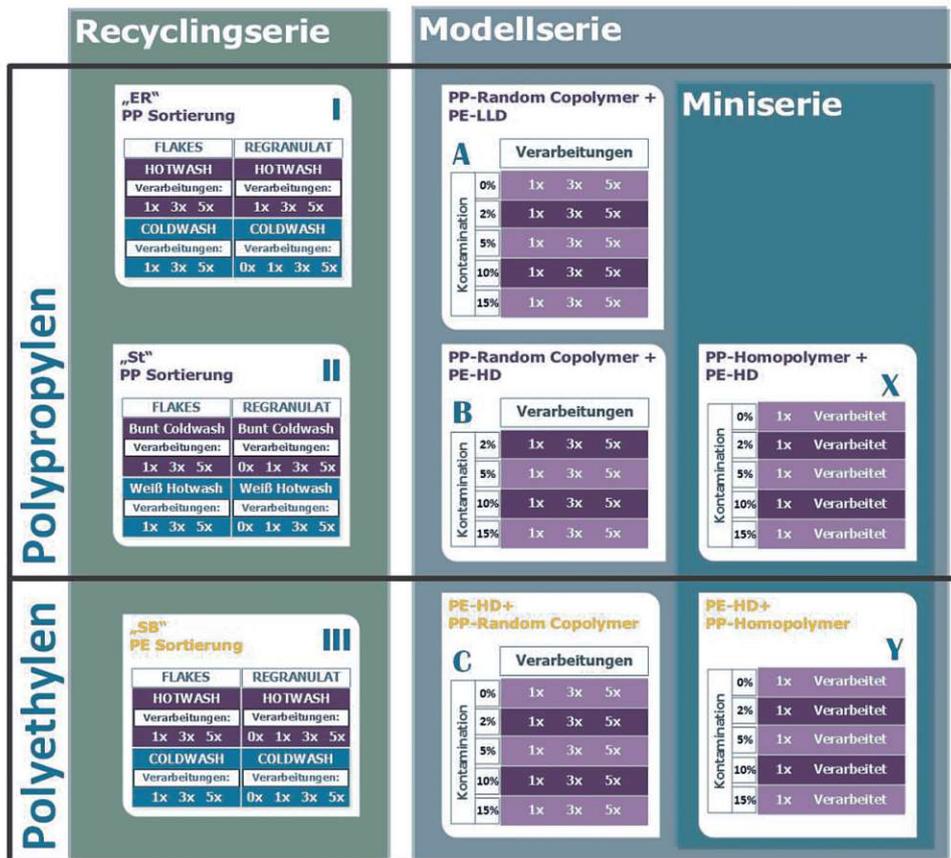


Abbildung 2.1: Übersicht der verarbeiteten Materialien

2.1.1 Blends

Für die Modellserie bzw. die Miniserie wurden verschiedene Blends hergestellt. Diese bestehen aus einem Hauptmaterial und einem Kontaminationsmaterial. Die dazu verwendeten virgin Materialien werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Virgin Materialien

Die Auswahl der virgin Granulate wurde vom Institut vorgegeben und stellen typische Kunststoffsorten dar, welche häufig in Abfallströmen zu finden sind und dementsprechend oft für Einwegverpackungen aus Polyethylen bzw. Polypropylen verwendet werden.

Polypropylengranulate

Polypropylen Random Copolymer: Das Polypropylen Random Copolymer erhielt diesen Namen, aufgrund der Zugabe von Ethylen bei der Copolymerisation mit Propen und den dadurch entstehenden unregelmäßig angeordneten Ethylen- und Propyleneinheiten. Umso höher der Ethylengehalt, desto geringer ist die Kristallinität und somit auch Steifigkeit und Sprödigkeit. Dafür ergeben sich bessere Flexibilität und Schlagzähigkeit. Das Material wird vor allem mittels Blasfolienextrusion und Gießfolienextrusion verarbeitet. Die Anwendungsgebiete liegen im Verpackungsbereich. Da es auch für Lebensmittelkontakt geeignet ist, sind auch Folienverpackungen für beispielsweise Obst und Gemüse möglich. Eckdaten des verwendeten Granulats siehe Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Technische Informationen Borealis RB707CF

Polypropylen Random Copolymer	
<i>Hersteller & Bezeichnung</i>	Borealis RB707CF
Abkürzung	PP-RCP
Dichte	900 – 910 kg/m^3
MFR*	1,5 $g/10min$
Schmelzpunkt	145 °C

*Melt Flow Rate (230 °C/2.16kg)

Polypropylen Homopolymer: Das Homopolymer wird durch Polymerisation von reinem Propen gewonnen. Die Anwendungsgebiete für dieses Granulat reichen von Milchproduktverpackungen bis Geotextilien und aller Art dünnwandiger Verpackungseinheiten. Es wird vor allem mittels Thermoformverfahren verarbeitet. Eckdaten dieses Granulats siehe Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Technische Informationen Borealis HC600TF

Polypropylen Homopolymer	
<i>Hersteller & Bezeichnung</i>	Borealis HC600TF
Abkürzung	PP-H
Dichte	900 – 1000 kg/m^3
MFR*	2,8 $g/10min$
Schmelzpunkt	164 °C

*Melt Flow Rate (230 °C/2.16 kg)

Polyethylengranulate

Polyethylen Linear Low Density: Das Linear Low Density Polyethylen zeichnet sich durch kurze Seitenkettenbildung aus, welches das Material sehr flexibel macht. Das Material wird vor allem mittels Blasfolienextrusion und Gießfolienextrusion verarbeitet. Die Anwendungsgebiete liegen im Verpackungsbereich für sehr dünne hochelastische Folien. Da es auch für Lebensmittelkontakt geeignet ist, sind auch Folienverpackungen für beispielsweise Obst und Gemüse möglich. Eckdaten des verwendeten Granulats siehe Tabelle 2.3.

Tabelle 2.3: Technische Informationen DOW Dowlex 2750ST

Polyethylen Linear Low Density	
<i>Hersteller & Bezeichnung</i>	DOW Dowlex 2750ST
Abkürzung	PE-LLD
Dichte	950 kg/m^3
MFR	1,5 $g/10min$
Schmelzpunkt	190 °C

*Melt Flow Rate (190 °C/2.16 kg)

Polyethylen High Density: Das hochdichte Polyethylen wird mittels Spritzgieß- als auch Formpressverfahren verarbeitet. Die Molmassenverteilung ist multimodal, was auf mehrere getrennte Maxima in der Verteilungskurve deutet. In dieser Arbeit wurde ein bimodales Polyethylen High Density verwendet. Dies hat positive Auswirkung auf die Environmental Stress Cracking Resistance (ESCR). Klassische Anwendungsgebiete sind beispielsweise Getränkeflaschenverschlüsse, da kein Eigengeschmack des Kunststoffes für Menschen erkennbar ist und Lebensmittelechtheitszertifikate ausgestellt werden können, bzw. Industrieartikel, welche eine hohe Spannungsrisssbeständigkeit ausweisen müssen. Eckdaten dieses Granulats siehe Tabelle 2.4.

Tabelle 2.4: Technische Informationen Borealis BorPure MB6561

Polyethylen High Density	
<i>Hersteller & Bezeichnung</i>	Borealis BorPure MB6561
Abkürzung	PE-HD
Dichte	955 kg/m^3
MFR	1,5 $g/10min$
Schmelzpunkt	190 °C

*Melt Flow Rate (230 °C/2.16 kg)

Zusammensetzung der Blends

Das Kontaminationsmaterial wurde jeweils mit 2, 5, 10 und 15 Massenprozent dem Hauptmaterial beige-mischt. Um die mechanischen Kennwerte im Laufe des Lebenszyklus eines recycelten Kunststoffes nachzustellen wurden die Blends der Modellserie mehrmals verarbeitet, was in diesem Kontext das mehrfache Aufschmelzen, Extrudieren und anschließendes Zerkleinern bedeutete. Nach ein-, drei-, und fünffacher Verarbeitung wurde das Material mechanischen und thermischen Untersuchungen unterzogen.

2.1.1 Blends

Für die Modellserie bzw. die Miniserie wurden verschiedene Blends hergestellt. Diese bestehen aus einem Hauptmaterial und einem Kontaminationsmaterial. Die dazu verwendeten virgin Materialien werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Virgin Materialien

Die Auswahl der virgin Granulate wurde vom Institut vorgegeben und stellen typische Kunststoffsorten dar, welche häufig in Abfallströmen zu finden sind und dementsprechend oft für Einwegverpackungen aus Polyethylen bzw. Polypropylen verwendet werden.

Polypropylengranulate

Polypropylen Random Copolymer: Das Polypropylen Random Copolymer erhielt diesen Namen, aufgrund der Zugabe von Ethylen bei der Copolymerisation mit Propen und den dadurch entstehenden unregelmäßig angeordneten Ethylen- und Propyleneinheiten. Umso höher der Ethylengehalt, desto geringer ist die Kristallinität und somit auch Steifigkeit und Sprödigkeit. Dafür ergeben sich bessere Flexibilität und Schlagzähigkeit. Das Material wird vor allem mittels Blasfolienextrusion und Gießfolienextrusion verarbeitet. Die Anwendungsgebiete liegen im Verpackungsbereich. Da es auch für Lebensmittelkontakt geeignet ist, sind auch Folienverpackungen für beispielsweise Obst und Gemüse möglich. Eckdaten des verwendeten Granulats siehe Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Technische Informationen Borealis RB707CF

Polypropylen Random Copolymer	
<i>Hersteller & Bezeichnung</i>	Borealis RB707CF
Abkürzung	PP-RCP
Dichte	900 – 910 kg/m³
MFR*	1,5 g/10min
Schmelzpunkt	145 °C

*Melt Flow Rate (230 °C/2.16kg)

Polypropylen Homopolymer: Das Homopolymer wird durch Polymerisation von reinem Propen gewonnen. Die Anwendungsgebiete für dieses Granulat reichen von Milchproduktverpackungen bis Geotextilien und aller Art dünnwandiger Verpackungseinheiten. Es wird vor allem mittels Thermoformverfahren verarbeitet. Eckdaten dieses Granulats siehe Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Technische Informationen Borealis HC600TF

Polypropylen Homopolymer	
<i>Hersteller & Bezeichnung</i>	Borealis HC600TF
Abkürzung	PP-H
Dichte	900 – 1000 kg/m³
MFR*	2,8 g/10min
Schmelzpunkt	164 °C

*Melt Flow Rate (230 °C/2.16 kg)

2.1.1 Blends

Für die Modellserie bzw. die Miniserie wurden verschiedene Blends hergestellt. Diese bestehen aus einem Hauptmaterial und einem Kontaminationsmaterial. Die dazu verwendeten virgin Materialien werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Virgin Materialien

Die Auswahl der virgin Granulate wurde vom Institut vorgegeben und stellen typische Kunststoffsorten dar, welche häufig in Abfallströmen zu finden sind und dementsprechend oft für Einwegverpackungen aus Polyethylen bzw. Polypropylen verwendet werden.

Polypropylengranulate

Polypropylen Random Copolymer: Das Polypropylen Random Copolymer erhielt diesen Namen, aufgrund der Zugabe von Ethylen bei der Copolymerisation mit Propen und den dadurch entstehenden unregelmäßig angeordneten Ethylen- und Propyleneinheiten. Umso höher der Ethylengehalt, desto geringer ist die Kristallinität und somit auch Steifigkeit und Sprödigkeit. Dafür ergeben sich bessere Flexibilität und Schlagzähigkeit. Das Material wird vor allem mittels Blasfolienextrusion und Gießfolienextrusion verarbeitet. Die Anwendungsgebiete liegen im Verpackungsbereich. Da es auch für Lebensmittelkontakt geeignet ist, sind auch Folienverpackungen für beispielsweise Obst und Gemüse möglich. Eckdaten des verwendeten Granulats siehe Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Technische Informationen Borealis RB707CF

Polypropylen Random Copolymer	
Hersteller & Bezeichnung	Borealis RB707CF
Abkürzung	PP-RCP
Dichte	900 – 910 kg/m ³
MFR*	1,5 g/10min
Schmelzpunkt	145 °C

*Melt Flow Rate (230 °C/2.16kg)

Polypropylen Homopolymer: Das Homopolymer wird durch Polymerisation von reinem Propen gewonnen. Die Anwendungsgebiete für dieses Granulat reichen von Milchproduktverpackungen bis Geotextilien und aller Art dünnwandiger Verpackungseinheiten. Es wird vor allem mittels Thermoformverfahren verarbeitet. Eckdaten dieses Granulats siehe Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Technische Informationen Borealis HC600TF

Polypropylen Homopolymer	
Hersteller & Bezeichnung	Borealis HC600TF
Abkürzung	PP-H
Dichte	900 – 1000 kg/m ³
MFR*	2,8 g/10min
Schmelzpunkt	164 °C

*Melt Flow Rate (230 °C/2.16 kg)

2.2 Arbeitsablauf

Im Folgenden werden die Arbeitsabläufe sowie die verwendeten Maschinen, Geräte und die eingesetzte Software erläutert, welche zur Mehrfachverarbeitung, der Probenherstellung, Probenanalyse und zur Auswertung der Daten benutzt wurden. Ein erwähnenswerter Unterschied beim Herstellungsprozess, der sowohl für die Modell- als auch Recyclingserie gilt, ist die Probenherstellung an sich: Materialien mit Polyethylen als Hauptkomponente wurden zu Platten gepresst. Anschließend wurden die Probengeometrien für die mechanische Analyse aus den heiß gepressten Platten gestanzt. Bei den Materialien, welche Polypropylen als Hauptbestandteil beinhalten, wurden die Proben direkt mittels Spritzgießverfahren hergestellt. Eine grafische Übersicht des groben Arbeitsablaufes ist in Abbildung 2.2 zu sehen.

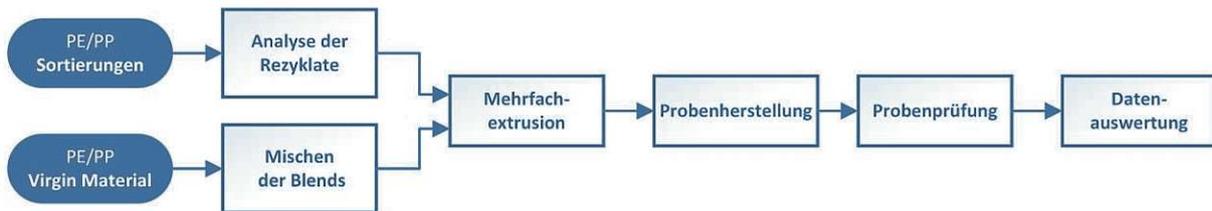


Abbildung 2.2: Übersicht Arbeitsablauf

2.2.1 Vorbereitung

2.2.1.1 Virgin Material Blends

Bevor mit den Mehrfachverarbeitungen bzw. mit der Analyse für die Miniserie begonnen wurde, mussten die Blends gemischt werden.

Dazu wurden die benötigten Granulate mittels einer Laborwaage abgewogen. Das Granulat wurde anschließend mit einer Mühle zerkleinert um die Partikelgröße weiter zu verkleinern. Vor der Verarbeitung wurde das Hauptmaterial mit dem Kontaminationsmaterial zusammengeführt und anschließend fünf Minuten händisch gemischt um eine möglichst homogene Verteilung der Komponenten zu erreichen. Es wurden für jeden Kontaminationsgrad 300g Chargen angesetzt, dass für jede für jede untersuchte Verarbeitungsstufe (1x, 3x, 5x) circa 100g verarbeitetes Material zur Verfügung stand. Der grundsätzliche Ablauf ist in Abbildung 2.3 grafisch aufgearbeitet.



Abbildung 2.3: Arbeitsablauf beim Mischen der Blends

2.2.1.2 Rezyklate

Die Flakes der Recyclingserie wurden im Vorfeld sortiert und analysiert. Dazu wurden 100 Gramm jeder Flakesortierung in Hinblick auf Farbe und eventuellen Folienanteil getrennt. Zusätzlich wurden diese mittels Handgerät für Infrarotspektrometrie (IoSys mIRoGun 4.0), welches die Kunststoffteilchen in Bruchteilen einer Sekunde identifizieren kann, auch nach Kunststoffart sortiert. Somit konnte die Kontamination und folglich deren Massenanteile in den einzelnen Sortierungen ermittelt werden. Durch das Sortieren wurde ein erster Überblick über die grundsätzliche Qualität des Sortierungsprozesses geschaffen.

Zur Validierung der Ergebnisse des Infrarotspektrometers wurden zusätzlich DSC-Messungen ausgesuchter Flakes durchgeführt. Die vollständige Analyse der Sortierungen ist im Ergebnisteil zu finden. Der grundsätzliche Ablauf ist in Abbildung 2.4 nochmal grafisch aufgearbeitet.

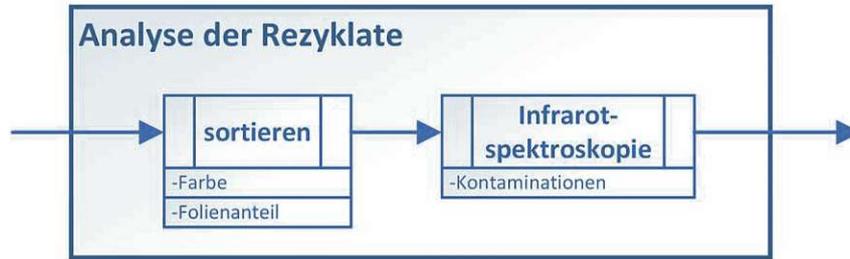


Abbildung 2.4: Vorbereitung Rezyklate

2.2.2 Extrusion und Mehrfachverarbeitung

Die Mehrfachverarbeitungen wurden sowohl für die Rezyklat- als auch für die Modellserie auf dem Einschnecken-Tischextruder hergestellt. Der grundsätzliche Ablauf der Mehrfachverarbeitung/Mehrfachextrusion ist in Abbildung 2.5 zu sehen.

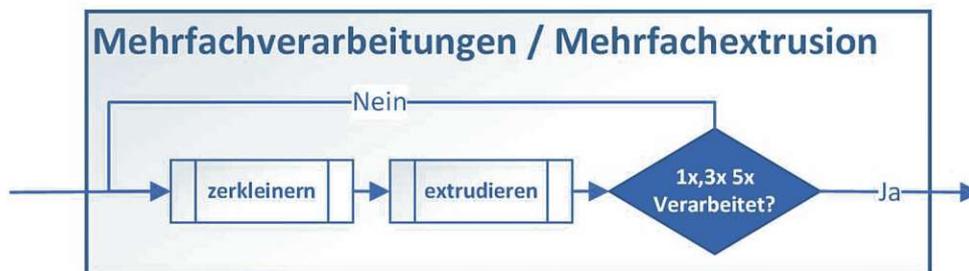


Abbildung 2.5: Analyse der sortierten Flakes

Die Rezyklate bzw. die Modellmischungen wurden extrudiert. Das bedeutet, dass die Schmelze durch Temperatur und steigenden Druck aufgrund von Kompression bzw. Verdichtung in einer Schnecke erzeugt wird. Die Zuführung des Materials erfolgte über einen Trichter. Das verarbeitete Material verließ den Extruder durch eine simple Düse. Das mehr oder weniger niedrig viskose Material, welches aus der Düse austrat, wurde händisch zu Stangen gerollt und bei Raumtemperatur abgekühlt. Nach dem Abkühlen der Stangen wurden diese mithilfe einer Papier-Hebelschneidmaschine zu 'Pellets' geschnitten. Diese Pellets mussten klein genug sein, damit die Schnecke des Extruders diese wieder einziehen konnte. In Abbildung 2.6 sind sowohl Stangen als auch die daraus geschnittenen Pellets abgebildet. Normalerweise hätte die elektrische Mühle des Instituts zum Zerkleinern des extrudierten Materials verwendet werden können. Da sich die verwendeten Materialien durch hohe Zähigkeit auszeichneten, begannen diese aufgrund der Reibung beim Zerschneiden relativ schnell zu erweichen und verklumpen. Deshalb wurden die abgekühlten Stangen mittels oben genannter Hebelschneidmaschine zerkleinert.



(a) Stangen und Pellets



(b) Porosität der Pellets

Abbildung 2.6: Fotos des verarbeiteten Rezyklat zwischen den Extrusionen

Beim für die Mehrfachverarbeitung verwendeten Extruder handelte es sich um einen Einschneckenextruder der Firma Extron mit der Modellnummer EX18-26-1,5 (siehe Abbildung 2.7). Der Extruder verfügt über drei Temperaturzonen, in der Abbildung als T1, T2 und T3 bezeichnet, welche über die Steuerung regelbar sind. Außerdem kann die Fördergeschwindigkeit eingestellt werden. Die Parameter, welche zur Mehrfachverarbeitung aller Materialien verwendet wurden, sind in Tabelle 2.10 angeführt.

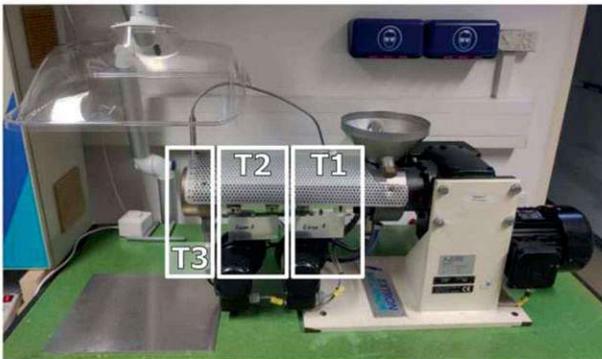


Abbildung 2.7: Extron Einschneckenextruder

Tabelle 2.10: Parameter Einschneckenextruder

Parameter	Wert
Temperaturzone 1	160 °C
Temperaturzone 2	230 °C
Temperaturzone 3	200 °C ± 10%
Schneckendrehzahl	75 RPM

2.2.3 Probenherstellung

Wie in Abbildung 2.8 zu sehen, wurden für PP und PE unterschiedliche Probenherstellungsverfahren verwendet. Zum einen wurde Spritzgießen für alle PP Sortierungen und Blends verwendet und Heißpressen für PE Sortierungen bzw. Blends.

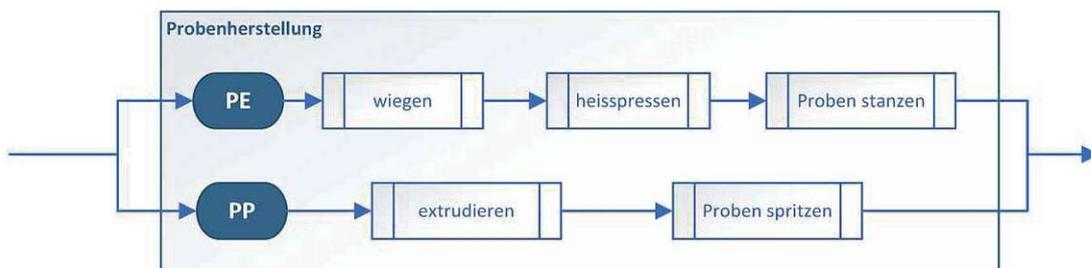


Abbildung 2.8: Arbeitsablauf Probenherstellung

Die Geometrie und Hauptabmessungen der hergestellten Probenkörper entsprachen für Zugproben der DIN EN ISO 527-2 Form 5A und sind in Abbildung 2.10 bzw. Tabelle 2.12 zu sehen. [42] Für Schlagzugproben wurde der Typ 1 nach ISO 8256 verwendet, dessen Abmessungen in Abbildung 2.9 bzw. Tabelle 2.11 ersichtlich sind. [43]

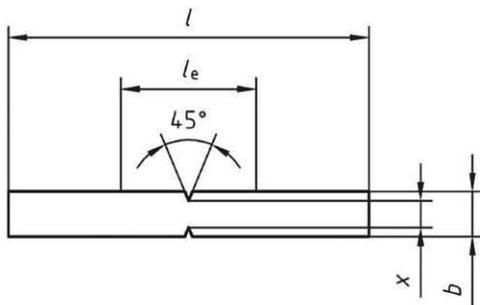


Abbildung 2.9: Form Schlagzugprobe ISO 8256 Typ 1 [43]

Tabelle 2.11: Abmessungen Schlagzugprobe ISO 8256 Typ 1

Abmessungen Schlagzugprobe [42]	
Länge l	80 ± 2
Breite b	$10 \pm 0,2$
Reststeg x	30 ± 2
Einspannlänge l_e	2

alle Maße in Millimeter

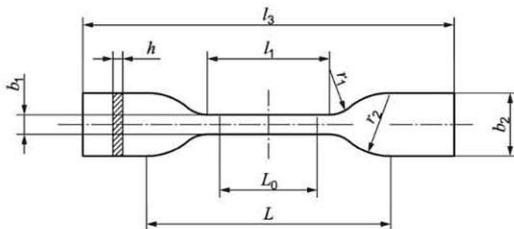


Abbildung 2.10: Form Zugprobe DIN EN ISO 527-2 Typ 5A [42]

Tabelle 2.12: Abmessungen Zugprobe DIN EN ISO 527-2 Typ 5A

Abmessungen Schlagzugprobe [42]	
Länge l	80 ± 2
Breite b	$10 \pm 0,2$
Reststeg x	30 ± 2
Einspannlänge l_e	2

alle Maße in Millimeter

2.2.3.1 Spritzgießen

Wie oben erwähnt, wurden alle PP Sortierungen und Blends mittels Spritzgießen hergestellt. Dazu wurde das Haake System bestehend aus Haake MiniLab II und Haake Minijet Pro verwendet. Siehe Abbildung 2.11

Der Haake Minilab II, ist ein Doppelschneckenextruder, welcher mit sehr geringem Volumen arbeiten kann. Schon 7cm^3 Material reichen für seinen Betrieb aus. Das Material wurde über den Einfüllstutzen zugeführt, und per Steuerung wurde mittels Pneumatikzylinder das zugeführte Material vorverdichtet und in die Doppelschnecke gepresst. Das verhinderte Lufteinschlüsse, wie es bei der Mehrfachverarbeitung mit dem Tischextruder ohne Vorverdichter oft der Fall war. Zusätzlich konnte mittels Steuerung das Material entweder zur Auslassdüse oder über einen Beipass wieder zum Anfang der Doppelschnecke geleitet werden. Damit ließ sich das Material im Extruder zirkulieren und sorgte für eine bessere Vermischung des Materials. Zusätzlich konnten durch den Beipass eventuell vorhandene Lufteinschlüsse im flüssigen



(a) Haake MiniLab II [44]



(b) HAAKE MiniJet Pro

Abbildung 2.11: Haake System zur Verarbeitung von Kunststoffen und anschließendem Spritzgießen von Probenkörpern

Material verhindert werden. Die einzelnen Komponenten der Doppelschnecke sind in der Abbildung 2.12 beschrieben.

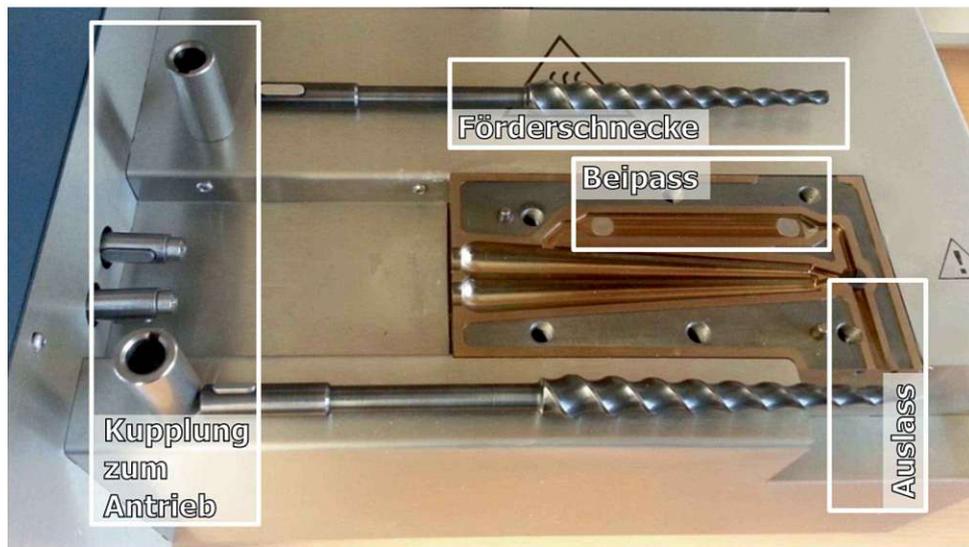


Abbildung 2.12: Doppelschneckenextruder [44]

Das aufgeschmolzene und kurz zirkulierte Material wurde anschließend vom Doppelschneckenextruder über den Auslass in den Heizzyylinder der Haake MiniJet Pro gepresst (siehe 2.11 (b)). Der Heizzyylinder wurde anschließend in die Vorrichtung der Haake Mini Jet Pro eingesetzt. Mittels Pneumatikzylinder wurde das geschmolzene Material in die beheizte Form gespritzt. Nach einer Gesamthaltedauer des Zylinders von zwanzig Sekunden konnte die Form und anschließend das Werkstück aus besagter Form entnommen werden. Die Parameter zur Verarbeitung sind in folgender Tabelle 2.13 zu sehen. Für jede Unterserie und zusätzlich jede Mehrfachverarbeitung wurden sowohl 12 Zugproben als auch 12 Schlagzugproben erstellt. Für die 56 geprüften Unterserien, welche PP als Hauptmaterial besitzen, ergibt das 672 Zugproben und ebenso viele Schlagzugproben. Es wurden für diese Arbeit insgesamt 1344 Proben spritzgegossen.

Tabelle 2.13: Parameter zur Probenherstellung für MiniLab II und Mini Jet Pro

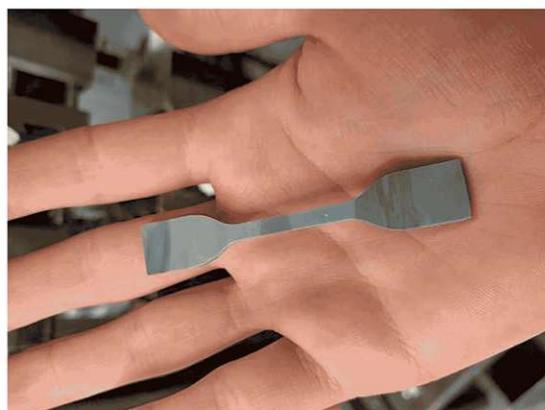
Parameter Einschneckenextruder Extron	
Parameter	Wert
<i>Haake MiniLab II</i>	
Extrudertemperatur	230 °C
Schneckendrehzahl	100 RPM
<i>Haake Mini Jet Pro</i>	
Temperatur Heizzylinder	240 °C
Spritzgussform Temperatur	42 °C
Einspritzphase	350 bar für 10 s
Haltephase	350 bar für 10 s

2.2.3.2 Heißpressen

In Abbildung 2.13 sind die aus dem extrudierten Material heissgepressten Platten sowie die daraus gestanzten Probenkörper, in dem Fall eine Zugprobe, zu sehen.



(a) Heißgepresste Probenplatte



(b) Ausgestanzte Zugprobe

Abbildung 2.13: Verarbeitungsergebnis von PE Flakes - Ohne Schmelzenmischer bei der Extrusion ergab sich ein heterogener Farbverlauf, was zu gemusterten Platten führte.

Um Probenkörper für die PE Serien herzustellen wurde das verarbeitete Material zuerst zu Platten heißgepresst. Dafür wurde eine bestimmte Materialmenge für Zugproben- bzw. Schlagzugprobenplatten gewogen um diese auf eine bestimmte Dicke pressen zu können, da Länge und Breite durch das Gesenk vorgegeben waren. Um die benötigte Masse an Rohmaterial für die gegebenen Plattenmaße zu errechnen wurde eine mittlere Dichte des verarbeiteten Kunststoffes von $\rho = 955 \text{ kg/m}^3$ angenommen. Das ergab:

- 21,39 g für Zugprobenplatten mit der Abmessung 140 mm * 80 mm * 2 mm &
- 13,37 g für Schlagzugprobenplatten mit der Abmessung 140 mm * 80 mm * 1,25 mm.

Die verwendeten Parameter, welche auf der Labor-Heißpresse Collin P200 P verwendet wurden, sind in Tabelle 2.14 zu sehen.

Tabelle 2.14: Collin P200 P Plattenpresse Parameter

Parameter		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
Temperatur	T in °C	80	190	190	190	190
Haltezeit	t in Minuten	10	2	5	1	12
Druck	p in bar	2	10	20	40	60
Rampe	r in K/min	0	6	0	0	0

Diese Parameter sind optimiert für gepresste Platten aus HDPE bzw. LDPE

Ein Beispiel für eine gepresste Platte ist in Abbildung 2.13 (a) zu sehen.

Proben stanzen

Die gepressten Zugprobenplatten wurden maschinell mittels Zwick-Roell Z250 gestanzt. Die Schlagzugproben wurden händisch mittels Hammer und Stanzform ausgeschlagen. Das war zulässig, da die Kerbe, also der kritische Querschnitt, welcher für die Messung relevant war, wie in Abbildung 2.9 gezeigt, maschinell nachträglich angebracht wurde. Pro Platte wurden jeweils zehn Proben ausgestanzt. Diese werden mittels Kunststoffentgrater entgratet. Die Proben wurden sowohl quer als auch entlang der längsten Ausdehnung der Platte geschlagen bzw. gestanzt. Durch das Heißpressen wurden isotrope mechanische Eigenschaften des Materials sichergestellt, weshalb die Ausrichtung des Stanzstempels keinen Einfluss auf die Prüfungsergebnisse hatte.

Ein mittels Zwick150 gestanzte Zugprobe ist in Abbildung 2.13 (b) zu sehen.

2.2.4 Probenanalyse und Prüfung

Alle Serien wurden einer thermischen Analyse und mechanischen Prüfung unterzogen. Ein Überblick der Prüfungsverfahren ist in Abbildung 2.14 zu sehen. Die thermische Analyse wurde mittels DSC - Differential Scanning Calorimetry - durchgeführt. Die mechanischen Kennwerte wurden mittels Schlagzugzähigkeitsversuch sowie Zugprüfung bestimmt. Die gesammelten Daten wurden anschließend mit verschiedener Software verarbeitet und grafisch aufgearbeitet.

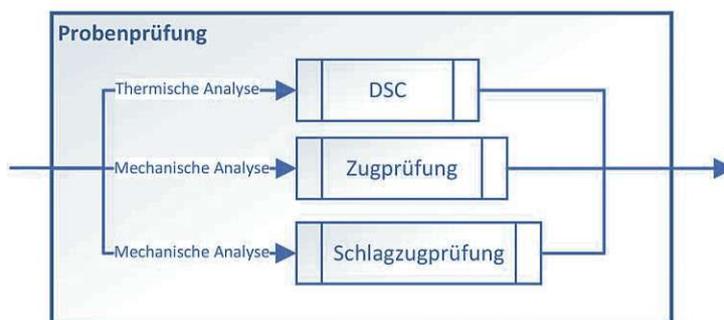
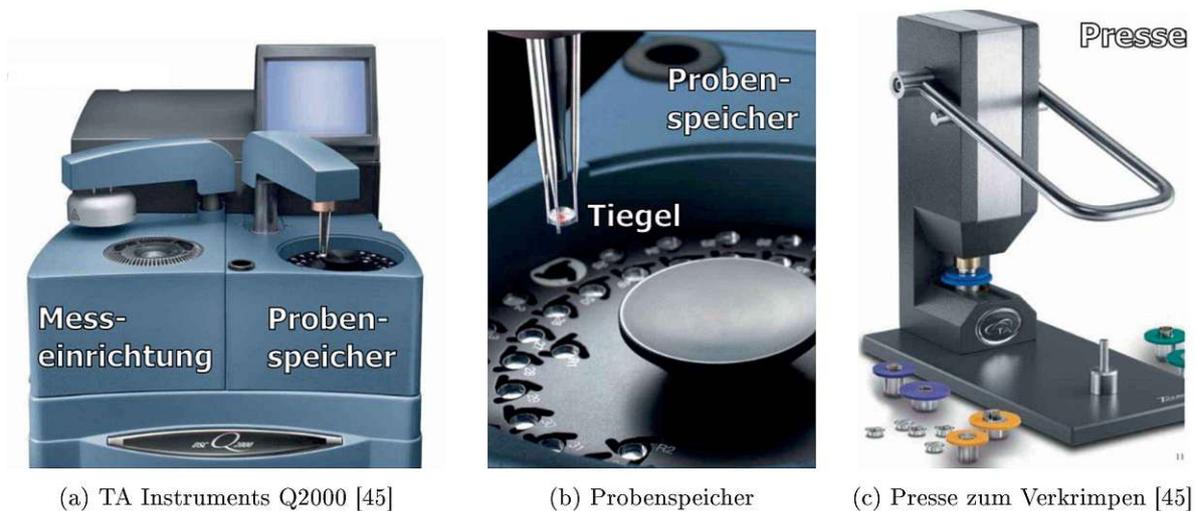


Abbildung 2.14: Überblick der Probenprüfungsverfahren

2.2.4.1 DSC

Differential scanning calorimetry (DSC), auch als dynamische Differenzkalometrie (DDK) bekannt, ist ein thermoanalytisches Verfahren. Eine entsprechende Messanlage ist in Abbildung 2.15 zu sehen.



(a) TA Instruments Q2000 [45]

(b) Probenspeicher

(c) Presse zum Verkrumpen [45]

Abbildung 2.15: Messstation für Differential scanning calorimetry [45]

Dabei wird die Differenz des Wärmestroms zwischen einer Referenzprobe, in diesem Fall ein Aluminiumtiegel ohne Inhalt, und einer zu untersuchenden Probe als Funktion der Temperatur aber auch der Zeit dargestellt. Sowohl die Referenzprobe als auch die zu untersuchende Probe befinden sich in einem verschlossenem Tiegel und werden dem gleichen kontrollierten Wärmestrom in einer definierten Atmosphäre z.B. Luft oder Stickstoff ausgesetzt. Die Messergebnisse lassen auf exotherme, endotherme Prozesse bzw. Wärmekapazitätsänderungen schließen. Charakteristische Größen für Polymere, welche mittels DSC ermittelt werden können sind:

- Schmelzbereich,
- Glasübergangstemperatur &
- Kristallisationsenthalpie und damit der Kristallinitätsgrad

Die DSC wurde für zwei verschiedene Aufgaben in dieser Arbeit verwendet. Es wurden zum einen die Ergebnisse der Infrarotspektrometrie, wie weiter oben kurz erwähnt, mittels der DSC verifiziert. Andererseits wurde der Großteil der DSC Messungen zum Degradationsverhalten der verarbeiteten Kunststoffe verwendet. Dazu wurden von jeder Serie zwei Proben der fünften Mehrfachverarbeitung getestet. Zur thermischen Analyse wurde eine TA Instruments Q2000 verwendet (siehe Abbildung 2.15 (a)). Mittels Software konnten verschiedene Ablaufparameter eingestellt werden, welche man in Tabelle 2.15 einsehen kann. Es wurden zwei verschiedene Abläufe verwendet, die sich im Wesentlichen nur durch die maximal erreichte Temperatur unterschieden. Für die nicht durch die Infrarotspektrometrie identifizierbaren Materialien wurde die Maximaltemperatur erheblich erhöht um den Schmelzpunkt des unbekanntes Kunststoffes jedenfalls zu erreichen. Dazu wurde eine 5-10mg schwere Materialprobe in einen speziellen Aluminiumtiegel gelegt und anschließend mittels einer zur Messmaschine gehörigen Presse verkrümpelt (siehe Abbildung 2.15 (c)). Die Verkrümpelung soll einen Austausch von Luft oder anderen Gasen im Tiegel verhindern. Ein verkrümpelter Tiegel ist in Abbildung 2.15 (b) zu sehen. Eine schlechte Verkrümpelung kann zu sogenannten Artefakten in der Messung führen. Diese erkennt man durch Unstetigkeiten in der Messkurve oder unerwarteten lokalen Minima bzw. Maxima. Die Masse des Tiegels, bestehend aus Topf und Deckel, als auch die Masse der Materialprobe wurde mittels Laborwaage vor dem Start der Messung angegeben. Mit diesen Daten konnte ein Wärmestrom pro Masseneinheit berechnet werden. Somit wurde eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Messungen erzielt. Die Rohdaten der Messung gliedern sich in Messzeitpunkt, Temperatur in °C und Wärmestrom in Milliwatt.

Durch den Probenspeicher der TA Instruments Q2000 ist es möglich bis zu 50 Proben automatisch nacheinander zu testen. Der Ablauf der Messung sah wie folgt aus:

1. Messzelle auf Starttemperatur bringen
2. Start der Datenaufzeichnung
3. Proben von Starttemperatur bis Endtemperatur mit definierter Rampe erhitzen
4. Proben von Endtemperatur bis Starttemperatur mit definierter Rampe kühlen
5. Proben von Starttemperatur bis Endtemperatur mit definierter Rampe erhitzen
6. Ende der Datenaufzeichnung

Tabelle 2.15: Parameter TA Instruments Q2000

Parameter	PP/HDPE	unbekannter Kunststoff
Temperaturrampe	10 K/min	10 K/min
Starttemperatur	30 °C	30 °C
Endtemperatur	230 °C	300 °C

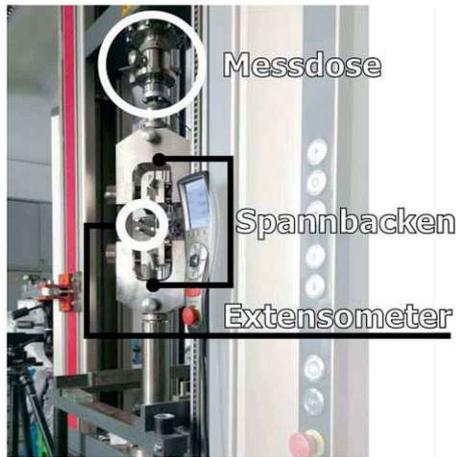
2.2.4.2 Zugprüfung

Der Zugversuch ist das Standardverfahren in der zerstörenden Materialprüfung um die folgenden charakteristische Kennwerte bei Polymeren zu untersuchen:

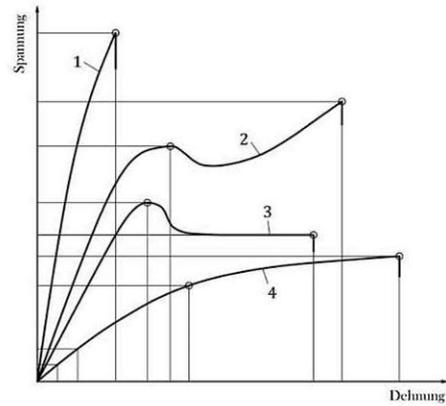
- Elastizitätsmodul E_t ,
- Streckspannung σ_y ,
- Zugfestigkeit σ_M und die dazugehörige Dehnung ε_M &
- Bruchdehnung ε_B

Beim Zugversuch werden Proben, welche zwecks Vergleichbarkeit einer bestimmten Form unterliegen, in diesem Fall DIN EN ISO 527-2/5A, entlang der längsten Achse einer Zugkraft ausgesetzt und solange gedehnt, bis das Material bricht bzw. reißt. Die Zugkraft wird dabei durch das vertikale Auseinanderfahren der Probenhalter, mit vorgegebener Geschwindigkeit, aufgebracht. Bei der verwendeten Zugprüfmaschine handelte es sich um eine Zwick-Röll Z050, welche eine maximale Prüfkraft von 50kN aufbringen kann. Die Proben wurden mittels Schraub-Probenhalter in die Maschine eingespannt. Als Extensometer wurde ein Fühleraufnehmer verwendet, welcher über Messschneiden den Kontakt mit der Probe herstellte und durch die Winkel- bzw. Längenänderung beim Auseinanderfahren der Probenhalter die Dehnmessung durchführte. Der Extensometer wurde zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls verwendet. Der Zug-Kraftaufnehmer saß über dem oberen Probenhalter und berechnet über die Verformung an einer DMS-Messbrücke die Kraft, welche auf den Probenkörper wirkte. Der Aufbau der verwendeten Zugprüfmaschine und die beschriebenen Komponenten sind in 2.16 (a) zu sehen. Die Prüfungsbedingungen wurden an die bestehende Norm DIN EN ISO 527 angelehnt.

Mittels der TestXpert Software wurden die beschriebenen Ablaufparameter 2.16 der Messung eingestellt. Die ausgegeben Rohdaten, welche zur Weiterverarbeitung verwendet wurden, waren Dehnungs- und Spannungswerte. Die materialbedingten Spannungs-Dehnungskurven, zu sehen in Abbildung 2.16 (b), waren



(a) Aufbau der Zugprüfmaschine



(b) Spannungs-Dehnungsdiagramm [46]

Abbildung 2.16: Zugprüfmaschinenbau und prinzipielles Aussehen der Prüfergebnisse

entsprechend Kurve (2) bzw. Kurve (3) für alle Serien zu erwarten. Man erkennt an den Graphen eine ausgeprägte Streckgrenze, wobei je nach Serie die Höchstspannung die Streckgrenze eventuell übertreffen kann.

Tabelle 2.16: Parameter Zugversuch Zwick-Röll Z050

Parameter	PP/HDPE
Verfahrgeschwindigkeit bis Streckgrenze	1 % Dehnung/min
Verfahrgeschwindigkeit bis Bruch	20 mm/min
Stopp der Messung	80% Kraftabfall

Zu erwähnen ist, dass alle Proben mittels Kunststoffentgrater von den Schwimmhäuten befreit wurden. Proben, welche spritzgegossen wurden, wurden immer mit dem Anguss in den oberen Probenhalter gespannt, um eventuelle richtungsabhängige Anisotropien auszuschließen.

2.2.4.3 Schlagzugzähigkeitsprüfung

Der Schlagzugzähigkeitsversuch misst unter vorgegebenen Bedingungen die benötigte Arbeit, bezogen auf den gekerbten Querschnitt, um eine Probe zum Bruch zu bringen. Der Versuchsaufbau gestaltet sich simpel: Ein Pendelhammer trifft mit einer definierten kinetischen Energie auf ein Querjoch, welches mittels Klemmverbindung am Probenkörper befestigt ist. Im Gegensatz zum Kerbschlagbiegeversuch schlägt der Pendelhammer nicht in die Kerbe selbst sondern auf das vorher quer zum Probenkörper befestigte Querjoch. Das heißt, die Kraft des Aufschlags wirkt entlang der längsten Probenkante und induziert eine Zugspannung im Probenkörper - deshalb der beschreibende Name 'Schlagzugzähigkeit'.

Als Prüfmaschine wurde das Pendelschlagwerk CEAST 9050 mit einem 2 Joule Potential Hammer, welcher mit 2,9 m/s auf die Probe aufschlägt, verwendet. Das verwendete Querjoch aus Aluminium mit einer Masse von 15 Gramm war vorgegeben um einen möglichst unelastischen Stoß zu erzeugen. Das Pendelschlagwerk mit eingespanntem Hammer und das zugehörige Aufspannsystem für die Schlagzugzähigkeitsprüfung ist in Abbildung 2.17 zu sehen. Es wurden für jede Serie zehn Proben gemessen. Die Messungen und die zugehörigen Messbedingungen wurden an die zugehörige Norm DIN EN ISO 8256 angelehnt. [43]



(a) CEAST 9050 Pendenschlagwerk [47]



(b) Aufspannsystem für Schlagzugversuch [47]

Abbildung 2.17: Versuchsaufbau Schlagzugzähigkeit

Hier ist noch zu erwähnen, dass um die normgerechte Geometrie zu erlangen alle Proben mittels einer Stoßmaschine, genauer einer Ceast NotchVIS, gekerbt wurden. Die effektiven Kerbquerschnitte wurden für jede Probe individuell mittels Schublehre abgemessen und vermerkt. Dieser Schritt war nötig um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, da die Genauigkeit beim Kerben sowie beim Ausstanzen der Proben nur bedingt gegeben war.

2.2.5 Datenauswertung

Die Wahl der Software um die gesammelten Daten auszuwerten fiel auf 'R' bzw. 'R-Studio'. Genauer gesagt wurde mit der Software Kollektion 'Tidyverse' gearbeitet. Diese bietet eine Vielzahl von Tools um mittelgroße Datenmengen zu verarbeiten bzw. statistisch und graphisch aufzubereiten.

DSC

Da bei der Auswertung der DSC-Daten komplexere Funktionen sowie eine interaktive graphische Oberfläche vonnöten waren, wurde die Software TA Universal Analysis verwendet. Diese ermöglichte eine einfache Aufarbeitung der DSC-Daten. Vor allem ließen sich unkompliziert Maxima bzw. Minima der Schmelz- und Erstarrungskurven anzeigen. Auch die Integration der Schmelz- bzw. Erstarrungsspitzen waren unkompliziert erstellbar.

Zugprüfung

Die von TestXpert ausgegebenen Excel Tabellen wurden mittels selbst erstellten R-Skript in die R-Projekt Software eingelesen. Es wurde die Excel-Ausgabe der TestXpert Software verwendet, da nur in diesem Modus für jede Zugprüfung die Rohdaten jeder Probe mit ausgegeben wurden. Jede Serie wurde im aufbereiteten Zustand abgespeichert. Zum Auswerten konnten bei Bedarf nur die benötigten Datensätze eingespielt werden.

Schlagzugprüfung

Diese wurde aber so aufgebaut, dass das automatische Datenaufbereitungstool von 'R' ohne weiteres Zutun verwendet werden konnte. Dadurch waren die Daten von vorne herein für das oben erwähnte 'Tidyverse' Paket vorbereitet.

Tabelle 2.6: Übersicht der hergestellten und untersuchten Serien der Modellserie sowie deren Bezeichnungen

Kürzel	Hauptmaterial & Kontaminationsmaterial	Kontamination in Massenprozent
Serie: PP-RCP & PE-HD (Abb. 2.1 B)		
Hauptmaterial: <i>Borclear RB707CF</i>		
Kontamination: <i>BorPure MB6561</i>		
PP-RCP	PP - Random Copolymer	0
PP-RCP_PE-HD_2C	PP - Random Copolymer & PE - High Density	2
PP-RCP_PE-HD_5C	PP - Random Copolymer & PE - High Density	5
PP-RCP_PE-HD_10C	PP - Random Copolymer & PE - High Density	10
PP-RCP_PE-HD_15C	PP - Random Copolymer & PE - High Density	15
Serie: PP-RCP & PE-LLD (Abb. 2.1 A)		
Hauptmaterial: <i>Borclear RB707CF</i>		
Kontamination: <i>Dow Dowlex 2750ST</i>		
PP-RCP_PE-LLD_2C	PP - Random Copolymer & PE - Linear Low Density	2
PP-RCP_PE-LLD_5C	PP - Random Copolymer & PE - Linear Low Density	5
PP-RCP_PE-LLD_10C	PP - Random Copolymer & PE - Linear Low Density	10
PP-RCP_PE-LLD_15C	PP - Random Copolymer & PE - Linear Low Density	15
Serie: PE-HD & PP-RCP (Abb. 2.1 C)		
Hauptmaterial: <i>BorPure MB6561</i>		
Kontamination: <i>Borclear RB707CF</i>		
PE-HD	PE - High Density	0
PE-HD_PP-RCP_2C	PE - High Density & PP - Random Copolymer	2
PE-HD_PP-RCP_5C	PE - High Density & PP - Random Copolymer	5
PE-HD_PP-RCP_10C	PE - High Density & PP - Random Copolymer	10
PE-HD_PP-RCP_15C	PE - High Density & PP - Random Copolymer	15

Tabelle 2.6: Übersicht der hergestellten und untersuchten Serien der Modellserie sowie deren Bezeichnungen

Kürzel	Hauptmaterial & Kontaminationsmaterial	Kontamination in Massenprozent
Serie: PP-RCP & PE-HD (Abb. 2.1 B)		
Hauptmaterial: <i>Borclear RB707CF</i>		
Kontamination: <i>BorPure MB6561</i>		
PP-RCP	PP - Random Copolymer	0
PP-RCP_PE-HD_2C	PP - Random Copolymer & PE - High Density	2
PP-RCP_PE-HD_5C	PP - Random Copolymer & PE - High Density	5
PP-RCP_PE-HD_10C	PP - Random Copolymer & PE - High Density	10
PP-RCP_PE-HD_15C	PP - Random Copolymer & PE - High Density	15
Serie: PP-RCP & PE-LLD (Abb. 2.1 A)		
Hauptmaterial: <i>Borclear RB707CF</i>		
Kontamination: <i>Dow Dowlex 2750ST</i>		
PP-RCP_PE-LLD_2C	PP - Random Copolymer & PE - Linear Low Density	2
PP-RCP_PE-LLD_5C	PP - Random Copolymer & PE - Linear Low Density	5
PP-RCP_PE-LLD_10C	PP - Random Copolymer & PE - Linear Low Density	10
PP-RCP_PE-LLD_15C	PP - Random Copolymer & PE - Linear Low Density	15
Serie: PE-HD & PP-RCP (Abb. 2.1 C)		
Hauptmaterial: <i>BorPure MB6561</i>		
Kontamination: <i>Borclear RB707CF</i>		
PE-HD	PE - High Density	0
PE-HD_PP-RCP_2C	PE - High Density & PP - Random Copolymer	2
PE-HD_PP-RCP_5C	PE - High Density & PP - Random Copolymer	5
PE-HD_PP-RCP_10C	PE - High Density & PP - Random Copolymer	10
PE-HD_PP-RCP_15C	PE - High Density & PP - Random Copolymer	15

Kapitel 3

Ergebnisse

Im folgenden Kapitel sind alle durchgeführten Prüfungen und Analysen grafisch als auch quantitativ aufgearbeitet und beschrieben. Mögliche wünschenswerte Zusammenhänge bzw. Korrelationen werden im letzten Kapitel erörtert. Die mechanischen Prüfungsergebnisse werden anhand von Box-Plots veranschaulicht. Diese sind wie folgt aufgebaut:

- Die farblich markierten Punkte entlang vertikaler Linien entsprechen den einzelnen Messpunkten. Die horizontale Verschiebung entlang der 'Mittellinie' dient nur der besseren Lesbarkeit.
- Die horizontale Linie innerhalb der Box stellt den Mittelwert der Datenpunkte dar.
- Das obere Ende der Box stellt das obere Quartil dar, in dem Fall sind 75% der Werte kleiner oder gleich diesem Kennwert.
- Das untere Ende der Box stellt das untere Quartil dar, in dem Fall sind 25% der Werte kleiner oder gleich diesem Kennwert.
- Die Ausdehnung der Box beschreibt demzufolge die mittleren 50% der Werte.
- Die vertikale Linie nach oben und/oder unten beschreiben die Whisker. Diese stehen für das 90% sowie 10% Quantil und beschreiben somit, wo die mittleren 80% der Werte liegen.

Die Plots zur mechanischen Prüfung werden wie folgt zusammengefasst:

- Die Streckspannung/Bruchdehnung/Elastizitätsmodul bzw. die Schlagenergie sind auf den Ordinaten angegeben.
- Die Abszisse ist in mehrere einzelne Felder aufgeteilt. Diese beschreiben für Blends das Massenverhältnis zwischen Hauptmaterial und Kontaminationsmaterial und für Rezyklate die Anzahl der Extrusionen. Vermerkt sind diese Daten in den grau hinterlegten Kästchen.
- In den einzelnen Feldern sind immer mindestens ein bis vier Boxen des Box-Plots zu sehen. Bei den Blends steht jede Box für eine Extrusion wie bei der Bezeichnung der Abszisse angegeben. Bei den Rezyklaten wird hier jedoch die Konfiguration anstatt der Anzahl der Extrusionen angegeben. Es gibt vier mögliche Bezeichnungen IP (InPut für Flakes), OP (OutPut für Granulat), CW (ColdWash für kaltgewaschen) und HW (HotWash für heißgewaschen).

Um nicht nur grafisch einen Eindruck der Daten zu bekommen wurden auch standardmäßige statistische Kennzahlen erhoben, welche nach jedem Boxplot zu finden sind. Für Streckspannung und Elastizitätsmodul wurden neben dem Mittelwert auch die Veränderung des Mittelwertes pro Verarbeitung in Prozent

angegeben. Außerdem wurde auch der Varianzkoeffizient pro Extrusion berechnet. Dieser wurde hinzugezogen, da die Varianz an sich im Fall dieser Arbeit nicht aussagekräftig genug war, da diese nicht normiert ist und somit die Vergleichbarkeit darunter litt. Bei der Bruchdehnung war diese Problematik gut zu erkennen: Die Bruchdehnung schwankte über die Serien und Unterserien zwischen niedrigen zweistelligen Werten bis zu vierstelligen Werten. Der Wert der Varianz bei hohen mittleren Bruchdehnungen war auch bei geringerer Streuung höher als bei geringen mittleren Bruchdehnungen mit hoher Streuung. Aufgrund dieser Problematik wurde der Varianzkoeffizient herangezogen, dieser beschreibt das Verhältnis von Standardabweichung zum Mittelwert und lässt somit einen Vergleich zwischen den Unterserien zu. Die Bruchdehnung wurde etwas genauer betrachtet. Neben dem Mittelwert, welcher aufgrund der hohen Streuung eher weniger Aussagekraft hatte, wurde die minimale Bruchdehnung als auch der sogenannte 'Lower Hinge' der Bruchdehnungsergebnisse, welcher den Kennwert des 25% Quartils darstellt, berechnet. Die Veränderung der Bruchdehnung pro Verarbeitung wurde auf den 'Lower Hinge' bezogen. In Datenblättern von Kunststoffsorten wird oft die minimale Bruchdehnung angegeben. Hier wurde aber auf den 'Lower Hinge' ausgewichen, da durch verarbeitungstechnische Probleme als auch durch Verunreinigungen, welche vor allem bei Rezyklaten durch Fremdkörper entstehen können, verfälschte Ergebnisse in Form von Ausreißern ausgemerzt wurden.

Die letzte erhobene Kennzahl beschreibt den Anteil der Proben, bei denen die Höchstspannung größer als die Streckspannung war. Dies war vor allem bei Polypropylen relevant.

Für die Versuchsreihe zur Schlagzugfähigkeit wurden neben den Box-Plots, welche genau wie oben beschrieben aufgebaut sind, ebenfalls statistische Kennzahlen erhoben. Hier wurden neben Mittelwert und Median der Varianzkoeffizient und der empirische Quartilsdispersionskoeffizient erhoben. Dies hatte den Grund, dass laut Norm ISO/DIS 8256:2022 die Anzahl der zu prüfenden Proben auf fünf Stück beschränkt werden darf, wenn sich der Varianzkoeffizient unter einem Wert von 5% beläuft. Da dies bei fast 1000 getesteten Proben nicht der Fall war und die Anzahl der Ausreisser relativ hoch ausgefallen war, wurde der stabilere Quartilsdispersionskoeffizient zu Hilfe genommen. Dieser stellt das Verhältnis zwischen Quartilsabstand und Median dar und ist somit robuster gegen Ausreisser als der Varianzkoeffizient. Die thermische Analyse erfolgte, wie im vorigen Kapitel bereits beschrieben, mittels Differenzkalimetrie. Die Daten der Serie wurden in zwei Diagrammen dargestellt, wobei eines die Schmelzkurve und das andere die Erstarrungskurve darstellt. Die Abszisse beschreibt die Temperatur und die Ordinate den Wärmestrom bezogen auf die Probenmasse. Da die verschiedenen Unterserien zwecks besserer Lesbarkeit mittels Offset erstellt wurden, sind auf der Ordinate keine absoluten Werte ablesbar. Die Beschriftung 'Exo Down' beschreibt, in welche Richtung exotherme Vorgänge im Graphen ausschlagen. Grundsätzlich wurde bei der thermischen Analyse immer die komplette Serie betrachtet. Bei Blends beschreibt die Legende die Mischungsverhältnisse der Kunststoffe und bei den Sortierungen die Konfiguration (OP/IP, HW/CW). Mittels der Daten der Blends sollte ein Zusammenhang zwischen Schmelzenthalpie des Kontaminationskunststoffes und der tatsächlichen Kontamination in Massenprozent hergestellt werden. Mit den gewonnenen Datenpunkten wurden Funktionen in Form von Regressionsgeraden erstellt. Diese Funktionen wurden anschließend auf die Schmelzenthalpie der Verunreinigungen in den Sortierungen angewendet um damit auf die Kontaminationen der Recyclingserien zu schließen. Die errechneten Kontaminationen wurden mit den Ergebnissen der Handsortierung verglichen und interpretiert. Das Prozedere stellt eine etwas vereinfachte quantitative Analyse der Kontamination von Kunststoffen dar, welche in [48] als auch [49] beschrieben werden.

Diese Analyse kann natürlich nur als grober Richtwert der Kontamination betrachtet werden, da in realen Kunststoffabfallströmen verschiedene Konfigurationen von PE als auch PP vorkommen bzw. auch unterschiedlichste Additive für Spezialanwendungen enthalten sind, welche die thermische Analyse im Gegensatz zu denen der Modellsreihe verzerren.

3.1 Blends

3.1.1 Polypropylen Random Copolymer - High Density Polyethylen

3.1.1.1 Mechanische Prüfung

Abbildung 3.1 und Tabelle 3.2 zeigen die Ergebnisse der Zugprüfung grafisch sowie quantitativ aufbereitet.

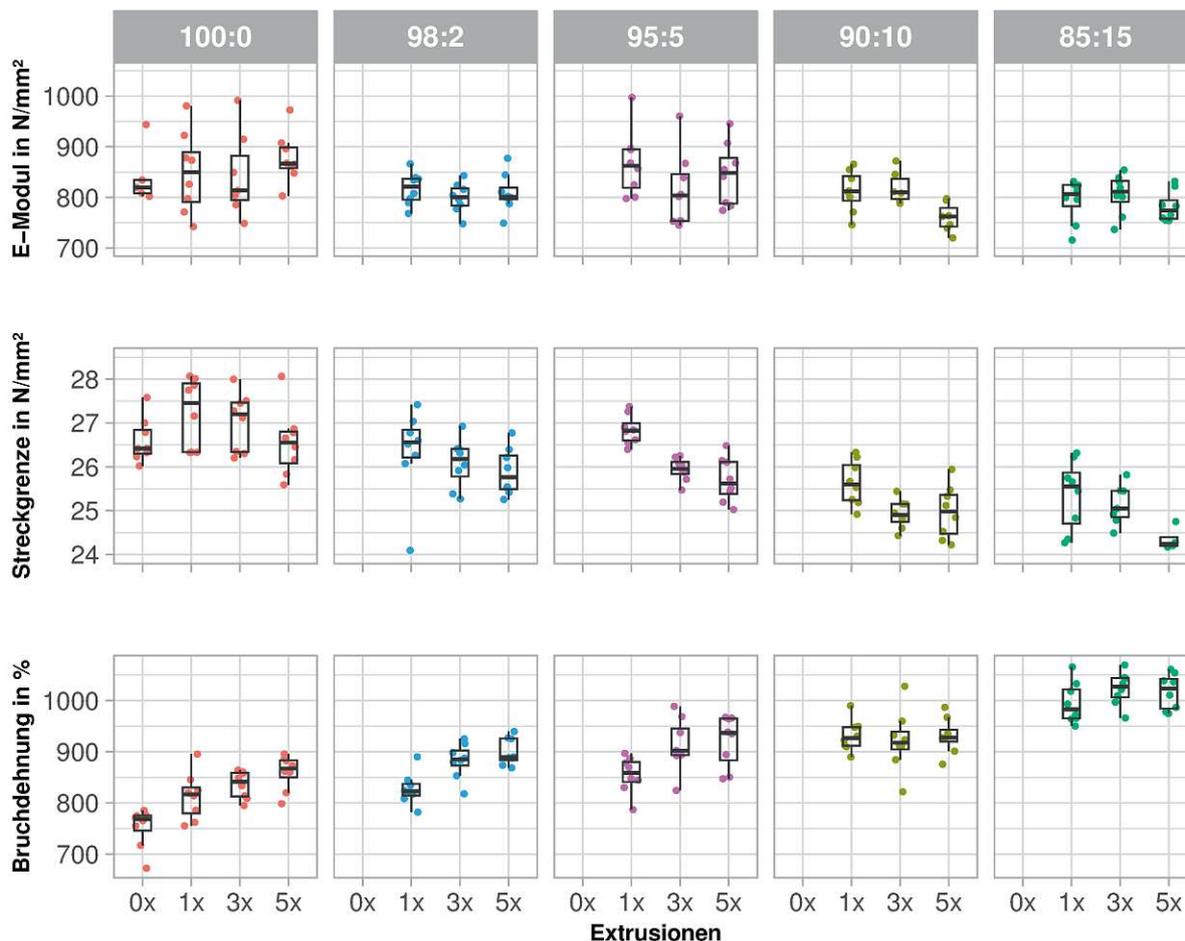


Abbildung 3.1: Boxplots der Zugprüfungsergebnisse der Serie PP-Random Copolymer + PE-High Density

Die Mittelwerte der **Streckspannung** verlieren pro Verarbeitung an Wert. Umso höher die Kontamination mit HDPE ist, desto niedriger werden auch die erzielten Streckspannungen nach der ersten Verarbeitung. Ab einer Kontamination von 10% ist ein erheblicher Sprung zu erkennen, denn hier ist der Mittelwert der Streckspannung nach der ersten Verarbeitung geringer als der der fünften Verarbeitung mit 5%. Mit einem Variationskoeffizienten von maximal 3,8% gibt es nur ein geringes Maß an Streuung. Der **Elastizitätsmodul** bleibt relativ konstant über alle Verarbeitungen und Kontaminationen zwischen $48,6 \text{ N/mm}^2$ und $877,6 \text{ N/mm}^2$, wobei eine Streuung von bis zu 13,6% zu verzeichnen ist.

Die minimale **Bruchdehnung** steigt mit zunehmenden Konatminationsgehalt an. Dies gilt für alle ausgewerteten Bruchdehnungswerte. Der Wert des unteren Quartils steigt vom niedrigsten Wert von 745,2% bei 0% Kontamination auf über 1000% bei 15% Kontamination. Ebenso ist der Varianzkoeffizient der Bruchdehnung über die ganze Serie hinweg gering mit einem Maximalwert von 6,4%.

Die **Höchstspannung** ist für die komplette Serie zu 100% höher als die Streckspannung.

Die Auswertung der Schlagzugzähigkeitsprüfung ist in Abbildung 3.2 bzw. Tabelle 3.1 einzusehen.

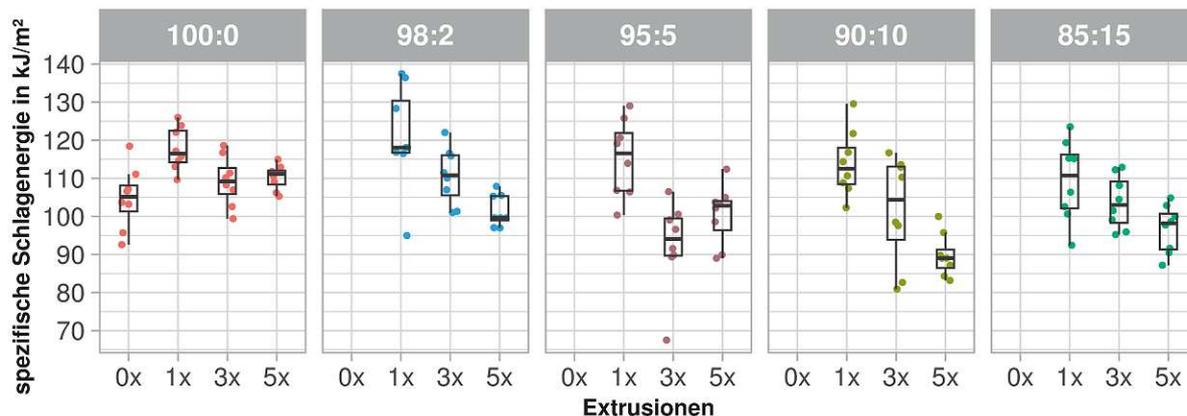


Abbildung 3.2: Boxplots der Schlagzugfähigkeitsversuchsergebnisse der Serie PP-Random Copolymer + PE-High Density

In Abbildung 3.2 kann man erkennen, dass vor allem die Verarbeitungen einen negativen Effekt auf die mittlere Schlagenergie haben. Die Kontamination hat keinen relevanten Einfluss auf Mittelwert oder Median. Diese bewegen sich im Bereich von $100 \pm 10 \text{ kJ/m}^2$. Beim Varianzkoeffizient sowie beim Quartilsdispersionskoeffizient ist zu erwähnen, dass die nicht kontaminierte Serie die geringste Streuung besitzt. Man kann aber auch nicht behaupten, dass die Streuung der Werte mit steigendem Kontaminationsgehalt steigt.

Tabelle 3.1: Statistische Kennwerte für den Schlagzugfähigkeitsversuch der Serie PP Random Copolymer + PE High Density

Kontamination Verarbeitungen	0%				2%			5%			10%			15%		
	0x	1x	3x	5x	1x	3x	5x	1x	3x	5x	1x	3x	5x	1x	3x	5x
Mittelwert Schlagenergie in kJ/m^2	104,8	117,8	109,3	110,3	113,9	101,6	89,8	109,4	103,7	96,7	120,8	110,7	101,4	115,3	92,6	100,5
Median Schlagenergie in kJ/m^2	105,1	116,5	109,2	111,1	112,5	104,4	89	110,8	103	98,2	118,1	110,8	99,6	116,5	94,1	102,8
Varianzkoeffizient in %	7,8	4,8	6	3	7,6	13,9	6,3	9,7	6,7	6,5	11,3	6,7	4,1	8,8	12,7	7,8
Quartildispersionskoeff. in %	6,5	7,1	6,3	3,3	8,5	18,4	5,4	12,8	10,5	9,6	11,5	9,5	6,4	13	10,4	7,4

Tabelle 3.2: Statistische Kennzahlen für Streckspannung, E-Modul und Bruchdehnung der Serie PP Random Copolymer + PE High Density

Kontamination	Verarbeitung	Mittelwert Streckspannung in N/mm^2	Veränderung Streckspannung	Varianzkoeffizient Streckspannung in %	Mittelwert E-Modul in N/mm^2	Veränderung E-Modul	Varianzkoeffizient E-Modul in %	Minimale Bruchdehnung in %	Lower Hinge Bruchdehnung in %	Veränderung Lower Hinge	Mittelwert Bruchdehnung in %	Varianzkoeffizient Bruchdehnung in %	Höchstspannung > Streckspannung in %
0%	0x	26,6	2,4%	1,9	26,6	2,4%	1,9	672,2	745,54	5%	753,2	5,1	100
0%	1x	27,2	-0,8%	2,9	27,2	-0,8%	2,9	755,1	779,5	4%	812,6	5,6	100
0%	3x	27,0	1,8%	2,5	27,0	1,8%	2,5	794,9	813,0	4,6%	835,3	3,2	100
0%	5x	26,6		2,9	26,6		2,9	798,5	850,0		859,6	3,9	100
2%	1x	26,4	-1%	3,8	26,4	-1%	3,8	781,8	814,6	7%	827,7	3,8	100
2%	3x	26,1	-0,8%	2,1	26,1	-0,8%	2,1	817,7	873,3	1%	882,6	3,9	100
2%	5x	25,9		2,1	25,9		2,1	868,5	883,8		900,0	3,0	100
5%	1x	26,4	-1%	3,8	26,4	-1%	3,8	781,8	814,6	7%	827,7	3,8	100
5%	3x	26,1	-0,8%	2,1	26,1	-0,8%	2,1	817,7	873,3	1%	882,6	3,9	100
5%	5x	25,9		2,1	25,9		2,1	868,5	883,8		900,0	3,0	100
10%	1x	26,4	-1%	3,8	26,4	-1%	3,8	781,8	814,6	7%	827,7	3,8	100
10%	3x	26,1	-0,8%	2,1	26,1	-0,8%	2,1	817,7	873,3	1%	882,6	3,9	100
10%	5x	25,9		2,1	25,9		2,1	868,5	883,8		900,0	3,0	100
15%	1x	25,4	-1,6%	3,1	793,7	1%	5,3	950,2	965,1	4%	995,3	4,0	100
15%	3x	25,0	-4,2%	2,6	805,5	-3%	4,9	966,0	1006,4	-2%	1023,2	3,2	100
15%	5x	23,9		2,6	781,9		3,9	974,7	984,6		1017,6	3,4	100

3.1.1.2 Thermische Analyse

In Abbildung 3.3 ist die Schmelz- und Erstarrungskurve von PP-RCP und PEHD zu sehen.

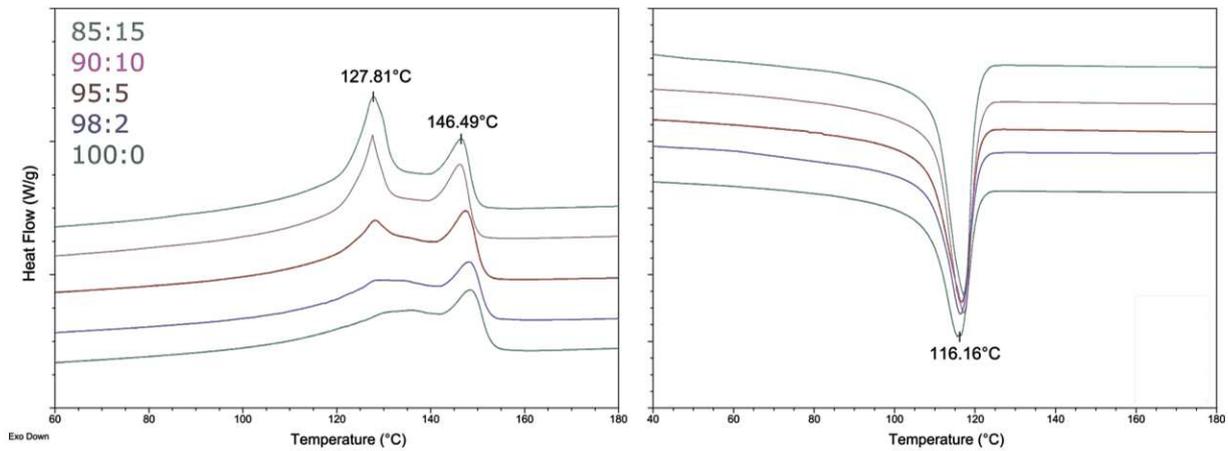


Abbildung 3.3: Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC des Polypropylen Random Copolymer & Polyethylen High Density Blends

Man erkennt unschwer, dass sich die Schmelzpeaks überlagern und eine Doppelspitze formen. Neben der Schmelztemperatur von circa 127 °C lassen auch die steigenden Maxima der linken Schmelzpeaks auf das Kontaminationsmaterial Polyethylen High Density schließen. Erwähnenswert ist, dass schon ab einer Kontamination von nur 5% der Schmelzpeak von Polyethylen den des Polypropylens übersteigt. Zur Erstellung der Regressionsgeraden wurden die Schmelzenthalpien der Kontaminationspeaks berechnet. Als untere Schranke des Integrals wurde eine Gerade erstellt, welche eine tangentielle Weiterführung des nahezu linearen Bereichs zwischen Glasübergang und Schmelzbereich bis zum lokalen Minimum zwischen der Doppelspitze darstellt. In Tabelle 3.3 sind die gemessenen Schmelzenthalpien je nach Kontamination des Kontaminationskunststoffes einzusehen. Dadurch, dass die enthaltenen Ethylenglieder im Polypropylen Random Copolymer ebenfalls einen separaten Peak bei 0% Kontamination ausbilden, muss dieser separate Peak des Ethylens, quasi als Offset, für die Berechnung der Regressionsgerade weggerechnet werden. Diese Werte sind unter dem Reiter 'bereinigt' angegeben. Die Regressionsgeradengleichung, welche sich aus den gegebenen Daten ergibt, ist ebenfalls in der Tabelle einzusehen. Grafisch sind sowohl die Regressionsgerade als auch die bereinigten Datenpunkte in Grafik 3.4 aufgearbeitet.

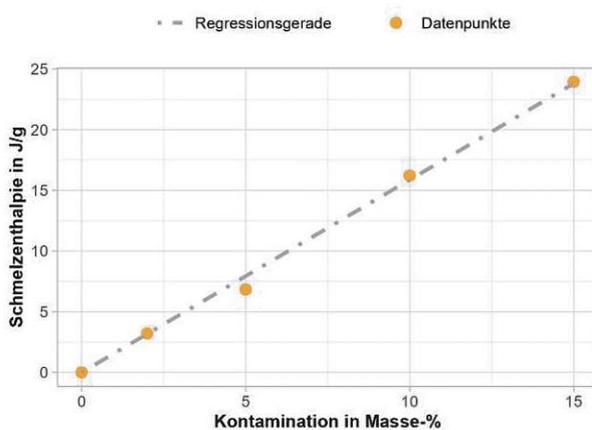


Abbildung 3.4: Regressionsgerade

Tabelle 3.3: Schmelzenthalpien & Geradengleichung

Kontamination in Prozent	Schmelzenthalpie in J/g	
	<i>gemessen</i>	<i>bereinigt</i>
0	6,75	0
2	9,97	3,22
5	13,58	6,83
10	22,97	16,22
15	30,70	23,95

Regressionsgeradengleichung:

$$y = 1,587 * x$$

3.1.2 Polypropylen Random Copolymer - Linear Low Density Polyethylen

3.1.2.1 Mechanische Prüfung

Die grafische Aufbereitung der Ergebnisse ist in Abbildung 3.5 zu sehen.

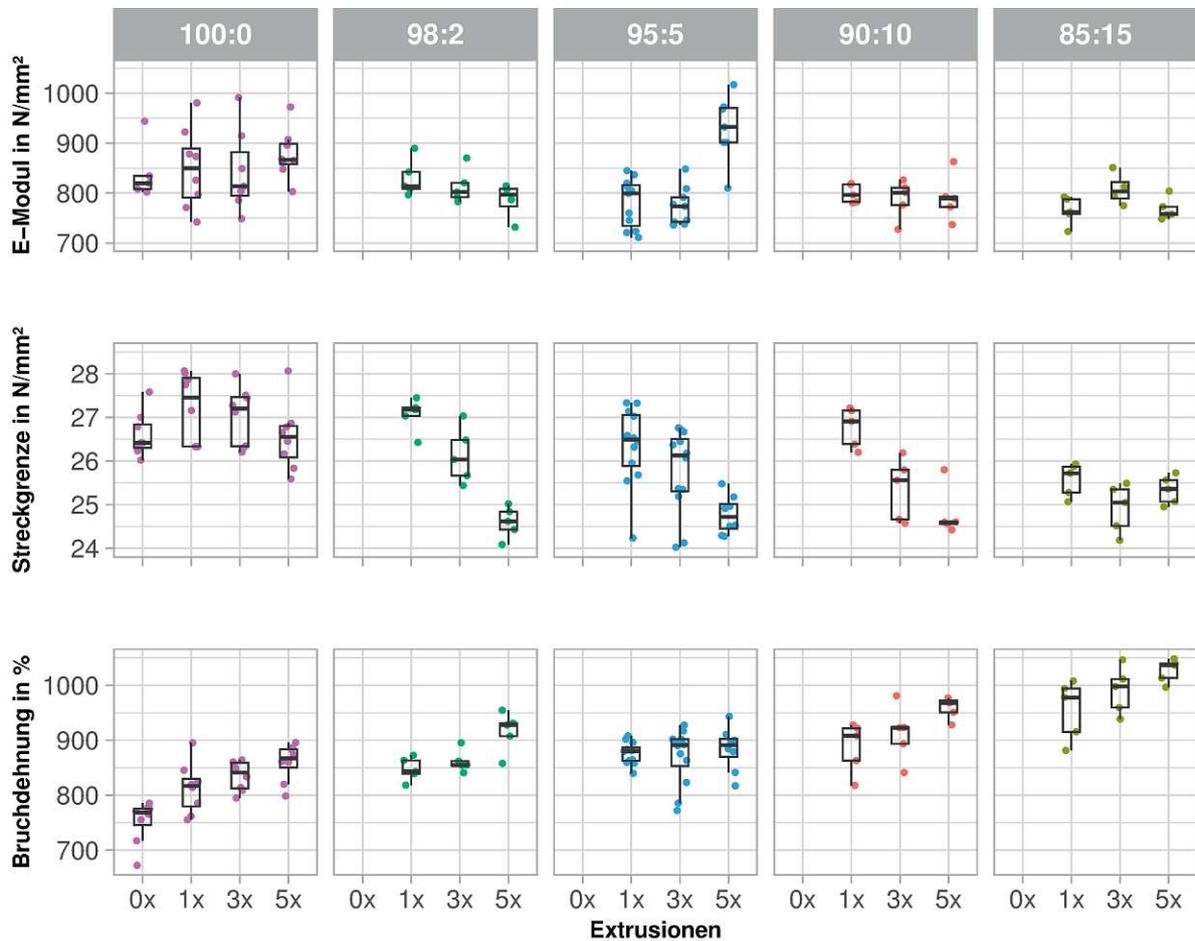


Abbildung 3.5: Boxplots der Zugprüfungsergebnisse der Serie PP-Random Copolymer + PE-Linear Low Density

Die dazugehörigen berechneten statistischen Kennzahlen sind in Tabelle 3.5 ersichtlich. Auch hier zeigt sich, dass die mittlere **Streckspannung** sowohl über Extrusionen als auch Kontaminationsgehalt kontinuierlich - bis auf zwei Ausnahmen - bei geringem Varianzkoeffizient von maximal 3,7% abnimmt. Wobei auch hier die Mehrfachverarbeitung einen höheren Einfluss auf die Werte hat als die Kontamination.

Das **Elastizitätsmodul** ist über alle Kontaminationen und Extrusionen fast gleichbleibend und schwankt im mittleren einstelligen Bereich. Es gibt einen markanten Ausreißer nach oben bei der fünften Verarbeitung bei 5% Kontamination, wo die Veränderung des Elastizitätsmoduls um 21% im Vergleich zur dritten Verarbeitung steigt.

Die **Bruchdehnung** verhält sich ähnlich wie bei der letzten beschriebenen Serie. Diese steigt mit Verarbeitung als auch Kontaminationsgrad an. Der Höchstwert des Lower Hinges ist mit 1013% beim maximalen Kontaminationsgrad und der fünften Extrusion zu finden. Der Varianzkoeffizient bewegt sich über alle Serien in ähnlichen Bereichen zwischen 2,1% und 5,8%.

Auch hier ist die Höchstspannung über alle Serien für alle getesteten Proben höher als die Streckspannung.

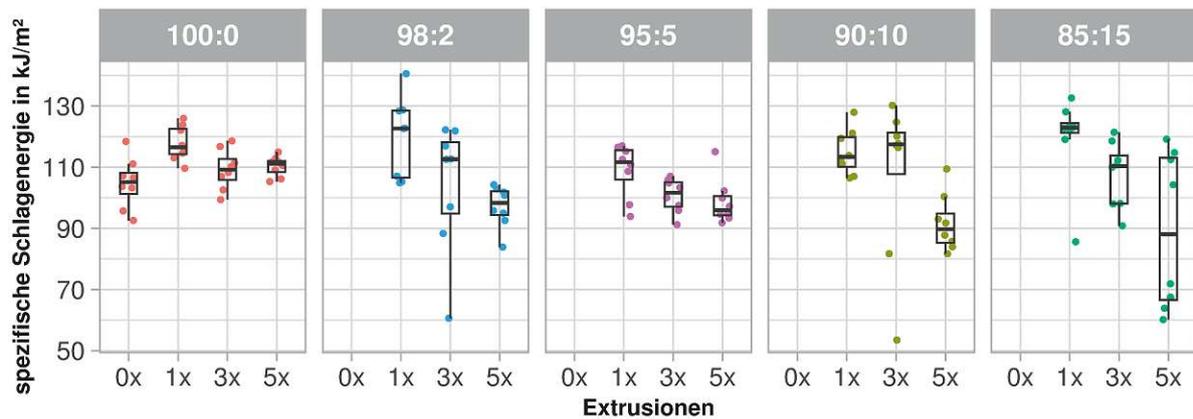


Abbildung 3.6: Boxplots der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der Serie PP-Random Copolymer + PE-Linear Low Density

Abbildung 3.6 bzw. Tabelle 3.4 zeigt die Ergebnisse der Schlagzugzähigkeitsprüfung. Auch hier ist wieder zu sehen, dass vor allem die Mehrfachverarbeitung die maximal aufnehmbare Schlagenergie beeinträchtigt und weniger die Kontamination. Die Streuung der Werte insbesondere bei 2% Kontamination dritte Verarbeitung und 15% Kontamination fünfte Verarbeitung beinhalten sehr große Streuungen. Die Varianzkoeffizienten belaufen sich auf 20,4% bzw. 28,6%. Bei 15% Kontamination und der fünften Verarbeitung beträgt der Interquartilsabstand über 40 kJ/m^2 , was einen Quartildispersionskoeffizienten von über 53% zur Folge hat. Diese Werte lassen keine zuverlässigen Aussagen zu erwartbaren Mittelwerten bzw. Medianen zu.

Tabelle 3.4: Statistische Auswertung der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der Serie PP-Random Copolymer + PE-Linear Low Density

Kontamination Verarbeitungen	0%				2%				5%				10%			15%	
	0x	1x	3x	5x	1x	3x	5x	1x	3x	5x	1x	3x	5x	1x	3x	5x	
Mittelwert Schlagenergie in kJ/m^2	104,8	117,8	109,3	110,3	120	104	97,1	109	100,7	98,6	115	107,7	91,7	119,6	107,5	89,3	
Median Schlagenergie in kJ/m^2	105,1	116,5	109,2	111,1	122,7	112,6	98,3	111,7	101,7	96	113,4	117,5	89,8	122,9	110,4	88,1	
Varianzkoeffizient in %	7,8	4,8	6	3	10,9	20,4	7	8	5,5	7,6	6,4	24,4	10,1	12	10	28,6	
Quartildispersionskoeff. in %	6,5	7,1	6,3	3,3	17,8	20,7	7,9	8,6	7,9	6,5	8,6	11,6	10,7	2,6	14,2	52,8	

Kontamination	Verarbeitung	Mittelwert Streckspannung in N/mm^2	Veränderung Streckspannung	Varianzkoeffizient Streckspannung in %	Mittelwert E-Modul in N/mm^2	Veränderung E-Modul	Varianzkoeffizient E-Modul in %	Minimale Bruchdehnung in %	Lower Hinge Bruchdehnung in %	Veränderung Lower Hinge	Mittelwert Bruchdehnung in %	Varianzkoeffizient Bruchdehnung in %	Höchstspannung > Streckspannung in %
0%	0x	26,6		1,9	26,6	2,4%	1,9	672,2	745,5		753,2	5,1	100
0%	1x	27,2	2,4%	2,9	27,2	-0,8%	2,9	755,1	779,5	5%	812,6	5,6	100
0%	3x	27,0	-0,8%	2,5	27,0	1,3%	2,5	794,9	813,0	4%	835,3	3,2	100
0%	5x	26,6	1,8%	2,9	26,6		2,9	798,5	850,0	4,6%	859,6	3,9	100
2%	1x	27,1		1,4	27,1	-3,4%	1,4	818,1	839,0		847,2	2,5	100
2%	3x	26,1	-3,4%	2,5	26,1	-5,9%	2,5	840,8	854,2	2%	861,4	2,4	100
2%	5x	24,6	-5,9%	1,5	24,6		1,5	857,8	907,4	6%	915,6	4,0	100
5%	1x	27,1		1,4	27,1	-3,4%	1,4	818,1	839,0		847,2	2,5	100
5%	3x	26,1	-3,4%	2,5	26,1	-5,9%	2,5	840,8	854,2	2%	861,4	2,4	100
5%	5x	24,6	-5,9%	1,5	24,6		1,5	857,8	907,4	6%	915,6	4,0	100
10%	1x	27,1		1,4	27,1	-3,4%	1,4	818,1	839,8		847,2	2,5	100
10%	3x	26,1	-3,4%	2,5	26,1	-5,9%	2,5	840,8	854,2	2%	861,4	2,4	100
10%	5x	24,6	-5,9%	1,5	24,6		1,5	857,8	907,4	6%	915,6	4,0	100
15%	1x	25,6		1,5	764,7		3,6	881,47	915,2		955,3	5,7	100
15%	3x	24,9	-2,6%	2,2	785,5	3%	7,4	938,6	959,5	5%	990,7	5,7	100
15%	5x	25,3	1,7%	1,3	776,9	-2%	2,9	996,5	1013,2	6%	1025,8	2,1	100

Tabelle 3.5: Statistische Kennzahlen für Streckspannung, E-Modul und Bruchdehnung der Serie PP Random Copolymer + PE PE-Linear Low Density

3.1.2.2 Thermische Analyse

Auch bei der Konfiguration PP-RCP und PE-LLD bildet sich beim Schmelzen eine Doppelspitze aus, wie in 3.7 zu sehen ist.

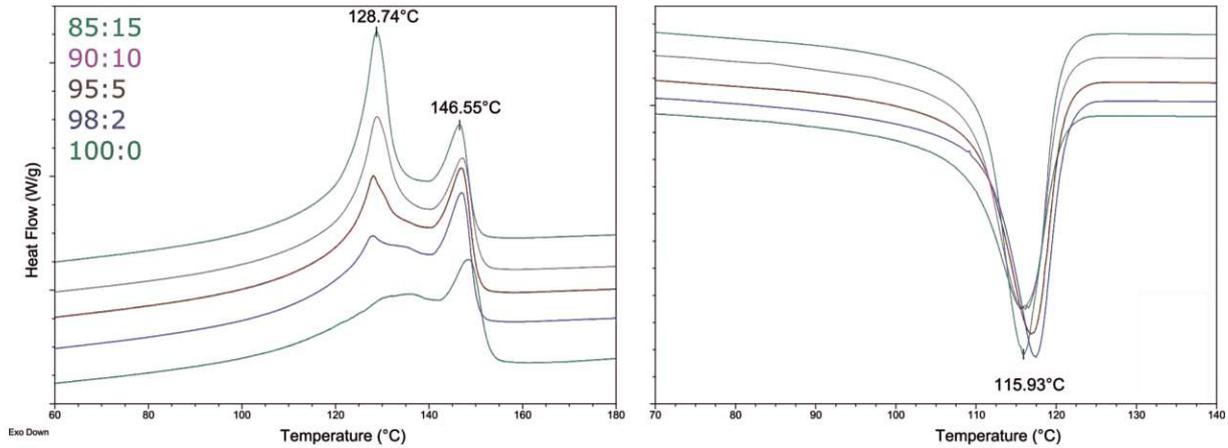


Abbildung 3.7: Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC des Polypropylen Random Copolymer & Polyethylen Linear Low Density Blends

Die Schmelztemperatur des Kontaminationskunststoffes beträgt circa 129 °C. Die höheren Spitzen der Schmelzenthalpie sind auf eine höhere Wärmekapazität von PE-LLD im Gegensatz zu PE-HD zurückzuführen. Die untere Schranke des Integrals zur Berechnung der Schmelzenthalpie des Kontaminationskunststoffes ist wie schon bei der Kombination PP-RCP und PEHD die Weiterführung des fast linearen Bereichs bis zum lokalen Minimum zwischen der Doppelspitze. Die Werte der Schmelzenthalpien sowie die Regressionsgerade sind sehr ähnlich der PP-RCP & PE-HD Konfiguration. Die Werte der Schmelzenthalpien, gemessen als auch bereinigt, die sich daraus ergebende Formel der Regressionsgeraden bzw. die grafische Aufarbeitung dazu sind in Abbildung 3.8 und Tabelle 3.3 zu sehen.

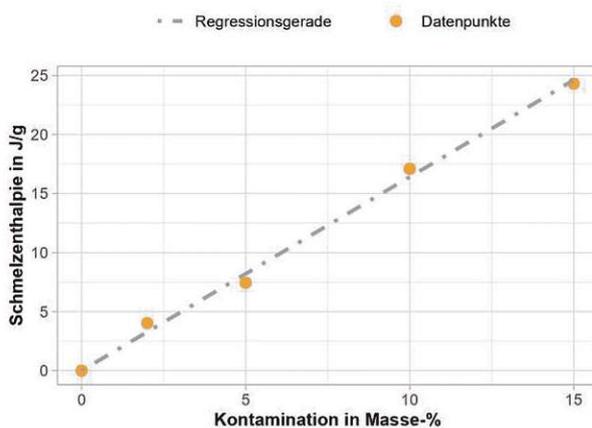


Abbildung 3.8: Regressionsgerade

Tabelle 3.6: Schmelzenthalpien & Geradengleichung

Kontamination in Prozent	Schmelzenthalpie in J/g	
	<i>gemessen</i>	<i>bereinigt</i>
0	7,46	0
2	11,49	4,02
5	14,91	7,44
10	24,55	17,08
15	31,77	24,30

Regressionsgeradengleichung:
 $y = 1,64 * x$

3.1.3 High Density Polyethylen - Polypropylen Random Copolymer

3.1.3.1 Mechanische Prüfung

In Abbildung 3.9 sind die Boxplots der Zugprüfungsergebnisse zu sehen, Tabelle 3.8 stellt die quantitative Auswertung dar.

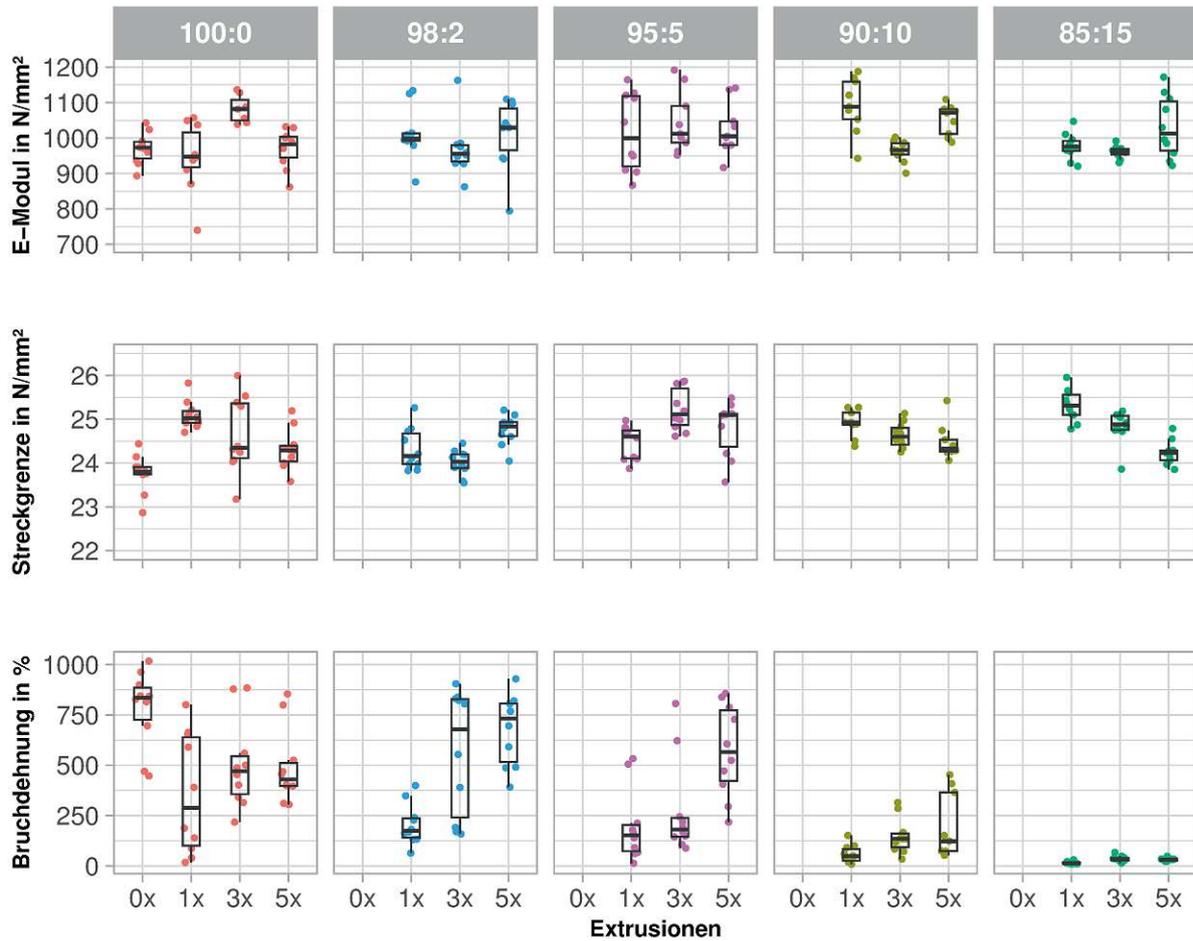


Abbildung 3.9: Boxplots der Zugprüfungsergebnisse der Serie PE High Density + PP Random Copolymer

Für die Streckspannung ergibt sich hier ein mehr oder weniger umgekehrtes Bild zu den zwei zuvor untersuchten Serien. Hier bildet der weichere Werkstoff Polyethylen die Matrix und Polypropylen die diskontinuierliche Phase. Die mittlere Streckspannung steigt über die Kontamination mit Polypropylen im Durchschnitt leicht an. Der Varianzkoeffizient ist gering und erreicht Werte zwischen 1,2% und 3,5%. Das **Elastizitätsmodul** ist grundsätzlich höher als bei den zuvor getesteten Blends und bewegt sich in einem Bereich von 960 N/mm^2 bis 1091 N/mm^2 . Der Varianzkoeffizient bewegt sich zu meist im einstelligen Bereich und erreicht ein Maximum von 10,9%.

Die **Bruchdehnung** hingegen nimmt mit der Kontamination ab. Bei 0% Kontamination ist noch ein Lower Hinge von bis zu 726% zu beobachten, bei 15% Kontamination sinkt er auf 12,1% ab. Eine weitere unerwartete Diskrepanz zu den anderen Serien ist, dass die Bruchdehnung pro Extrusion zu steigen scheint. Sechs von elf Werten der Veränderung des Lower Hinges per Verarbeitung steigen über 100%. Die höchste Steigerung liegt bei 256% bei 0% Kontamination zwischen erster und dritter Extrusion. Bemerkenswert ist auch die Streuung der Bruchdehnung, welche durch die bereitgestellte Grafik täuscht.

Da ein großer Bereich der Bruchdehnung abgebildet ist, lässt sich im ersten Moment vermuten, dass die Streuung der Werte gering zu sein scheint, da die Punkte bzw. Boxen eng beieinander liegen. Tatsächlich sind die Varianzkoeffizienten viel höher als bei den Polypropylen Blends. Der geringste Wert beläuft sich schon auf 24,5% und gipfelt bei 91,8%.

Im Gegensatz zur Polypropylen Blends entspricht hier die Streckspannung auch immer der Höchstspannung.

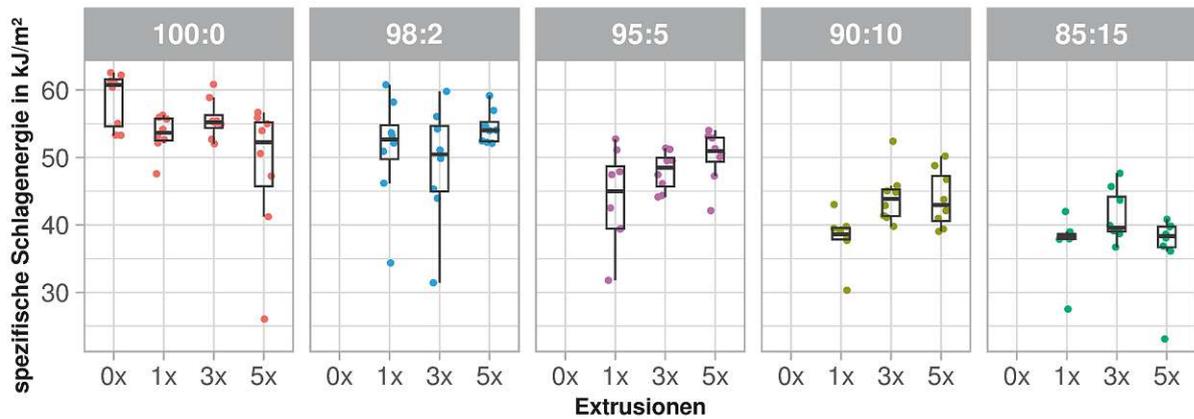


Abbildung 3.10: Boxplots der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der Serie PE High Density + PP- Random Copolymer

In Abbildung 3.10 bzw. Tabelle 3.7 sind die Ergebnisse der Schlagzugzähigkeitsprüfung zu sehen. Die Mittelwerte bzw. Mediane der Schlagenergie bewegen sich zwischen 36,6 kJ/m² und 58,7 kJ/m². Es ist ein eindeutiger Abwärtstrend mit zunehmender Kontamination zu erkennen. Ähnlich wie bei der Streckspannung ist pro Verarbeitung ein leichter Anstieg der Mittelwerte zu verzeichnen. Keine einzige Unterserie hat sich qualifiziert nur fünf Proben zu prüfen, da der Varianzkoeffizient konstant über 5% lag.

Tabelle 3.7: Statistische Auswertung der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der Serie PE High Density + PP Random Copolymer

Kontamination Verarbeitungen	0%				2%				5%				10%				15%			
	0x	1x	3x	5x																
Mittelwert Schlagenergie in kJ/m ²	58,7	53,5	55,7	48,3	51,2	49	54,5	44	48	50,2	38,2	44,2	43,9	37,4	41,3	36,6				
Median Schlagenergie in kJ/m ²	60,7	53,7	55,2	52,3	52,7	50,5	54	45	48,5	50,9	38,6	43,9	43	38,3	39,6	38,4				
Varianzkoeffizient in %	6,9	5,3	5,3	21,5	15,8	18,1	4,6	16	6	7,7	9,4	9	9,7	11,3	9,3	15,5				
Quartildispersionskoeff. in %	11,4	6	3,4	18,2	9,6	19,3	5,3	20,6	8,8	7	4,5	9	15,6	1,9	13,1	8				

Tabelle 3.8: Statistische Kennzahlen für Streckspannung, E-Modul und Bruchdehnung der Serie PE High Density + PP Random Copolymer

Konfiguration	Verarbeitung	Mittelwert Streckspannung in N/mm^2	Veränderung Streckspannung	Varianzkoeffizient Streckspannung in %	Mittelwert E-Modul in N/mm^2	Veränderung E-Modul	Varianzkoeffizient E-Modul in %	Minimale Bruchdehnung in %	Lower Hinge Bruchdehnung in %	Veränderung Lower Hinge	Mittelwert Bruchdehnung in %	Varianzkoeffizient Bruchdehnung in %	Höchstspannung ^	Streckspannung in %
0%	0x	26,6	2,4%	1,9	26,6	2,4%	1,9	672,2	745,5	5%	753,2	5,1	0	
0%	1x	27,2	-0,8%	2,9	27,2	-0,3%	2,9	755,1	770,5	4%	812,6	5,6	0	
0%	3x	27,0	1,8%	2,5	27,0	1,8%	2,5	794,9	813,0	4,6%	835,3	3,2	0	
0%	5x	26,6	1,8%	2,9	26,6	1,8%	2,9	793,5	850,8	4,6%	859,6	3,9	0	
2%	1x	27,1	-3,4%	1,4	27,1	-3,4%	1,4	818,1	831,0	2%	847,2	2,5	0	
2%	3x	26,1	-5,9%	2,5	26,1	-5,9%	2,5	846,8	854,2	6%	861,4	2,4	0	
2%	5x	24,6	-5,9%	1,5	24,6	-5,9%	1,5	857,8	907,2	6%	915,6	4,0	0	
5%	1x	27,1	-3,4%	1,4	27,1	-3,4%	1,4	12,7	72,8	100%	196,7	91,8	0	
5%	3x	26,1	-5,9%	2,5	26,1	-5,9%	2,5	88,4	145,3	191%	274,1	87,8	0	
5%	5x	24,6	-5,9%	1,5	24,6	-5,9%	1,5	391,7	218,1	191%	422,3	39,7	0	
10%	1x	27,1	-3,4%	1,4	27,1	-3,4%	1,4	12,7	72,8	100%	196,7	91,8	0	
10%	3x	26,1	-5,9%	2,5	26,1	-5,9%	2,5	88,4	145,3	191%	274,1	87,8	0	
10%	5x	24,6	-5,9%	1,5	24,6	-5,9%	1,5	391,7	218,1	191%	422,3	39,7	0	
15%	1x	25,3	-1,9%	1,4	976,3	-2%	3,8	9,2	12,1	121%	15,5	41,1	0	
15%	3x	24,8	-2,4%	1,5	960,1	-7%	1,8	13,8	26,8	-1%	35,2	41,5	0	
15%	5x	24,2	-2,4%	1,1	1031,8	-7%	8,4	22,4	26,4	-1%	31,4	24,8	0	

3.1.3.2 Thermische Analyse

In Abbildung 3.11 sind die Schmelz- und Erstarrungskurven des PEHD & PP-RCP Blends zu sehen.

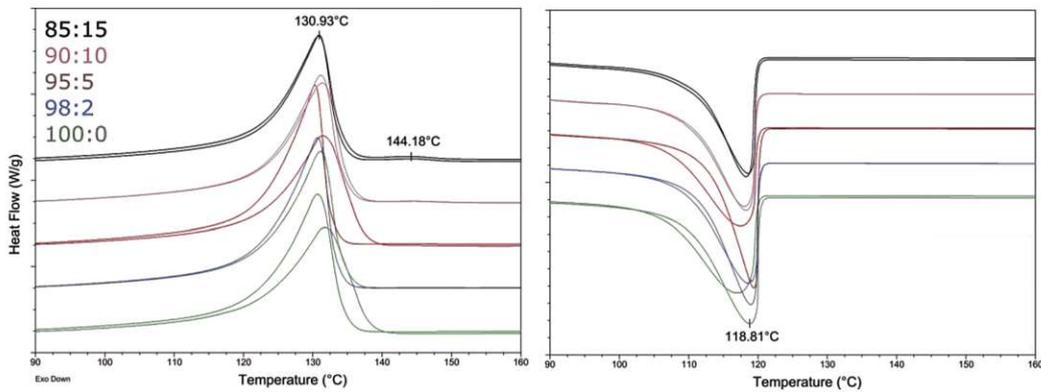


Abbildung 3.11: Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC des Polyethylen High Density & Polypropylen Random Copolymer Blends

Im Gegensatz zu den Polypropylenblends, wo durch das als Kontamination dienende Polyethylen gut ersichtliche Schmelzpeaks erkennbar sind, sind bei dieser Konfiguration fast keine Ausschläge des Kontaminationsmaterials PP-RCP messbar. Der größte berechnete Wert der Schmelzenthalpie beläuft sich auf 1,32 J/g bei 15% Kontamination. Bei PE als Kontaminationsmaterial beispielsweise ist bereits bei 2% Kontamination eine Schmelzenthalpie von 4 J/g messbar. Dadurch, dass die Kontamination aus einem Random Copolymer besteht, was bedeutet, dass neben den Propylengliedern auch Ethylenglieder in den Makromolekülen vorhanden sind, wird der Schmelzpeak des Polypropylen nochmal geringer, da ebenfalls ein Schmelzpeak aufgrund des Ethylens entsteht. Dies ist auch der Grund, warum in den vorher untersuchten Serien Doppelspitzen zu erkennen sind. Nun wurde schon erwähnt, dass die Höhe des Ausschlags des Schmelzpeaks bei geringen Mengen Polyethylen reichen um signifikante Erhöhungen messen zu können. Daher gibt es in Tabelle 3.9 bzw. in Abbildung 3.12 keine Datenpunkte für zwei Prozent Kontamination, da kein Ausschlag der Kurve messbar war. Es wurden dafür zwei Messungen für jede Kontamination durchgeführt um etwas mehr Sicherheit beim Erstellen der Regressionsgerade zu erhalten. Man erkennt schnell, dass sich die Gleichung als unplausibel herausstellt, da der Koeffizient mit 0,071 sehr klein ist. Wird die sich ergebende Regressionsgerade zur Berechnung der Kontamination hergezogen, wird durch einen Nenner kleiner eins dividiert, was selbst bei kleinen gemessenen Schmelzenthalpien zu hohen berechneten Kontaminationen führt.

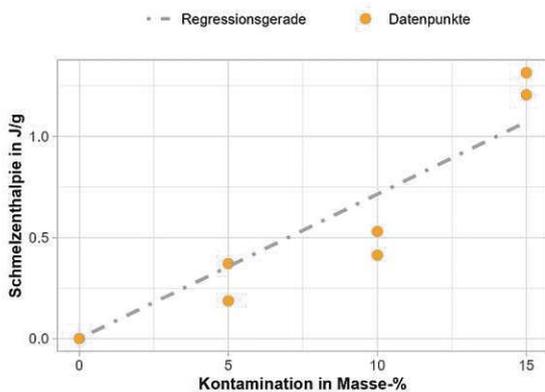


Abbildung 3.12: Regressionsgerade

Tabelle 3.9: Schmelzenthalpien & Geradengleichung

Kontamination in Prozent	Schmelzenthalpie in J/g	
	Messung 1	Messung 2
0	0,00	0,00
5	0,37	0,17
10	0,53	0,41
15	1,32	1,21

Regressionsgeradengleichung:
 $y = 0,071 * x$

3.1.4 Polypropylen Homopolymer - High Density Polyethylen

3.1.4.1 Thermische Analyse

Im Gegensatz zur restliche Modellserie werden bei der Miniserie zwei Homopolymere untersucht. Dieser Umstand ist auch leicht durch die zwei deutlich getrennten Schmelzpeaks erkennbar, welche in Abbildung 3.13 zu sehen sind. Bei circa 129 °C ist der Schmelzpeak von High Density Polyethylen zu sehen und bei rund 165 °C der Schmelzpeak des Polypropylen Homopolymers. Die Kontaminationen sind in den verschiedenen Kurven sehr gut zu erkennen. Die untere Schranke der Schmelzenthalpieberechnung des Kontaminationskunststoffes bildet wieder die Verlängerung des fast linearen Bereichs vor dem ersten Schmelzpeak und dem lokalen Minimum zwischen den Schmelzpeaks.

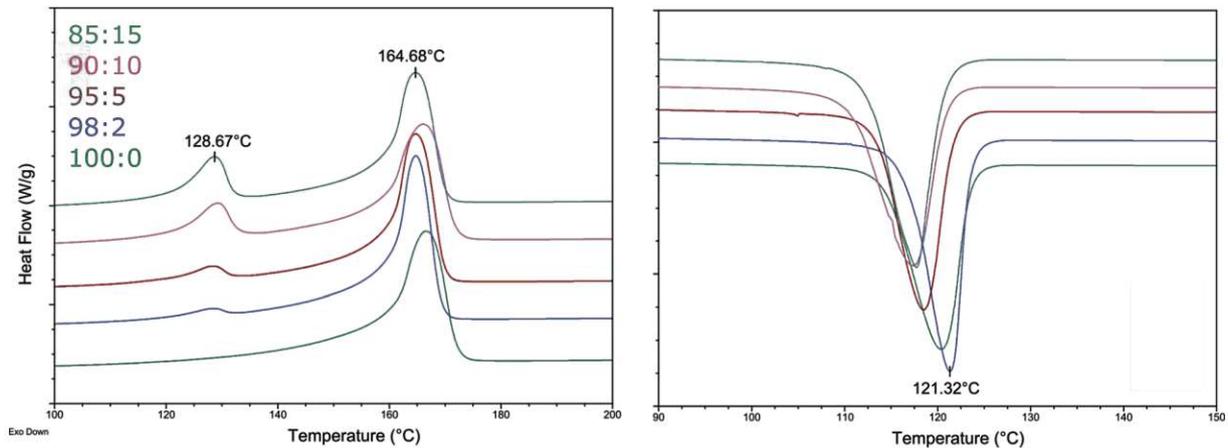


Abbildung 3.13: Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC des Polypropylen Homopolymer & Polyethylen High Density Blends

Aufgrund der zwei verwendeten Homopolymere ergibt sich bei der errechneten Regressionsgerade auch keine Konstante, welche von den gemessenen Schmelzenthalpien abgezogen werden muss, da hier natürlich keine Ethylenanteile kompensiert werden müssen. Die berechneten Schmelzenthalpien sowie die dazugehörige Regressionsgerade sind grafisch als auch quantitativ in Abbildung 3.14 und Tabelle 3.10 zu sehen.

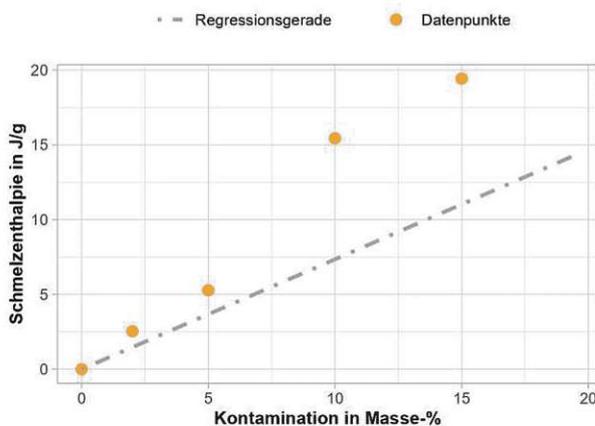


Abbildung 3.14: Regressionsgerade

Tabelle 3.10: Schmelzenthalpien & Geradengleichung

Kontamination in Prozent	Schmelzenthalpie in J/g
0	0,0
2	2,53
5	5,27
10	15,43
15	19,42

Regressionsgeradengleichung:
 $y = 1,35 * x$

3.1.5 High Density Polyethylen - Polypropylen Homopolymer

3.1.5.1 Thermische Analyse

Ähnlich dem Blend Polyethylen High Density und Polypropylen Random Copolymer erkennt man in Abbildung 3.15, dass die benötigte Schmelzenergie für Polyethylen um ein Vielfaches höher ist als für Polypropylen.

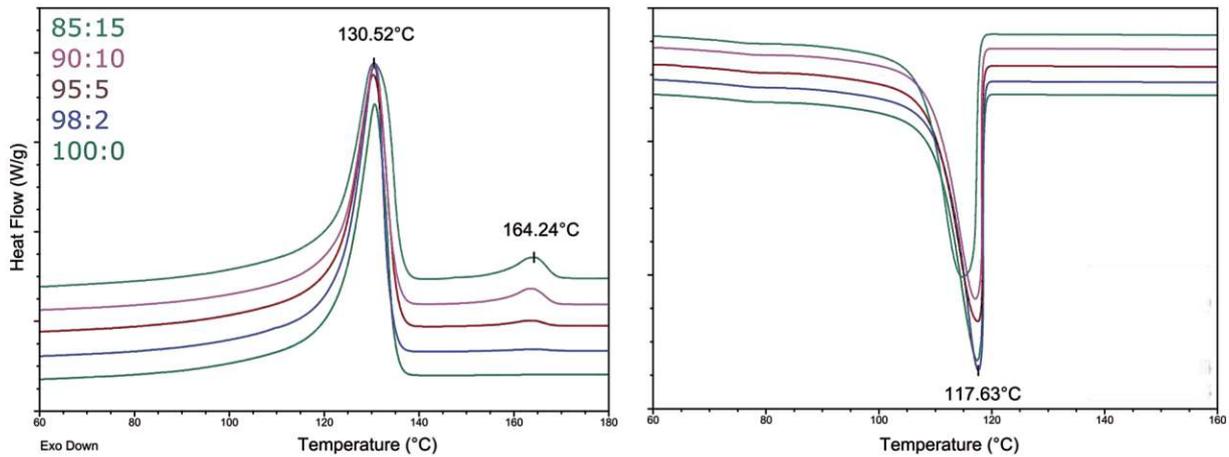


Abbildung 3.15: Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC des Polyethylen High Density & Polypropylen Homopolymer Blends

Allein der visuelle Vergleich zwischen Abbildung 3.13 und 3.15 legt dies nahe. Im Gegensatz zur Kombination PE-HD und PP-RCP sind die Ausschläge des Kontaminationsmaterials aufgrund des Homopolymers besser erkennbar. Die Schmelzenthalpie bei 2% Kontamination fällt hier ebenfalls gering mit 2,53 J/g aus und ist im Graph fast nicht erkennbar. Die untere Schranke des Schmelzenthalpieintegrals stellt die Gerade vom Minimum nach dem Polyethylen Schmelzpeak dar und endet an dem Punkt, wo die Wärmezufuhr konstant bleibt, da hier bereits die gesamte Probe als Schmelze vorliegt und somit ein konstanter Zusammenhang zwischen zugeführter Wärme und Temperaturanstieg besteht. Die Regressionsgerade, welche aus den angegebenen Werten, siehe Tabelle 3.11, berechnet wird, besitzt auch hier aufgrund des Homopolymers keine Offsetkonstante. Grafisch sind die Datenpunkte und die Regressionsgerade in 3.16 zu sehen.

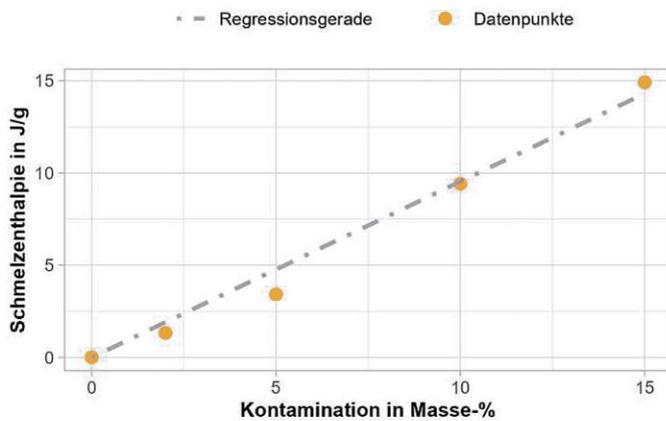


Abbildung 3.16: Regressionsgerade

Tabelle 3.11: Schmelzenthalpien & Geradengleichung

Kontamination in Prozent	Schmelzenthalpie in J/g
0	0,0
2	1,33
5	3,42
10	9,41
15	14,91

Regressionsgeradengleichung:
 $y = 0,95 * x$

3.2 Rezyklate

Im folgenden Abschnitt werden neben den Prüfungs- und Analyseergebnissen auch die Sortierungsergebnisse der Rezyklatserie vorgestellt. Je nach Serie werden die Flakes zwischen Haupt- und Kontaminationsmaterial getrennt. Zusätzlich wird das Hauptmaterial noch farblich getrennt. Bei einer Serie wird aufgrund des hohen Folienanteils zusätzlich zwischen Folien und Flakes unterschieden. In sogenannten 'Sunburst' Diagrammen werden die Sortiererergebnisse grafisch aufgeschlüsselt. Die mittige Grafik beschreibt immer die Aufteilung zwischen Hauptmaterial und Kontamination. Das rechte Diagramm behandelt die Zusammensetzung der Kontamination und das linke Diagramm die Zusammensetzung des Hauptmaterials. Zusätzlich sind die Ergebnisse in einer Tabelle festgehalten, wo neben den relativen Anteilen der Komponenten auch absolute Werte zu finden sind.

Die Auswertung der mechanische Prüfung erfolgt mit dem gleichen Prozedere wie am Anfang des Kapitels beschrieben.

Bei der thermischen Analyse werden nun die passenden Regressionsmodelle angewendet um auf eine Kontamination der Sortierung zu schließen. Die Werte der Flakes werden anschließend mit denen der Handsortierung verglichen.

3.2.1 ER Polypropylen Sortierung

3.2.1.1 ER Polypropylen kaltgewaschene Post Consumer Flakes - Sortierergebnisse

In Abbildung 3.17 ist das Sortierergebnis der bunten kaltgewaschenen Polypropylen Sortierung zu sehen.

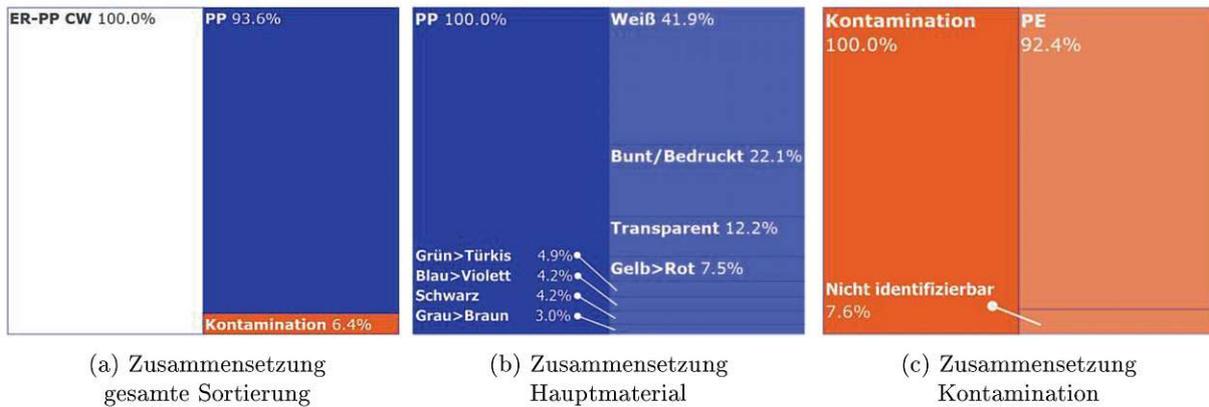


Abbildung 3.17: Flakeanalyse für ER Polypropylen kaltgewaschene post consumer Flakes

Im sortierten Sample wird eine Kontamination von 6,4 Massen-% festgestellt. Betrachtet man die Zusammensetzung des Hauptmaterials Polypropylen, so sind weiße Flakes mit 41,9 Massen-% und Bunt/Bedruckte Flakes, bestehend aus verschiedenen farbigen Folien, zumeist Etiketten, buntes Multilayermaterial und stark bedruckte Flakes, mit 22,1 Massen-% die größten Anteile. Die Kontamination besteht zu einem sehr großen Teil, nämlich 92,4 Massen-%, aus Polyethylen und zu einem sehr geringen Teil aus mit den zur Verfügung stehende Analysemethoden nicht identifizierbarem Material. Die absoluten Werte der Analyse sind in Tabelle 3.12 zu sehen.

Tabelle 3.12: Sortierergebnisse

Zusammensetzung der Sortierung		
Material	Masse in Gramm	Anteil in Prozent
<i>Polypropylen</i>		
PP Weiß	24,43	39,29
PP Transparent	7,13	11,46
PP Blau>Violett	2,45	3,94
PP Gelb>Rot	4,37	7,02
PP Grün>Türkis	2,83	4,55
PP Braun>Grau	1,74	2,80
PP Bunt/Bedruckt	12,86	20,66
PP Schwarz	2,46	3,95
<i>Kontamination</i>		
PE Bunt	3,67	5,90
Nicht Identifizierbar	0,30	0,30
Gesamtmasse	62,24	

3.2.1.2 ER Polypropylen heißgewaschene Post Consumer Flakes - Sortierergebnisse

Abbildung 3.18 zeigt die Auswertung der Sortierung der bunten hotwash Polypropylen sortierung.

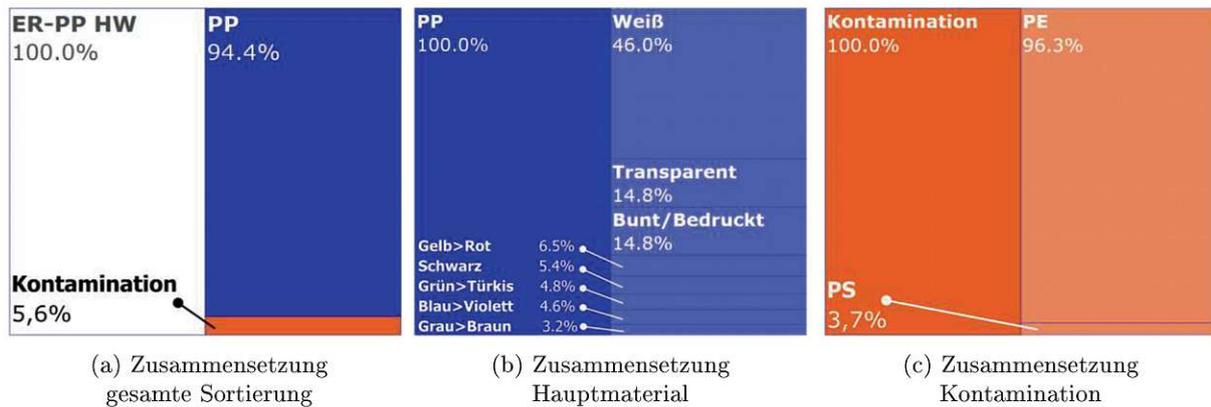


Abbildung 3.18: Flakeanalyse für ER Polypropylen heißgewaschene post consumer Flakes

Die Kontamination beläuft sich auf 5,6% Massen-%. Die Zusammensetzung des Hauptmaterials wurde in acht Kategorien unterteilt. Der mit Abstand größte Posten mit 46,0 Massen-% beläuft sich auf weiße Flakes gefolgt von transparenten Flakes, Multilayerflakes bzw. bedruckte Etiketten mit jeweils 14,8 Massen-%. Die Bestandteile der Kontamination bestehen zu 96,3 Massen-% aus Polyethylen und 3,7 Massen-% aus Polystyrol. Die absoluten Werte der Analyse sind in Tabelle 3.13 zu sehen.

Tabelle 3.13: Sortierergebnisse

Zusammensetzung der Sortierung

Material	Masse in Gramm	Anteil in Prozent
<i>Polypropylen</i>		
PP Weiß	44,4	43,44
PP Transparent	14,28	13,97
PP Blau>Violett	4,40	4,30
PP Gelb>Rot	6,25	6,11
PP Grün>Türkis	4,59	4,49
PP Braun>Grau	3,08	3,01
PP Bunt/Bedruckt	14,25	13,94
PP Schwarz	5,22	5,11
<i>Kontamination</i>		
PE	5,53	5,41
PS	0,21	0,21
Gesamtmasse	102,21	

3.2.1.3 Mechanische Prüfung

Die Boxplots der Ergebnisse sind in Abbildung 3.19 dargestellt. In Tabelle 3.15 sind statistische Kennwerte einzusehen. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass für die Unterserie OP-HW leider nicht genügend Material vorhanden war, um auch für die '0x'-Variante Proben herzustellen und zu prüfen. Die Inputmaterial-Varianten (IP), welche in Form von Flakes vorlagen, mussten zunächst einmal verarbeitet werden, weshalb die Daten erst ab der ersten Verarbeitung '1x' vorhanden sind. Letzteres gilt auch für die weiteren zwei Sortierungen 'SB' und 'St'.

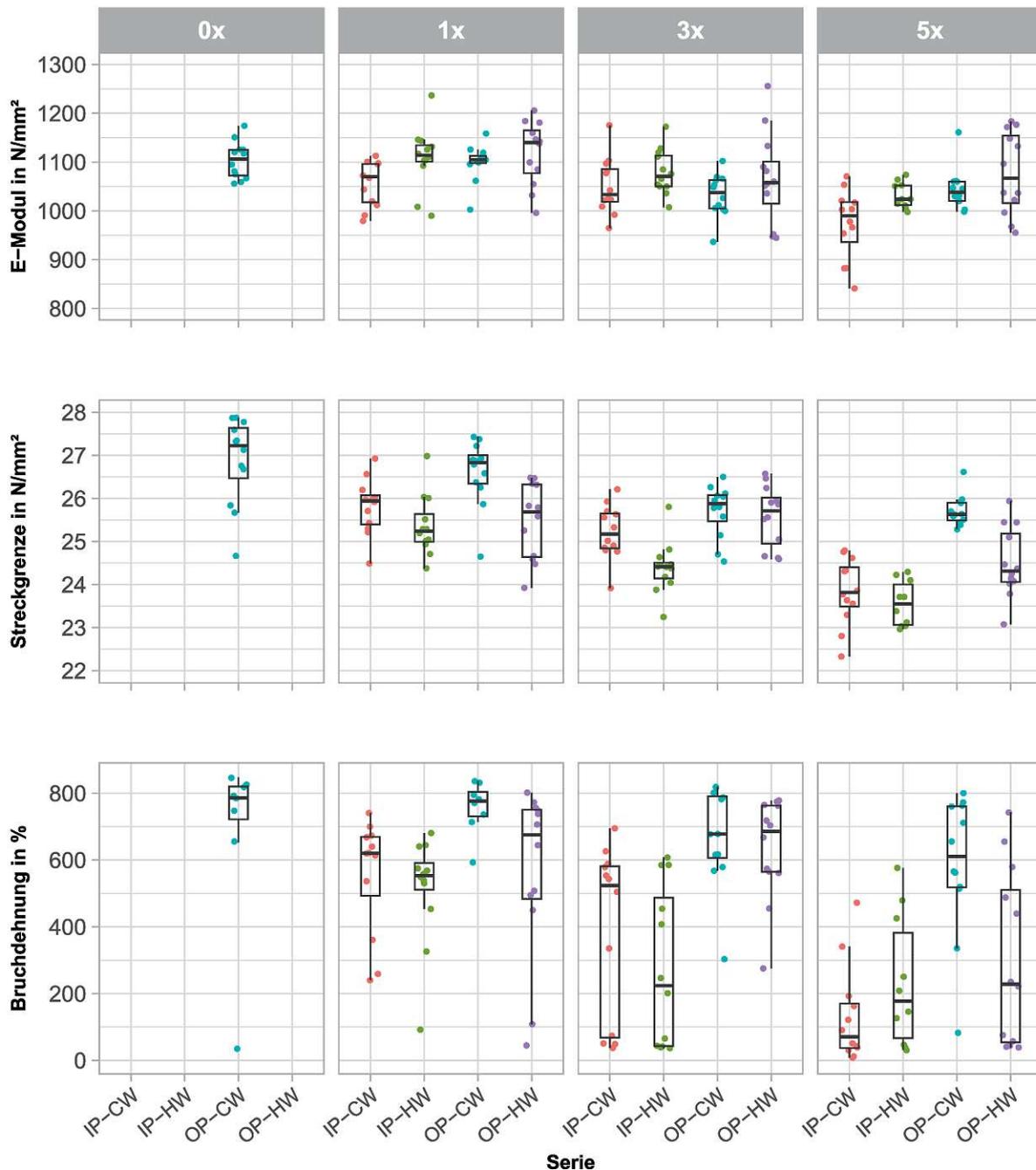


Abbildung 3.19: Boxplots der Zugprüfungsergebnisse der ER Polypropylen-sortierungen

Die **Streckspannungen** erstrecken sich über alle Konfigurationen von $23,8 \text{ N/mm}^2$ bis $26,5 \text{ N/mm}^2$, wobei die Konfiguration OP-CW sowohl die besten Werte als auch die geringsten Veränderungen per Verarbeitung verzeichnet. Die Mittelwerte sinken wie auch bei den Polypropylen Blends über die Extrusionen leicht. Der Varianzkoeffizient ist durchgehend unter 4% angesiedelt.

Die Mittelwerte des **Elastizitätsmoduls** sind generell höher als die der Polypropylen-Blends und pendeln zwischen $972,6 \text{ N/mm}^2$ und $1109,0 \text{ N/mm}^2$. Es zeichnet sich ein leichter Abwärtstrend des Elastizitätsmoduls per Verarbeitung ab.

Bei der **Bruchdehnung** erzielt auch die Konfiguration OP-CW die besten Werte. Auch die Veränderung pro Verarbeitung ist die geringste der kompletten Serie. Die Diskrepanz zwischen minimaler Bruchdehnung und Lower Hinge ist hier klar zu erkennen.

Bei den Polypropylen-Blends ist die Höchstspannung zu 100% höher als die Streckspannung. Bei den Polypropylen-Rezyklaten ist das anders. Auch hier ist die Konfiguration OP-CW dem Blend am ähnlichsten. Mit 83,3% bei der 'nullten' Verarbeitung kommt dieser Wert aber nicht an die Werte der Blends von 100% heran. Zusätzlich sinkt dieser prozentuale Anteil stetig pro Verarbeitung auf 25%. Bei den IP Konfigurationen hat nur mehr ein Teil der ersten Verarbeitung eine Höchstspannung über der Streckspannung.

Abbildung 3.20 bzw. Tabelle 3.14 veranschaulicht die statistische Auswertung der Schlagzugfähigkeitsprüfung. Über die ganze Serie bewegen sich die mittleren Schlagenergien zwischen $47,3 \text{ kJ/m}^2$ und $61,7 \text{ kJ/m}^2$. Durch die Mehrfachverarbeitung sinken die mittleren Schlagenergien. Die besten Ergebnisse erzielt die OP-CW Sortierung. Die schlechtesten Werte ergeben sich generell bei den IP Sortierungen. Die Varianzkoeffizienten sowie die Quartilsdispersionskoeffizienten bewegen sich über alle Serien hinweg in ähnlichen Bereichen zwischen 6,1% und 26,8%.

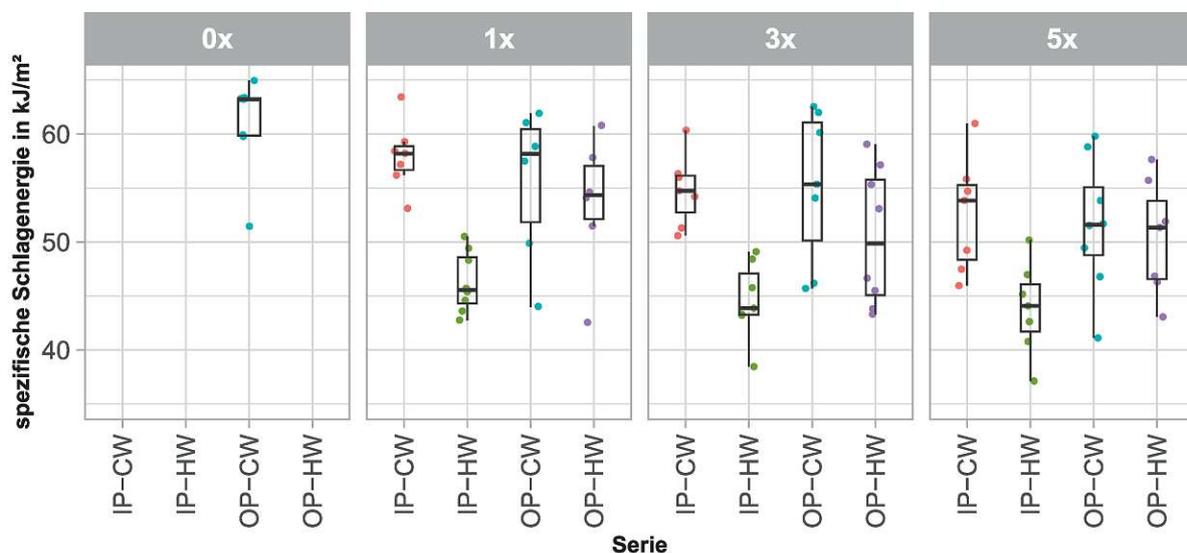


Abbildung 3.20: Boxplots der Schlagzugfähigkeitsversuchsergebnisse der ER Propylensortierungen

Tabelle 3.15: Statistische Kennzahlen für Streckspannung, E-Modul und Bruchdehnung der ER Polypropylen-sortierungen

Konfiguration	Verarbeitung	Mittelwert	Veränderung	Varianzkoeffizient	Mittelwert	Veränderung	Varianzkoeffizient	Minimale	Lower Hinge	Veränderung	Mittelwert	Varianzkoeffizient	Höchstspannung
		Streckspannung in N/mm^2											
OP - CW	0x	26,9		3,8	1103,9	0%	3,4	32,7	772,1	-1%	747,6	31,4	83,3
	1x	26,6	-1,0%	2,9	1099,0	-6%	3,4	592,8	762,3	-20%	793,0	10,4	83,3
	3x	25,7	-3,4%	2,4	1032,0	1%	4,3	303,1	606,3	-15%	670,3	22,3	41,7
	5x	25,7	-0,0%	1,4	1044,8		4,1	82,4	518,2		586,8	36,0	25,0
OP - HW	1x	25,5	0,4%	3,5	25,5	0,4%	3,5	44,6	483,8	-17%	564,4	45,5	50,0
	3x	25,6	-4,2%	2,8	25,6	-4,2%	2,8	275,3	564,5	-90%	633,3	24,3	33,3
	5x	24,5		3,3	24,5		3,3	38,8	53,9		301,4	88,1	8,33
IP - CW	1x	25,5	0,4%	3,5	25,5	0,4%	3,5	44,6	483,8	-17%	564,4	45,5	33,3
	3x	25,6	-4,2%	2,8	25,6	-4,2%	2,8	275,3	564,5	-90%	633,3	24,3	0
	5x	24,5		3,3	24,5		3,3	38,8	53,9		301,4	88,1	0
IP - HW	1x	25,4	-3,8%	2,8	1109,0	-3%	5,7	92,2	511,0	-92%	513,1	31,6	
	3x	24,4	-3,4%	2,5	1079,7	-4%	4,3	4,3	43,1	55%	276,1	86,2	0
	5x	23,8		2,2	1031,8		2,6	2,6	66,7		232,9	84,5	0

Tabelle 3.14: Statistische Auswertung der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der ER Propylensortierungen

Konfiguration Verarbeitungen	OP - CW				OP - HW			IP - CW			IP - HW		
	0x	1x	3x	5x	1x	3x	5x	1x	3x	5x	1x	3x	5x
Mittelwert Schlagenergie in kJ/m ²	61,7	60,2	56,4	51,6	60,5	50,5	48,4	59,9	57,8	55,1	46,3	43,2	47,3
Median Schlagenergie in kJ/m ²	63,2	59,9	57,7	51,6	56,2	49,9	49,1	58,3	55,4	54,3	45,6	43,6	44,6
Variationskoeffizient in %	7,9	17,4	13,2	11,8	26,8	12,6	15,6	10,3	15,7	15,7	6,1	11,9	22,4
Quartildispersionskoeff. in %	6,2	15,6	17,4	12,2	15,1	21,5	15	5,8	7	15,3	9,4	10,1	12,6

3.2.1.4 Thermische Analyse

In Abbildung 3.21 ist die thermische Analyse der ER Polypropylen Sortierung zu sehen.

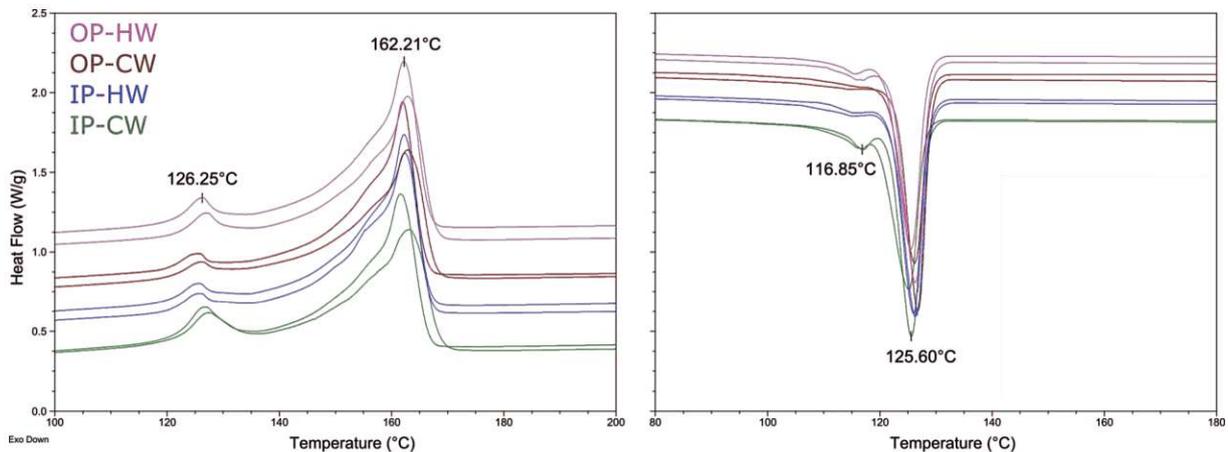


Abbildung 3.21: Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC der ER Polypropylen Sortierung

Grundsätzlich ähnelt die Messkurve der der Polypropylen Homopolymer & Polyethylen High Density. Es bilden sich zwei eindeutig trennbare Schmelzkurven aus, welche von den Temperaturen auf Polyethylen bei ca. 126 °C sowie auf Polypropylen bei grob 160 °C hinweisen. Bei der Polypropylen Schmelzkurve bildet sich im Gegensatz zur Modellserie eine überlagerte Nebenspitze aus, was auf unterschiedliche Polypropylenvarianten bzw. Additive hinweist, was bei einer Analyse des Abfallstromes nicht verwunderlich ist. Genauer gesagt bildet sich bei dieser Sortierung neben α -Polypropylenkristallen höchstwahrscheinlich auch β -Polypropylenkristalle, welche für die Bildung der Nebenspitze verantwortlich sind. β -Polypropylenkristalle können durch verschiedene Verarbeitungsparameter, wie beispielsweise Temperaturgradienten bzw. induzierte Querkräfte gebildet werden. Häufig wird die Bildung von β -Polypropylenkristallen jedoch durch die Zugabe von Nukleierungsagenten in Form von Additiven erreicht, welche die Bildung des thermodynamisch instabilen Kristalls begünstigen. β -Polypropylenkristalle sind für bestimmte Anwendungen erwünscht, da sie Eigenschaften wie die Ermüdungsrisssbildung, den Reibungskoeffizienten und die Schlagzähigkeit verbessern können. [50] Zusätzlich erkennt man, dass auch bei der Erstarrung zwei Peaks ausgebildet sind. Dieser Umstand ist bei keinem der Modellblends aufgetreten. Für alle Kontaminationspeaks wurden die Schmelzenthalpien berechnet und mit den passenden Regressionsgeraden aus der Modellreihe verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.16 zu sehen.

Bei kaltgewaschenen post consumer Flakes (IP-CW) erhalten wir eine errechnete Kontamination von 4,35% bis 5,87%. Die Sortierergebnisse belaufen sich auf eine Kontamination von insgesamt 6,2%, wobei 5,9% davon auf Polyethylen zurückzuführen sind (siehe Tabelle 3.12). Es ist hier also eine kleine Diskrepanz zu erkennen. Beim dazugehörigen Granulat (OP-CW) beläuft sich die berechnete Kontamination auf 1,58% bis 1,98%.

Bei den heißgewaschenen post consumer Flakes beläuft sich der errechnete Wert auf eine Kontamination von 2,2% bis 2,7%. Die Sortierergebnisse haben hingegen einen Wert von 5,62% Kontamination ergeben, wovon 5,41% Polyethylen zuzuschreiben sind. Das bereitgestellte Granulat (OP-HW) besitzt eine errechnete Kontamination von 2,6% bis 3,47%.

Tabelle 3.16: Schmelzenthalpien & Berechnung der Kontamination mittels der eruierten Regressionsgeraden

Konfiguration (Kontamination m-%)	Schmelzenthalpie in J/g		Errechnete Kontamination in %					
	Probe 1	Probe 2	<u>PP-RCP+PEHD</u>		<u>PP-RCP+PELLD</u>		<u>PP2+PEHD</u>	
			Probe 1	Probe 2	Probe 1	Probe 1	Probe 1	Probe 2
IP-CW	7,921	7,14	4,99	4,50	4,83	4,35	5,87	5,29
IP-HW	3,605	3,65	2,27	2,30	2,20	2,22	2,67	2,70
OP-CW(6,4%)	2,669	2,598	1,68	1,64	1,63	1,58	1,98	1,92
OP-HW(5,6%)	4,687	4,272	2,95	2,69	2,86	2,60	3,47	3,16

3.2.2 SB Polyethylen High Density Sortierung

3.2.2.1 SB Polyethylen kaltgewaschene post consumer Flakes - Sortierergergebnisse

In Abbildung 3.22 ist das Sortierergergebnis der kaltgewaschenen Polyethylen Sortierung zu sehen.

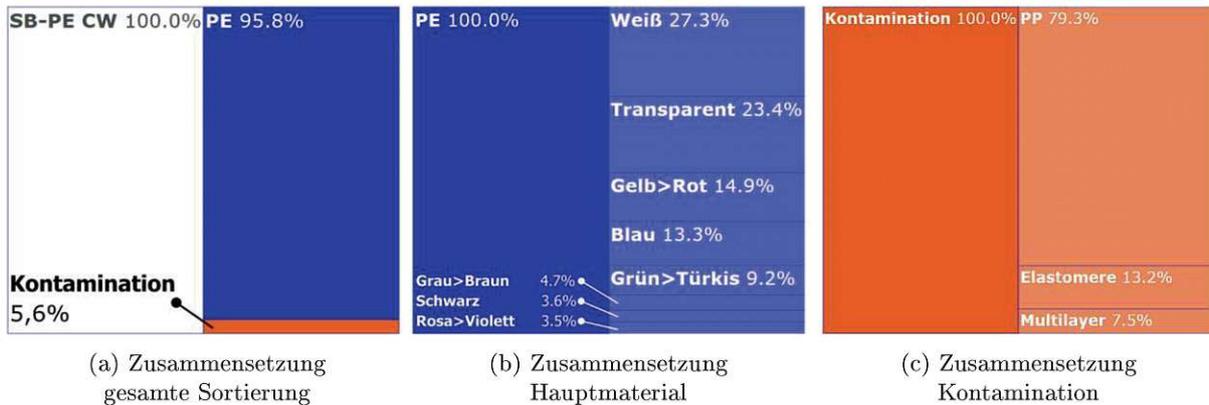


Abbildung 3.22: Flakeanalyse für SB Polyethylen kaltgewaschene post consumer Flakes - Sortierergergebnisse

Die Kontamination der Sortierung beträgt 4,2 Massen-%. Mit 27,3 Massen-% und 23,4 Massen-% stellen hier die weißen bzw. transparenten Flakes den größten Anteil des Hauptmaterials dar. Die Kontamination besteht aus 79,3 Massen-% Polypropylen. Hier zu erwähnen ist der Elastomeranteil in der Sortierung. Da dieser nicht schmelzbar ist, ist auch die Weiterverarbeitung kritisch. Die Elastomerpartikel verbinden sich nicht mit dem restlichen verarbeiteten Material und stellen als Makrofremdkörper extreme Schwachstellen im Material dar. Die absoluten Werte der Analyse sind in Tabelle 3.17 zu sehen.

Tabelle 3.17: Sortierergergebnisse

Zusammensetzung der Sortierung		
Material	Masse in Gramm	Prozentualer Anteil
<i>Polypropylen</i>		
PE Weiß	30,44	26,21
PE Transparent	26,07	22,45
PE Grün>Türkis	10,18	8,77
PE Gelb>Rot	16,61	14,30
PE Blau	14,84	12,78
PE Rosa>Violett	3,92	3,38
PE Schwarz	3,95	3,40
PE Grau/Braun/Bedruckt	5,19	4,47
<i>Kontamination</i>		
Multilayer	0,37	0,32
Elastomere	0,65	0,56
PP	3,90	3,36
Gesamtmasse	116,12	

3.2.2.2 SB Polyethylen heißgewaschene post consumer Flakes - Sortierergergebnisse

Abbildung 3.23 zeigt die Zusammensetzung der bunten hotwash Polyethylen Sortierung.

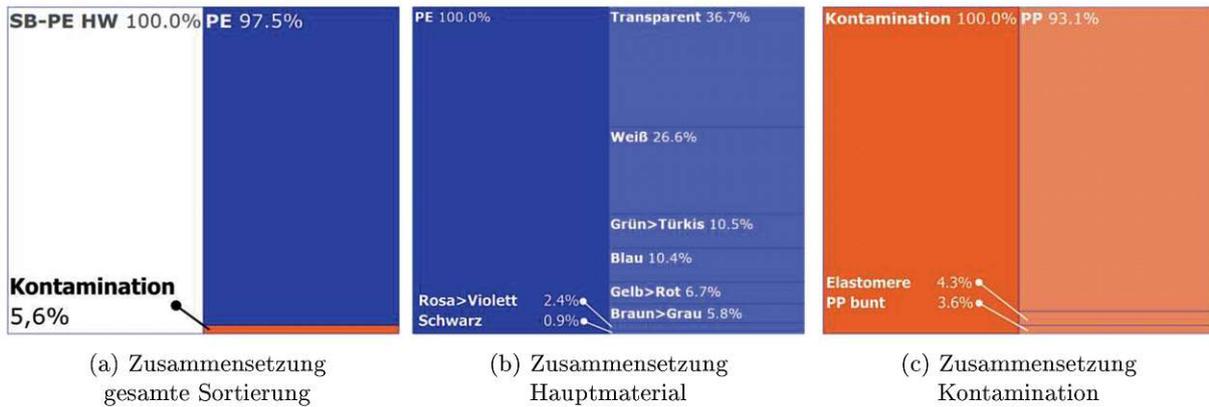


Abbildung 3.23: Flakeanalyse für SB Polyethylen heißgewaschene post consumer Flakes

Der Kontaminationsgrad dieser Sortierung beträgt 2,4 Massen-%. Die transparenten und weißen Flakes machen auch hier den größten Teil des Hauptmaterials dieser Serie mit 36,7 Massen-% bzw. 26,6 Massen-% aus. Die Kontamination besteht zu 93,1% aus Polypropylen, wobei auch in dieser Sortierung Elastomere angefallen sind. Die absoluten Werte der Analyse sind in Tabelle 3.18 zu sehen.

Tabelle 3.18: Sortierergergebnisse

Zusammensetzung der Sortierung		
Material	Masse in Gramm	Prozentualer Anteil
<i>Polypropylen</i>		
PE Weiß	28,26	25,92
PE Transparent	39,03	35,8
PE Grün>Türkis	11,11	10,19
PE Gelb>Rot	7,12	6,53
PE Blau	11,03	10,12
PE Rosa>Violett	2,54	2,33
PE Schwarz	0,95	0,87
PE Grau/Braun/Bedruckt	6,21	5,70
<i>Kontamination</i>		
Multilayer	0,07	0,06
Elastomere	0,12	0,11
PP	2,58	2,37
Gesamtmasse	109,02	

3.2.2.3 Mechanische Prüfung

Abbildung 3.24 beschreibt mittels Boxplots die Ergebnisse der Zugprüfung.

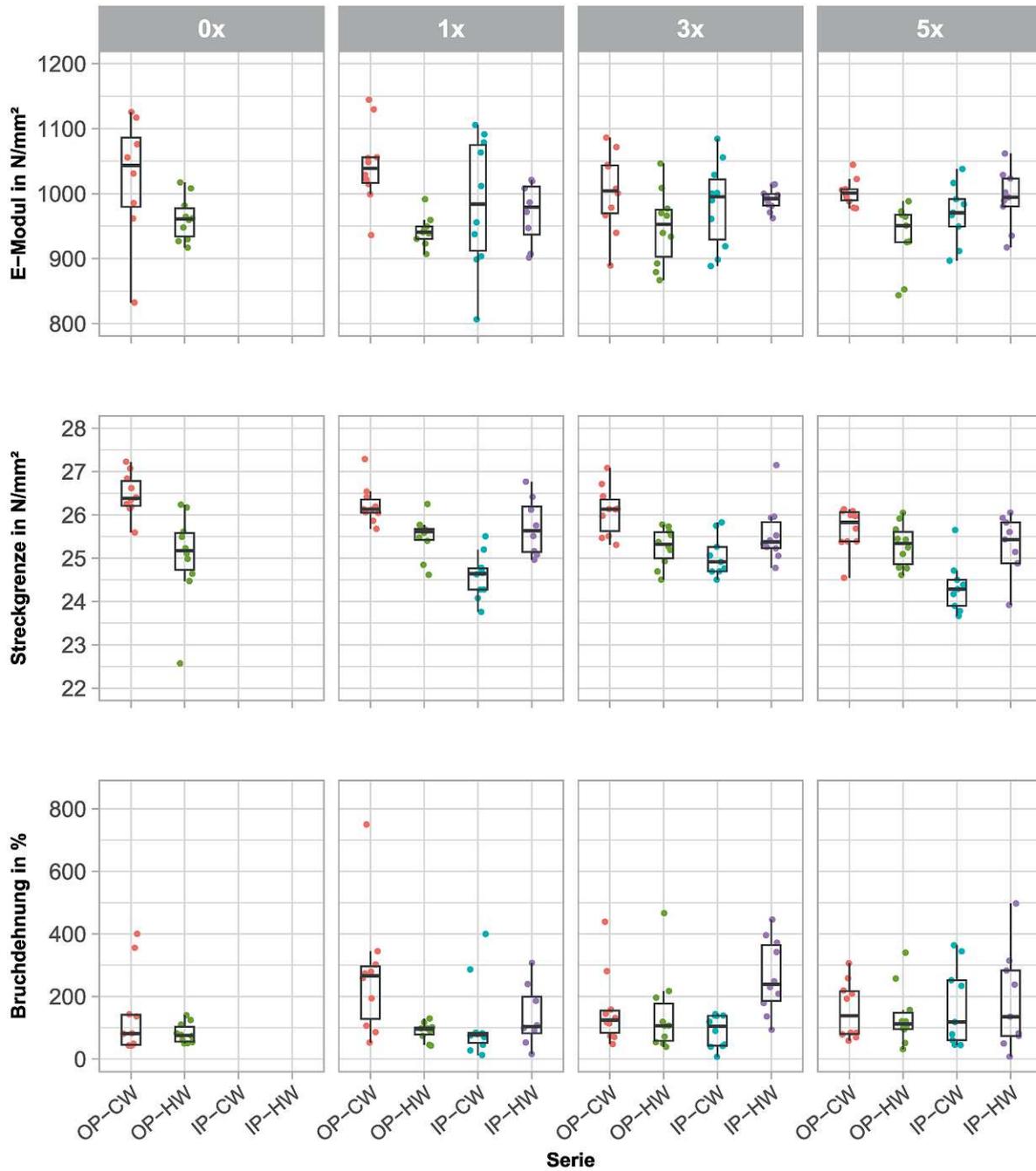


Abbildung 3.24: Boxplots der Zugprüfungsergebnisse der SB Polyethylensortierung

Zusätzlich ist in Tabelle 3.20 die eine statistische Auswertung angeführt. Die höchste mittlere **Streckspannung** zeichnet sich bei der Konfiguration OP-CW ab. Generell bewegen sich die mittleren Streckspannungen über die gesamte Serie zwischen $24,3 \text{ N/mm}^2$ und $26,5 \text{ N/mm}^2$. Der Varianzkoeffizient bewegt sich in ähnlichen Bereichen wie beim Polyethylen Blend, wobei die Spitzenwerte über 4% erreichen.

Die mittleren Elastizitätsmodule bewegen sich zwischen $914,4 \text{ N/mm}^2$ und $1043,5 \text{ N/mm}^2$, wobei beide Extrema in der Konfiguration OP-CW zu beobachten sind. Bemerkenswert ist der Varianzkoeffizient der einmal verarbeiteten OP-CW Sortierung mit 28,5%.

Die Bruchdehnung ist generell sehr gering. Der höchste Lower Hinge siedelt sich bei 186,2% bei der Konfiguration IP-HW an. Der geringste Lower Hinge liegt bei 45,1 %. Die Varianzkoeffizienten sind wie beim Polyethylen Blend hoch und bewegen sich zwischen 31,4% und 107,3%.

Schlagzugversuchsergebnisse ER Polyethylensortierung

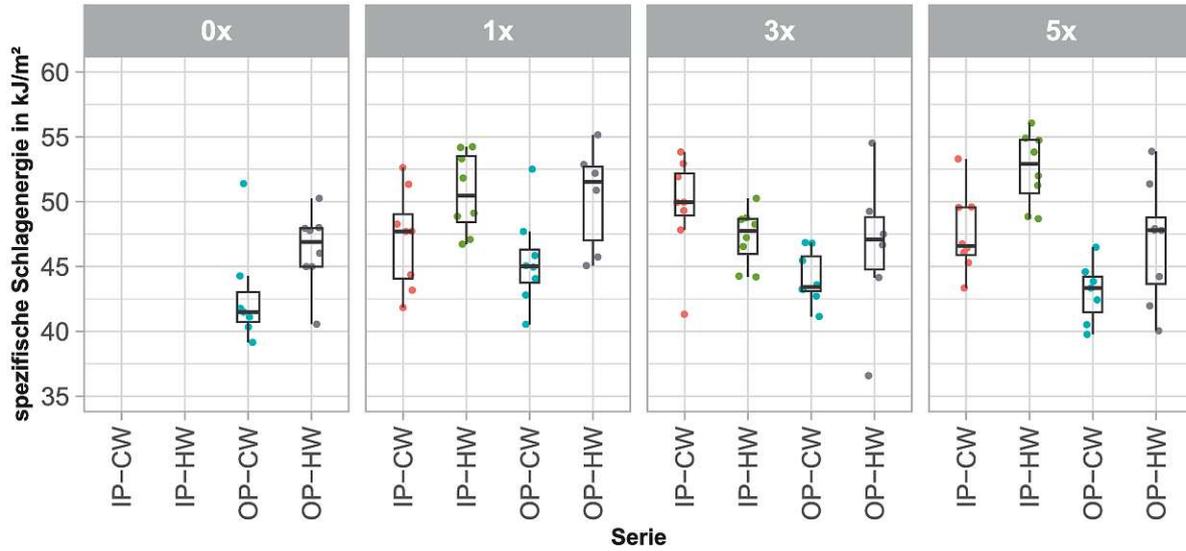


Abbildung 3.25: Boxplots der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der SB Polyethylensortierung

In Abbildung 3.25 bzw. Tabelle 3.19 sind die Ergebnisauswertung der Schlagzugzähigkeitsprüfung abgebildet. Bei den mittleren Schlagenergien zeichnet sich kein Abwärts- oder Aufwärtstrend über die Mehrfachverarbeitungen ab. Alle Sortierungen haben ähnliche Schlagenergien, nur die Sortierung OP-CW sticht durch durchwegs über alle Verarbeitungen mit etwas niedrigeren Werten hervor. Dafür ist die Streuung der Probenwerte bei besagter Sortierung am niedrigsten und übersteigt den Wert von 8,7% nicht.

Tabelle 3.19: Statistische Auswertung der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der SB Polyethylensortierung

Konfiguration Verarbeitungen	OP - CW				OP - HW			IP - CW		IP - HW				
	0x	1x	3x	5x	0x	1x	3x	5x	1x	3x	5x	1x	3x	5x
Mittelwert Schlagenergie in kJ/m^2	40,5	45,4	44,1	41,3	46,3	52,4	42,8	46,9	47,1	49,6	47,5	50,7	47,3	52,5
Median Schlagenergie in kJ/m^2	41,3	45	43,4	42,9	46,9	51,5	45,4	47,8	47,7	50	46,6	50,5	47,7	52,9
Varianzkoeffizient in %	18,8	7,8	4,6	13	6,3	28,4	19,5	9,9	8,1	7,9	6,6	6,1	4,6	5,3
Quartildispersionskoeff. in %	5,7	5,7	6,2	8,7	6,3	15,3	27,5	10,7	10,4	6,5	7,9	10,1	5,7	7,8

Tabelle 3.20: Statistische Kennzahlen für Streckspannung, E-Modul und Bruchdehnung der SB Polyethylensortierung

Konfiguration	Verarbeitung	Mittelwert	Veränderung	Varianzkoeffizient	Mittelwert	Veränderung	Varianzkoeffizient	Minimale	Lower Hinge	Veränderung	Mittelwert	Varianzkoeffizient	Höchstspannung	Streckspannung in %
		Streckspannung in N/mm^2	Streckspannung	Streckspannung in %	E-Modul in N/mm^2	E-Modul	E-Modul in %	Bruchdehnung in %	Bruchdehnung in %	Lower Hinge	Bruchdehnung in %	Bruchdehnung in %	Streckspannung in %	
OP - CW	0x	26,5	0,9%	1,8	914,4	14%	28,5	42,5	45,1	184%	137,7	96,0	0	
	1x	26,2	-0,6%	1,7	1043,5	-4%	5,8	52,7	128,4	-35%	264,8	74,5	0	
	3x	26,1	-1,6%	2,2	1002,6	0%	6,1	47,7	83,8	-5%	157,8	74,8	0	
	5x	25,6		2,0	1002,0		2,0	58,8	80,1		156,1	58,3	0	
OP - HW	0x	26,5	0,9%	1,8	914,4	14%	28,5	42,5	45,1	184%	137,7	96,0	0	
	1x	26,2	-0,6%	1,7	1043,5	-4%	5,8	52,7	128,4	-35%	264,8	74,5	0	
	3x	26,1	-1,6%	2,2	1002,6	0%	6,1	47,7	83,8	-5%	157,8	74,8	0	
	5x	25,6		2,0	1002,0		2,0	58,8	80,1		156,1	58,3	0	
IP - CW	1x	24,6	0,6%	2,1	985,3	0%	10,2	12,7	51,8	-17%	116,4	107,3	0	
	3x	24,7	-1,6%	4,5	982,7	-1,0%	6,7	7,1	42,9	40%	90,3	57,7	0	
	5x	24,3		2,5	969,4		4,7	44,5	60,3		171,3	75,2	0	
IP - HW	1x	25,7	-0,6%	2,6	970,4	2%	4,9	15,8	82,2	126%	137,6	71,6	0	
	3x	25,6	-1%	2,6	990,8	0%	1,7	93,7	186,2	-60%	265,1	44,5	0	
	5x	25,3		2,7	992,5		4,5	7,6	74,2		186,9	85,0	0	

3.2.2.4 Thermische Analyse

Die Ergebnisse der Differenzkalimetrie sind in Abbildung 3.26 zu sehen.

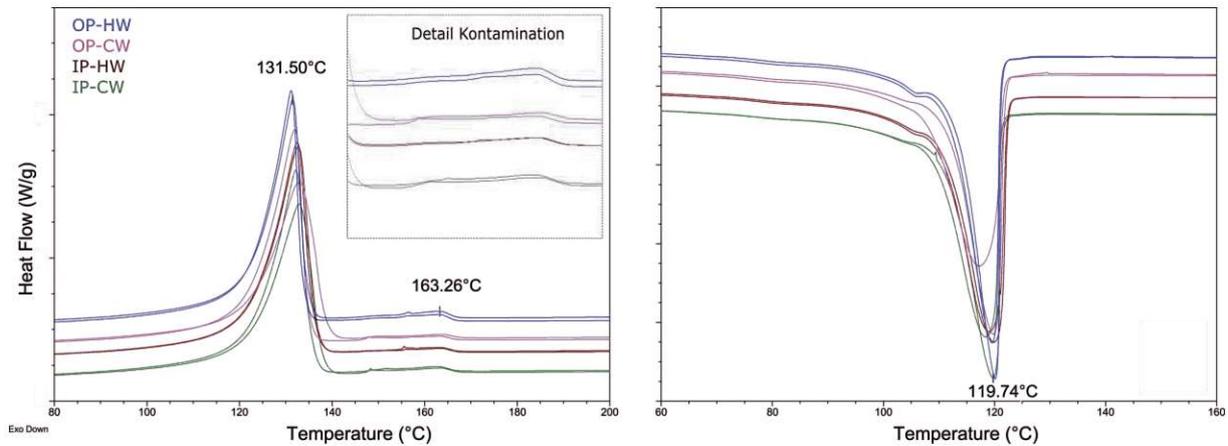


Abbildung 3.26: Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC der ER Polyethylen Sortierung

Optisch fällt bei der Schmelzkurve auf, dass der Kontaminationspeak sich nicht spitz wie der des Hauptmaterials ausbildet, sondern eher langgezogen mit geringer Steigung ohne eindeutige Spitze. Zur besseren Darstellung sind die Kontaminationsschmelzkurven nochmals als Detail abgebildet. Dieser Umstand gilt für alle gemessenen Konfigurationen. Beim Erstarren bilden sich ebenfalls zwei getrennte Erstarrungssensken und keine gemeinsame wie bei den Modellblends beobachtet.

In Tabelle 3.21 sind die Schmelzenthalpien der Kontaminationserhebungen zu sehen und die errechneten Kontaminationen laut den gebildeten Regressionsgeraden der Modellblends. Dass das Modell 'PP-RCP' keine plausiblen Werte ergibt, wie schon oben beim Modellblend erwähnt, kann hier beobachtet werden, da sich rechnerisch bis zu 97% Kontamination ergeben und das natürlich unrealistisch ist. Umso erfreulicher ist, dass das Modell basierend auf den zwei Homopolymeren realistische Werte liefert. Bei der kaltgewaschenen Sortierung (IP-CW) beläuft sich die errechnete Kontamination auf 4,08 bzw. 3,88%. Das dazugehörige Sortierergebnis beläuft sich auf 4,2%. Das bereitgestellte Regranulat hat etwa diesselbe errechnete Kontamination wie die untersuchten Flakes mit 2,82% bzw. 3,88%.

Bei den heißgewaschenen Flakes (IP-HW) ergibt die Berechnung des Modells 2,93% bzw. 2,82%. Das Sortierergebnis hat eine errechnete Kontamination von 2,5% ergeben. Hier hat das zugehörige Regranulat eine höhere errechnete Kontamination als die Flakes mit 4,91% bzw. 5,11%, was eher überraschend ist. An dieser Stelle ist erwähnenswert, dass das bereitgestellte Granulat einen unterschiedlichen Farbton im Gegensatz zu den selbst verarbeiteten Flakes hat. Was eventuell darauf hinweist, dass die Flakes und das Granulat nicht aus der gleichen Charge stammen und deshalb die Diskrepanz der Kontamination entsteht.

Tabelle 3.21: Schmelzenthalpien & Berechnung der Kontamination mittels der eruierten Regressionsgeraden

Konfiguration (Kontamination m-%)	Schmelzenthalpie in J/g		Errechnete Kontamination in %			
			<u>PEHD+PP-RCP</u>		<u>PEHD+PP2</u>	
	Probe 1	Probe 2	Probe 1	Probe 2	Probe 1	Probe 1
IP-CW	5,51	5,24	(77,66)	(73,82)	4,08	3,88
IP-HW	3,96	3,81	(55,75)	(53,70)	2,93	2,82
OP-CW (4,2%)	3,81	5,24	(53,69)	(73,77)	2,82	3,88
OP-HW (2,4%)	6,63	6,90	(93,31)	(97,13)	4,91	5,11

Werte in Klammern sind unplausibel

3.2.3 St Polypropylen Sortierung bunt und weiß

3.2.3.1 St Polypropylen kaltegewaschene bunte post consumer Flakes - Sortierergergebnisse

Abbildung 3.27 zeigt das Ergebnis der Handsortierung der bunten coldwash Polypropylen Sortierung des Lieferanten St.

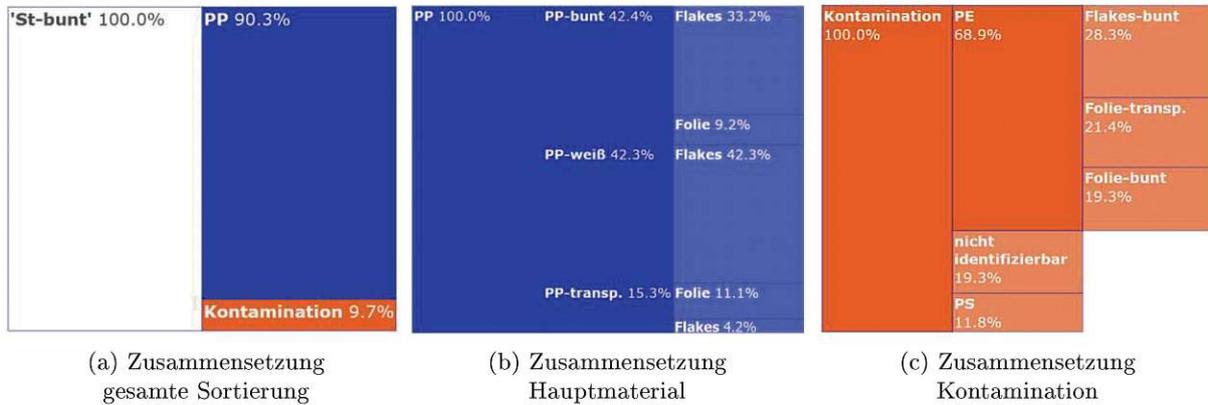


Abbildung 3.27: Flakeanalyse für St Polypropylen kaltegewaschene bunte post consumer Flakes

Diese zeichnet sich im Gegensatz zu allen anderen Sortierungen durch einen sehr hohen Folienanteil aus. Deshalb wird hier bei den Farben nur nach weiß, transparent und bunt aufgeschlüsselt, dafür wird aber der Folienanteil bei den unterschiedlichen Farben angegeben. Es werden aufgrund des hohen Folienanteils auch weniger als 100 g sortiert, da der Zeitanspruch durch die sehr leichten Partikel immens steigt. Die Kontamination dieser Sortierung beträgt 9,7% und ist somit die höchste unter den analysierten Serien. Den größten Teil des Hauptmaterials machen hier weiße Flakes mit über 42% aus. Die Kontamination besteht aus fast 70% Polyethylen. Die absoluten Werte der Analyse sind in Tabelle 3.22 zu sehen.

Tabelle 3.22: Sortierergergebnisse

Zusammensetzung der Sortierung		
Material	Masse in Gramm	Prozentualer Anteil
<i>Polypropylen</i>		
PP Weiß Flakes	22,30	38,20
PP Transparent Flakes	2,20	3,77
PP Transparent Folie	5,84	10,01
PP Bunt Flakes	17,52	30,02
PP Bunt Folie	4,85	8,31
<i>Kontamination</i>		
PE Bunt Flakes	1,60	2,74
PE Bunt Folie	1,09	1,87
PE transparent Folie	1,21	2,07
nicht identifizierbar	1,09	1,87
PS	0,67	1,15
Gesamtmasse	58,37	

3.2.3.2 Mechanische Prüfung - St Bunt

Die Ergebnisse der Zugprüfung sind in Abbildung 3.28 zu sehen. Tabelle 3.23 listet die Ergebnisse tabellarisch.

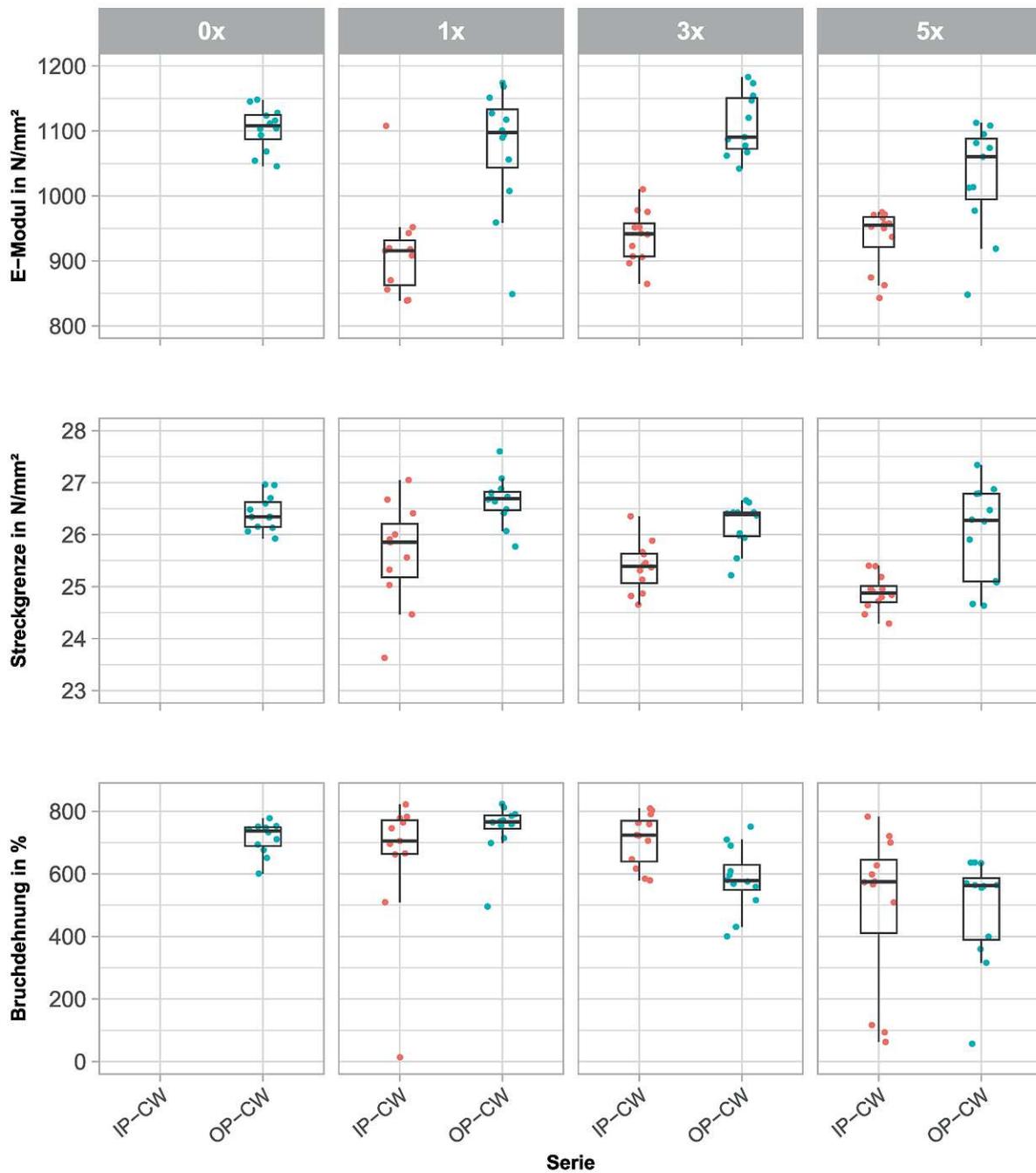


Abbildung 3.28: Boxplots der Zugprüfungsergebnisse der bunten St Polypropylen Sortierung

Auch hier ist die mittlere Streckspannung bei der Konfiguration OP-CW höher als die der IP-CW Konfiguration. Für die IP Sortierung sinkt die mittlere Streckspannung über die Verarbeitungen, während sie für die OP Sortierung fast gleich bleibt.

Das **Elastizitätsmodul** für die OP Konfiguration ist durchgehend über alle Verarbeitungsstufen über

1000 N/mm^2 und bleibt fast konstant über die Verarbeitungen. Nur bei der fünften Verarbeitung ist ein Sinken des Elastizitätsmoduls zu erkennen. Die IP Konfiguration hingegen bewegt sich im Bereich von 915 N/mm^2 und 937 N/mm^2 und hat sogar eine leicht steigenden Tendenz über die Verarbeitungen.

Auffällig ist, dass die Diskrepanz zwischen Lower Hinge und Minimalbruchdehnung bei der OP Konfiguration geringer ist als bei der IP Konfiguration. Generell bewegen sich die Werte des Lower Hinges der Bruchdehnung zwischen 389% und 689%. Der Varianzkoeffizient steigt für beide Sortierungen pro Verarbeitung an.

Der Anteil der Proben, bei denen die Höchstspannung höher als die Streckspannung ist, ist bei beiden Konfigurationen bei der nullten bzw. ersten Konfiguration am höchsten und nimmt mit zunehmenden Verarbeitungen ab.

Schlagzugversuchsergebnisse St Bunt Polypropylensortierung

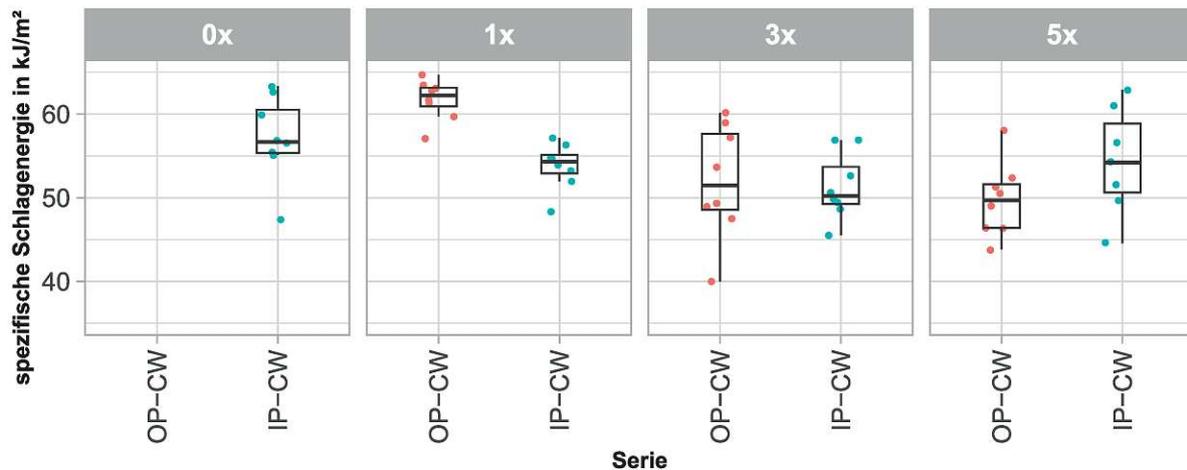


Abbildung 3.29: Boxplots der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der bunten St Polypropylen Sortierung

In Abbildung 3.29 bzw. Tabelle 3.24 sind die Ergebnisse der Schlagzugzähigkeitsprüfung zu sehen. Die Mittelwerte der Schlagenergie bewegen sich zwischen 52 kJ/m^2 und 61,6 kJ/m^2 . Hervorzuheben ist, dass die Sortierung OP-CW einen Varianzkoeffizient von unter 5% vorzuweisen hat und somit laut Norm nur fünf Proben einer Prüfungen unterzogen werden müssen.

Tabelle 3.23: Statistische Kennzahlen für Streckspannung, E-Modul und Bruchdehnung der bunten St Polypropylen Sortierung

Konfiguration	Verarbeitung	Streckspannung			E-Modul			Bruchdehnung			Höchstspannung		
		Mittelwert in N/mm ²	Veränderung in %	Varianzkoeffizient in %	Mittelwert in N/mm ²	Veränderung in %	Varianzkoeffizient in %	Minimale in %	Lower Hinge in %	Veränderung in %	Mittelwert in %	Varianzkoeffizient in %	Höchstspannung in %
OP - CW	0x	26,4	0,9%	1,3	1103,5	-3%	3,0	600,1	689,1	8%	715,1	7,2	66,67
	1x	26,7	-1,8%	1,7	1074,5	4%	8,8	495,5	744,2	-26%	744,6	11,6	75,0
	3x	26,2	-0,6%	1,7	1117,2	-7%	4,8	400,4	548,4	-29%	582,1	17,8	8,3
	5x	26,0		3,6	1042,9		9,3	56,9	389,2		30312	35,7	0,0
IP - CW	1x	25,6	-1,0%	3,9	915,4	2%	8,2	23,6	663,5	-4%	649,4	35,0	72,7
	3x	25,4	-2,0%	1,9	937,3	0%	4,3	579,5	639,2	-36%	708,8	11,7	66,7
	5x	24,9		1,4	934,9		5,0	62,4	410,7		493,7	51,6	25,0

Tabelle 3.24: Statistische Auswertung der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der bunten St Polypropylen Sortierung

Konfiguration Verarbeitungen	OP - CW				IP - CW		
	1x	3x	5x	0x	1x	3x	5x
Mittelwert Schlagenergie in kJ/m ²	57,1	53,8	51,3	55,8	61,7	52,0	49,7
Median Schlagenergie in kJ/m ²	56,7	54,3	50,2	55,4	62,2	51,5	49,7
Varianzkoeffizient in %	8,9	5,1	7,8	12,9	3,9	13,1	8,9
Quartildispersionskoeff. in %	9,1	4,1	8,9	18,8	3,6	17,6	10,5

3.2.3.3 Thermische Analyse - St Bunt

in Abbildung 3.27 ist die thermische Analyse der bunten St Sortierung zu sehen.

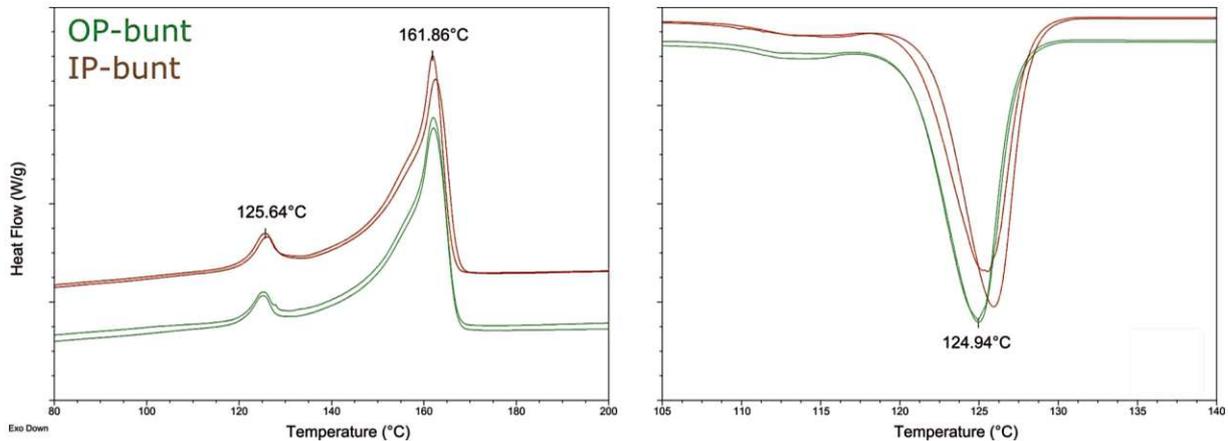


Abbildung 3.30: Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC der bunten St Polypropylen Sortierung

Wieder ist die optische Similarität zum Modell der Miniserie mit zwei Homopolymeren groß. Die Schmelzkurve des Hauptmaterials bildet augenscheinlich einen minimalen Nebenpeak aus, der auch bei der ER-PP Sortierung ersichtlich ist, und sich mit dem Hauptpeak fast vollständig überlagert. Die Abkühlkurve zeichnet sich auch hier durch zwei Senken aus.

In Tabelle 3.25 sind die gemessenen Werte der Schmelzpeaks sowie die Modellrechnungen zur Kontamination zu sehen. Die Modelle ergeben plausible Werte von 2,63% bis 3,44%, welche aber im Gegensatz zur Handsortierung mit einer Kontamination von 9,7% sehr gering ausfallen. Hier muss man aber erwähnen, dass die Handsortierung durch den hohen Folienanteil eventuell verfälscht ist. Da die Messbarkeit mit dem Handspektrometer oft nicht gegeben ist, da die Größe der Folienstücke zu klein ist. Somit sind Flakes und größere Folienstücke gezwungenermaßen bevorzugt worden, was die Handsortierungsergebnisse verzerren könnten. Das lieferantenseitig hergestellte Granulat hat mit einer Kontamination von 2,53% bzw. 2,77% eine noch geringere errechnete Kontamination als die Flakes.

Tabelle 3.25: Schmelzenthalpien & Berechnung der Kontamination mittels der eruierten Regressionsgeraden

Konfiguration (Kontamination m-%)	Schmelzenthalpie in J/g		Errechnete Kontamination in %					
			<i>PP-RCP+PEHD</i>		<i>PP-RCP+PELLD</i>		<i>PP2+PEHD</i>	
	Probe 1	Probe 2	Probe 1	Probe 2	Probe 1	Probe 1	Probe 1	Probe 2
IP-bunt	4,17	4,65	2,63	2,93	2,54	2,83	3,09	3,44
OP-bunt (9,6%)	3,41	3,74	2,15	2,35	2,08	2,28	2,53	2,77

3.2.3.4 St Polypropylen heißgewaschene weiße post consumer Flakes - Sortierergebnisse

In Abbildung 3.31 ist das Sunburst Diagramm zur weißen hotwash Polypropylen Sortierung des Lieferanten St zu sehen.

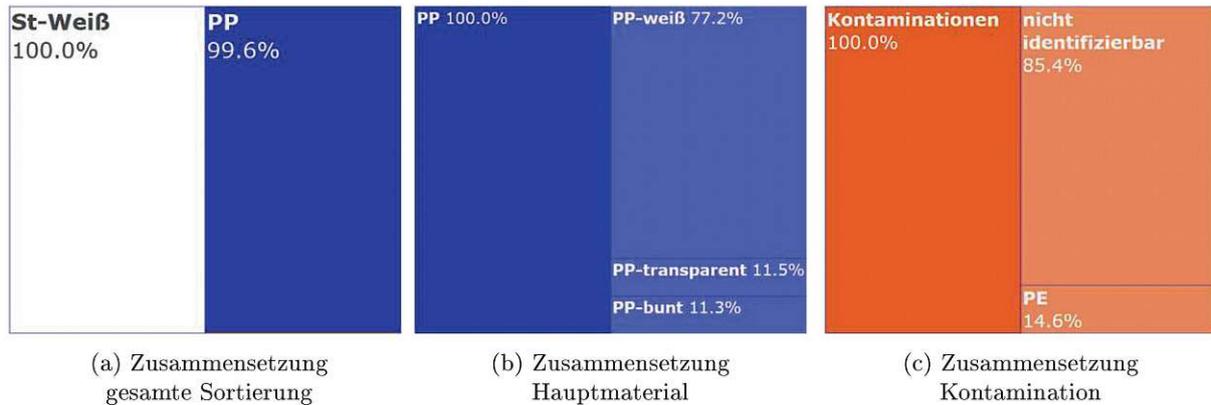


Abbildung 3.31: Flakeanalyse für St Polypropylen heißgewaschene weiße post consumer Flakes

Mit einer Kontamination von 0,4% ist diese Sortierung die sortenreinste Serie aller untersuchten Materialien. Das Hauptmaterial ist mit 88,7% weißen bzw. transparenten Flakes auch in Hinblick auf die Farben gut sortiert. Wobei selbst der Anteil von ca. 11% farbigen Flakes zu einem Grauton des Materials nach der Verarbeitung tendiert. Die Kontamination besteht zu einem hohen Anteil von 85% aus nicht identifizierbaren Partikeln, wobei diese Flakes nur 0,33%, bezogen auf das gesamte Material, ausmachen. Die restliche Kontamination sind PE-Partikel. Die absoluten Werte der Analyse sind in Tabelle 3.26 zu sehen.

Tabelle 3.26: Sortierergebnisse

Zusammensetzung der Sortierung		
Material	Masse in Gramm	Prozentualer Anteil
<i>Polypropylen</i>		
PP Weiß	94,03	76,90
PP Transparent	14,03	11,47
PP Bunt	13,74	11,24
<i>Kontamination</i>		
PE	0,07	0,06
nicht identifizierbar	0,41	0,22
Gesamtmasse	122,28	

3.2.3.5 Mechanische Prüfung - St Weiss

In Abbildung 3.32 bzw. Tabelle 3.27 sind die Ergebnisse der Zugprüfung ersichtlich.

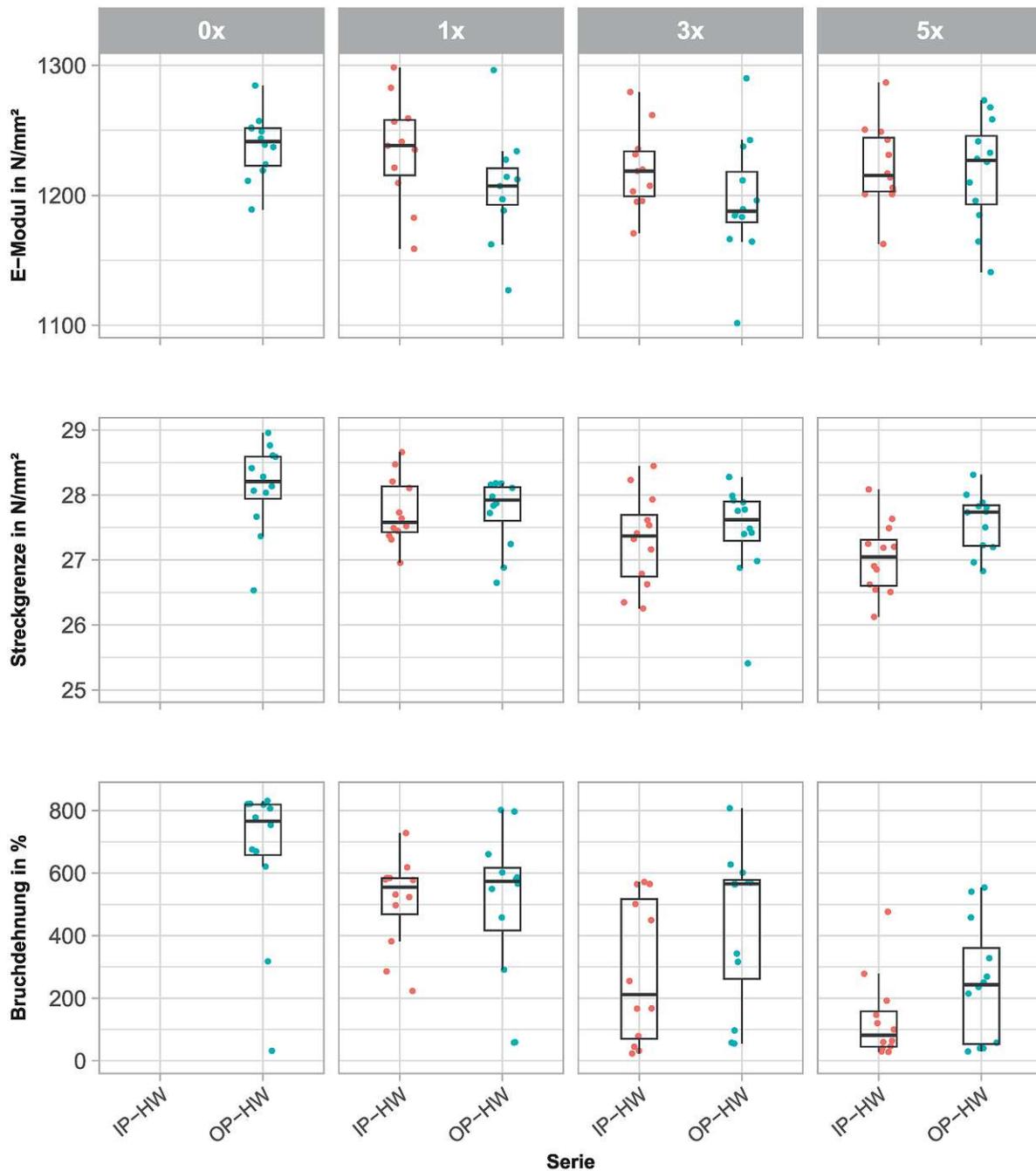


Abbildung 3.32: Boxplots der Zugprüfungsergebnisse der weißen St Polypropylen Sortierung

Diese Serie hebt sich von den anderen Serien ab. Nicht nur die **Streckspannung** ist über alle Verarbeitungen und Konfigurationen sehr hoch sondern auch der Mittelwert der Elastizitätsmodule. Die Streckspannungen erzielen Werte zwischen $27,0 \text{ N/mm}^2$ und $28,1 \text{ N/mm}^2$. Die mittleren **Elastizitätsmodule** erzielen Werte bis 1238 N/mm^2 . Auch die Varianzkoeffizienten für die Streckspannungen und Elastizitätsmodule sind durchwegs die geringsten aller Serien. Die **Bruchdehnungen** zeigen typisch für

die Rezyklatserien hohe Diskrepanzen zwischen minimaler Bruchdehnung und dem Lower Hinge. Generell bewegt sich der Lower Hinge zwischen 44,9% und 657,4%. Die Varianzkoeffizienten hingegen sind untypisch für die getesteten Polypropylenserien und fallen mit Werten von 37% bis 100% auf und erinnern eher an Werte der Polyethylensortierungen

In der Konfiguration OP-HW ist bei der nullten und ersten Verarbeitung noch ein gewisser Anteil an Proben zu verzeichnen, welche eine höhere Höchst- als Streckspannung besitzen. Ab der dritten Verarbeitung bzw. bei der Konfiguration IP-HW entspricht die Höchstspannung immer der Streckspannung.

Schlagzugversuchsergebnisse St Weiss Polypropylensortierung

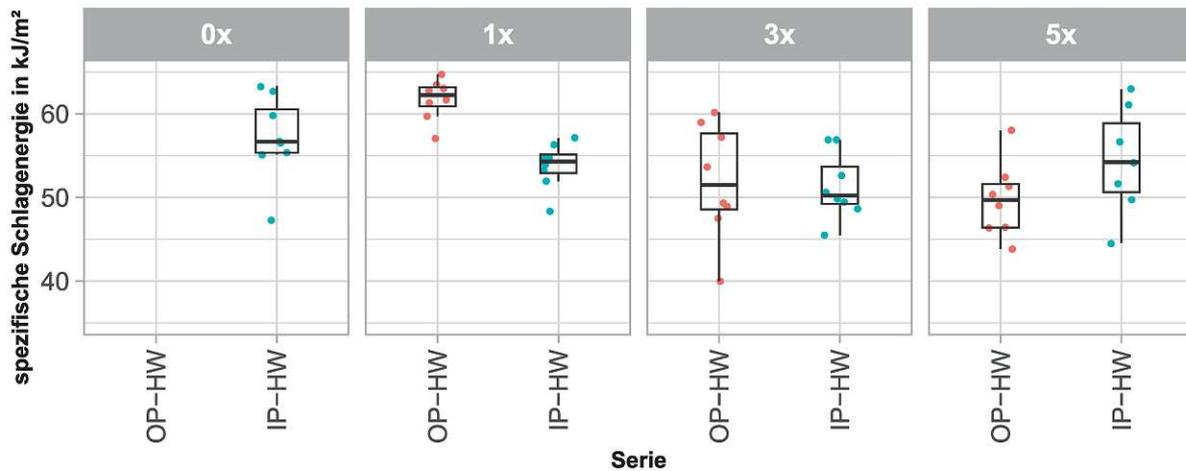


Abbildung 3.33: Boxplots der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der weißen St Polypropylen Sortierung

Abbildung 3.33 und die dazugehörige Tabelle 3.28 zeigt die Auswertung der Ergebnisse der Schlagzugzähigkeitsprüfung. Auch hier sind die mittleren Schlagenergien über beide Serien sehr ähnlich und pendeln um die 50 kJ/m^2 . Wie auch schon bei der bunten Sortierung ergeben sich hier zweimal Varianzkoeffizienten unter 5%. Weiters zu erwähnen ist, dass auch hier die geringsten Varianzkoeffizienten bei der ersten Verarbeitung zu beobachten sind.

Statistische Auswertung Mechanische Prüfungsergebnisse St Polypropylen Weiss

Tabelle 3.27: Statistische Kennzahlen für Streckspannung, E-Modul und Bruchdehnung der weißen St Polypropylen Sortierung

Konfiguration	Verarbeitung	Streckspannung			E-Modul			Bruchdehnung			Höchstspannung ^ Streckspannung in %		
		Mittelwert in N/mm ²	Veränderung in %	Varianzkoeffizient in %	Mittelwert in N/mm ²	Veränderung in %	Varianzkoeffizient in %	Minimale in %	Lower Hinge in %	Veränderung in %		Mittelwert in %	Varianzkoeffizient in %
OP - HW	0x	28,1	-1,4%	2,4	1238	-3%	2,0	31,9	657,4	-37%	662,2	37,1	58,3
	1x	27,7	-1,1%	1,8	1197	0%	4,3	58,3	416,4	-37%	793,0	49,3	16,7
	3x	27,4	-0,6%	2,8	1196	2%	3,9	55,3	261,3	-80%	431,4	58,3	0,0
	5x	27,6		1,6	1219		3,4	29,8	53,3		251,5	76,0	0,0
IP - HW	1x	27,7	-1,6%	1,8	1244	-1%	4,0	223,3	468,5	-85%	509,7	28,3	0,0
	3x	27,3	-1,0%	2,6	1229	-1%	3,5	23,1	70,5	-36%	285,0	80,1	0,0
	5x	27,0		2,0	1222		2,6	28,4	44,9		131,9	100,1	0,0

Tabelle 3.28: Statistische Auswertung der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der weißen St Polypropylen Sortierung

Konfiguration Verarbeitungen	IP - HW				OP - HW		
	1x	3x	5x	0x	1x	3x	5x
Mittelwert Schlagenergie in kJ/m ²	49,1	50,3	40,5	48,6	43,1	50,6	47,7
Median Schlagenergie in kJ/m ²	49,1	50,5	45,1	51,6	43,8	50,7	47,3
Varianzkoeffizient in %	4,7	5,2	21,3	21,8	23,9	4,3	7,4
Quartildispersionskoeff. in %	5	7,1	21,9	5,2	18,7	3,7	3,6

3.2.3.6 Thermische Analyse - St Weiss

Die Schmelz- sowie Erstarrungskurven der weißen St Sortierung sind in Abbildung 3.34 zu sehen.

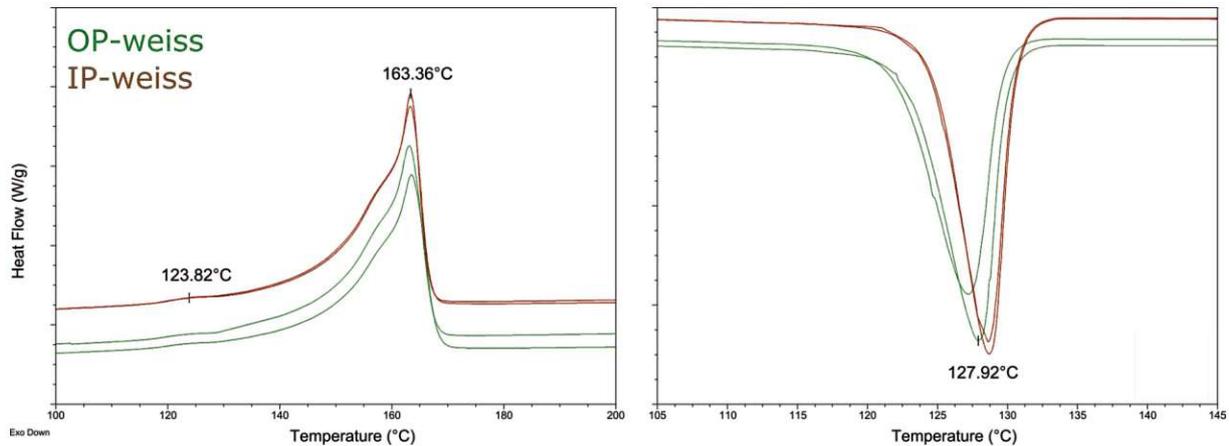


Abbildung 3.34: Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC der weissen St Polypropylen Sortierung

Hier erkennt man schnell, dass aufgrund des minimalen Ausschlags des Kontaminationsschmelzpeaks eine sehr geringe Kontamination der Sortierung vorliegt. Das einzig auffällige ist abermals die Ausbildung einer Nebenspitze beim Anstieg zum Polypropylen Peak bei etwa 163 °C. Die Erstarrungskurve bildet augenscheinlich keine Doppelsenke aus. Dies kann aber an der sehr geringen Kontamination dieser Sortierung liegen.

Mit einer errechneten Kontamination für die Flakes von 0,19% bis 0,28% liegen diese Werte sehr knapp bei dem der Handsortierung mit 0,28%. Die bereitgestellten Granulate weisen einen noch geringeren Anteil an Kontamination mit Werten zwischen 0,06% und 0,21% auf. Alle Werte für die gemessenen Schmelzenthalpien und den dazugehörigen berechneten Kontaminationen sind in 3.29 und 3.34 einzusehen.

Tabelle 3.29: Schmelzenthalpien & Berechnung der Kontamination mittels der eruierten Regressionsgeraden

Konfiguration (Kontamination m-%)	Schmelzenthalpie in J/g		Errechnete Kontamination in %					
			<i>PP-RCP+PEHD</i>		<i>PP-RCP+PELLD</i>		<i>PP2+PEHD</i>	
	Probe 1	Probe 2	Probe 1	Probe 2	Probe 1	Probe 1	Probe 1	Probe 2
IP-Weiss	0,37	0,31	0,24	0,19	0,23	0,19	0,28	0,23
OP-Weiss (0,4%)	0,1	0,29	0,06	0,18	0,06	0,18	0,07	0,21

Kapitel 4

Diskussion

Im ersten Teil wird ein kurzer Überblick über die verschiedenen Recyclingserien und das Verhalten der verschiedenen Konfigurationen (Rezyklat (OP), Flakes (IP), heißgewaschen (HW), kaltgewaschen (CW)) zueinander und im Vergleich zu den Modellserien gegeben. Anschließend werden Ableitungen aus den gewonnenen Daten beschrieben. Zuletzt wird ein Ausblick gegeben, der mögliche Weiterführungen dieser Arbeit für die Zukunft aufzeigt.

4.1 Vergleiche

4.1.1 Polyethylen

Im Gegensatz zu den anderen untersuchten Materialmischungen bzw. Sortierungen lassen sich bei der Polyethylen-Sortierung nur wenige Schlüsse ziehen. Weder das bereitgestellte Granulat (OP) noch die verarbeiteten Flakes (IP) zeigen markante Unterschiede. Auch die Unterscheidung zwischen den Konfigurationen kaltgewaschen (CW) und heißgewaschen (HW) ergibt in Bezug auf die mechanischen Kennwerte keine signifikanten Unterschiede. Einerseits ist es erfreulich, dass das kostengünstigere Kaltwaschen ähnliche Ergebnisse wie das teurere Heißwaschen erzielt. Andererseits können bezüglich der Kontamination durch Druckertinte, Kleberreste oder andere Stoffrückstände keine verbindlichen Aussagen getroffen werden, was im Hinblick auf das tatsächliche Recycling von großer Bedeutung ist. Selbst die relativen Streuungen der Kennwerte bewegen sich bei allen Unterserien in ähnlichen Bereichen. Erwähnenswert ist, dass die Ausreißer eher durch bessere als durch schlechtere Kennwerte auffallen.

Mit einer Kontamination von 2,5 % bei heißgewaschenen und 4,2 % bei kaltgewaschenen Flakes der beiden zur Verfügung gestellten Polyethylensortierungen des Lieferanten 'SB' passen die Werte gut zu denen der Modellserie mit einer Kontamination von 2 % bzw. 5 %.

Vergleicht man nun die Modellserie mit den sortierten Fraktionen bzw. Rezyklaten, sind die Rezyklate bei ähnlichen Streuungen sowohl bei der Streckgrenze als auch beim Elastizitätsmodul der Modellserie geringfügig überlegen. Die Bruchdehnungen hingegen erzielen bei der Modellserie durchwegs bessere Werte bei ähnlicher Streuung. Auch die Schlagzugzähigkeit schneidet bei der Modellserie mit durchwegs höheren Werten ab als bei den Recyclingserien.

4.1.2 Polypropylen

4.1.2.1 Lieferant ER

Die Zugprüfungsergebnisse zeigen sowohl bei den bereitgestellten Rezyklaten (OP), den verarbeiteten Flakes (IP) als auch bei den Konfigurationen heißgewaschen (HW) und kaltgewaschen (CW) ein ähn-

liches Verhalten. Für Elastizitätsmodul, Streckspannung und Bruchdehnung ist ein eindeutig fallender Trend bei wiederholter Extrusion zu erkennen. Die Bruchdehnungswerte weisen, besonders bei der fünften Verarbeitung, eine hohe Streuung auf. Die bereitgestellten Rezyklate erreichen, zumindest bis zur dritten Verarbeitung, durchwegs hohe Bruchdehnungswerte mit vergleichsweise geringer Streuung. Generell schneiden die bereitgestellten Rezyklate etwas besser ab als die selbst verarbeiteten Flakes. Die kaltgewaschene Fraktion erzielt ebenfalls etwas bessere Ergebnisse als die heißgewaschene. Bei der Schlagzugzähigkeit zeigt sich ein ähnliches Bild: Die Anzahl der Verarbeitungen hat einen negativen Einfluss auf die Schlagzugzähigkeit, während die Konfiguration eine eher untergeordnete Rolle spielt.

Die Sortiererergebnisse ergaben eine Kontamination von 6,4 % für die kaltgewaschene und 5,6 % für die heißgewaschene Fraktion.

Vergleicht man nun die Modellserien mit der Rezyklatserie, erkennt man, dass die Streckgrenzen der Rezyklatserie minimal schlechter ausfallen als bei den Modellserien. Der Elastizitätsmodul ist bei der Recyclingserie durchwegs um 10 % bis 15 % höher als bei den Modellserien. Die Bruchdehnung verhält sich diametral: Während die Bruchdehnung bei den Modellserien geringe Streuungen aufweist und mit Verarbeitung und Kontamination steigt, ist bei den Recyclingserien genau das Gegenteil der Fall.

Die Schlagzugzähigkeit zeigt bei beiden Serien ein ähnliches Verhalten: Mit zunehmender Verarbeitung sinken die Werte, jedoch sind die Werte der Modellserie etwa doppelt so hoch wie die der Recyclingserie.

4.1.2.2 Lieferant St

St-Bunt Bei dieser Serie wurde eine Kontamination von 9,7% bei der händischen Sortierung festgestellt. Die Werte der Streckgrenze und der Bruchdehnung zeigen das gewohnte Bild: Über die Verarbeitungen nehmen diese Werte tendenziell ab, und die Streuung nimmt, vor allem bei der fünften Verarbeitung, zu. Die Elastizitätsmoduln unterliegen keinen signifikanten Änderungen über die Verarbeitungen. Man kann jedoch einen leichten Anstieg bei den verarbeiteten Flakes erkennen, obwohl die Werte im Vergleich zum bereitgestellten Rezyklat schlechter abschneiden. Die Schlagzugzähigkeit bewegt sich bei beiden getesteten Unterserien auf ähnlichem Niveau. Das Rezyklat schneidet beim Elastizitätsmodul und bei der Streckgrenze mit höheren Werten ab als die verarbeiteten Flakes; bei der dritten und vierten Verarbeitung ist die Bruchdehnung der beiden Konfigurationen gleichwertig. Bei der Schlagzugzähigkeit ist keine eindeutige Aussage zu treffen.

Auch hier zeichnet sich ein ähnliches Bild wie bei dem des Lieferanten ER ab: Der Elastizitätsmodul fällt bei der Recyclingserie generell höher aus als bei den Modellserien. Die Streckgrenze ist bei der Recyclingserie etwas niedriger angesiedelt, und die Bruchdehnung verhält sich bei der Recyclingserie entgegengesetzt zu den Beobachtungen der Modellserien. Die Werte des Schlagzugzähigkeitsversuchs liegen auch hier nur bei circa der Hälfte der Modellserienwerte.

St-Weiss Bei dieser Sortierung wurde die geringste Kontamination aller untersuchten Sortierungen mit 0,4 % durch die Handsortierung festgestellt. Der Elastizitätsmodul zeigt keinen eindeutigen Trend im Verlauf der Verarbeitungen. Bei der Streckgrenze und der Bruchdehnung ist der Verfall der Werte über die Verarbeitungen deutlich zu erkennen. Bei der Bruchdehnung fallen die Werte bei der fünften Verarbeitung teilweise in den zweistelligen Bereich. Bei der Schlagzugzähigkeit ist kein eindeutiger Trend der Werte zu erkennen. Generell schneidet das Rezyklat bei den meisten erhobenen Daten mit minimal höheren Werten ab als die verarbeiteten Flakes.

Im Gegensatz zu den Modellserien sind Streckgrenze und Elastizitätsmodul deutlich höher. Dies kann auf die geringe Kontamination zurückzuführen sein. Bei der Bruchdehnung sind zum Teil sehr niedrige Werte zu verzeichnen, was man auf den geringen Polyethylenegehalt zurückführen könnte. Generell verhält sich die Bruchdehnung hier ebenfalls entgegengesetzt zu den Modellserien.

4.2 Conclusio

Nach der kurzen Zusammenfassung der Beobachtungen und des Vergleichs zwischen den verschiedenen Konfigurationen und den Modellserien kann man folgende Schlüsse ziehen:

- Kaltgewaschene oder heißgewaschene Konfigurationen haben keinen eindeutig erkennbaren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Dieser Schritt dient vermutlich eher der Dekontamination von möglichen oberflächlichen Verschmutzungen wie beispielsweise Kleber- oder Tintenreste.
- Die bereitgestellten Rezyklate schneiden hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften nur geringfügig besser ab als die verarbeiteten Flakes. Die Rezyklate haben durch den wahrscheinlich bei der Verarbeitung benutzten Schmelzfilter und Vakuumextruder erheblich weniger Verunreinigungen durch nicht schmelzende Fremdkörper und flüchtige Gase. Dies führt zu weniger Ausreißern nach unten und könnte auch Einfluss auf die Streuung der erhobenen Werte haben, da eine erhöhte Homogenität des Materials gegeben ist.
- Die mechanischen Kennwerte der Recyclingserie ähneln nur bedingt denen der Modellserien. Bei Streckgrenze und Elastizitätsmodul ist über die Verarbeitungen hinweg ein ähnliches Niveau der Werte zu erkennen, was ein Recycling in dieser Hinsicht bedenkenlos durchführbar macht. Die Bruchdehnung verhält sich bei den Recyclingserien diametral zu den Modellserien. Da man davon ausgehen kann, dass das Recyclingmaterial noch keine etlichen Wiederverarbeitungszyklen hinter sich hat, da es für PE und PP hier noch wenig Infrastruktur gibt, kann das als Ursache wahrscheinlich ausgeschlossen werden. Daher dürften Additive bzw. Farbstoffe sowie Degradationsmechanismen, denen der Kunststoff während des Gebrauchs ausgesetzt war, und andere kontaminierende Kunststoffe, auch wenn diese laut den Sortierergebnissen nur in geringem Maße vorhanden waren, für die Diskrepanzen verantwortlich sein. Man könnte auch in Betracht ziehen, dass die gewählten Kunststoffe der Modellserien ungünstige Paarungen zur Nachstellung der untersuchten Kunststofffraktionen darstellten.
- Die Varianzkoeffizienten, welche eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Serien bieten, stellen auch ein Maß der Verlässlichkeit der untersuchten Eigenschaften dar. Vor allem bei den Bruchdehnungen der Recyclingserien sind die Varianzkoeffizienten sehr hoch, was für eine geringe Verlässlichkeit und Reproduzierbarkeit steht und beim Recycling unbedingt zu beachten ist.
- Auch die Schlagzugzähigkeit der Modellserie zeigt über die Verarbeitungen hinweg ein ähnliches Verhalten wie die Recyclingserie. Es können zumeist keine eindeutigen Trends erkannt werden. Die Werte der Modellserie sind jedoch zum Teil doppelt so hoch. Daher ist hier im Bereich Recycling mit einer gewissen Vorsicht zu arbeiten.
- Die thermische Analyse sowie die abgeleiteten Modelle haben für dieses rudimentäre Modell zumindest teilweise akzeptable Ergebnisse erzielt.
 - Die erstellten Modelle und deren Plots zur Kontaminationsbestimmung, welche in Abbildung 4.2 und 4.1 gezeigt werden, können natürlich nur als grober Richtwert der Kontamination betrachtet werden, da in realen Kunststoffabfallströmen verschiedene Konfigurationen von PE und PP vorkommen bzw. unterschiedlichste Additive für Spezialanwendungen enthalten sind, welche die thermische Analyse im Gegensatz zu den Modellserien verzerren. Grundsätzlich könnte sich dadurch jedoch eine sichere Methode zur Bestimmung von Kontaminationen entwickeln. Die derzeitige Unschärfe der Modelle können potentiell auf folgende Punkte zurückzuführen sein:

- * Die Materialzusammensetzung der Modelle weicht zu stark vom tatsächlichen Abfallstrom ab.
 - * Es bestanden potenzielle Inhomogenitäten beim Sortiervorgang da nur maximal 100g untersucht wurden.
 - * Selbst mittels DSC untersuchte Proben der selben Serie unterliegen einer Schwankungsbreite, wie in den Abbildungen weiter unten deutlich zu sehen ist.
 - * Die Kompensation des Hauptmaterials ist möglicherweise nicht ausreichend.
 - * Die Wahl der Integrationsschranken ist suboptimal.
 - * Die verfügbaren Daten waren begrenzt.
- Die Modellserien mit Polypropylen Random Copolymer waren nur bedingt brauchbar, da die Ethylenketten im Polypropylen die Kurven verzerrten und sich somit Doppelspitzen ausbildeten, welche die Modellerstellung erschwerten. Vor allem konnte man den Ethylenanteil im Granulat nicht genau bestimmen oder nachlesen, was die Modellanpassungen zusätzlich erschwerte.
 - Die Modelle, welche mit Polypropylen Homopolymer erstellt wurden, waren zuverlässiger und lieferten zum Teil ähnliche Werte wie die Handsortierung.

In den Abbildungen 4.1 und 4.2 sind die berechneten linearen Regressionen dargestellt, die aus den erhobenen Daten der Modellserien resultieren. Die farblich markierten Datenpunkte repräsentieren die aus den DSC-Messungen ermittelten Schmelzenergien der Kontaminationen der Inputmaterialien, also der bereitgestellten Flakes der Recyclingserie. Als Kontaminationsgrade wurden die aus der Handsortierung errechneten Werte der jeweiligen Sortierungen verwendet, die zusätzlich auf der Abszisse rot markiert und durch vertikale Linien im Diagramm hervorgehoben wurden.

Die schwarzen Symbole stellen die Datenpunkte der bereitgestellten Granulate, in der Legende als Rezyklate bezeichnet, der Lieferanten dar. Auch hier wurden die Schmelzenthalpien mittels DSC-Messungen durch Integration der Kontaminationspeaks ermittelt. Als Kontaminationsgrade wurden ebenfalls die Ergebnisse der Handsortierung herangezogen, da angenommen wird, dass die Regranulate der Lieferanten aus denselben Kunststoffabfallströmen hergestellt wurden, von denen auch die bereitgestellten Flakes stammen. Zusätzlich wurden horizontale Linien im Diagramm eingefügt, um die Schnittpunkte mit den Modellen darzustellen. In Abbildung 4.1 wird das Modell 'PP RCP - PE LLD' nur der Vollständigkeit halber gezeigt, da – wie bereits im Ergebnisteil erläutert – aus den gemessenen Werten kein sinnvolles Modell erstellt werden konnte.

Für alle verarbeiteten Daten wurden grundsätzlich zwei Proben der fünften Extrusion mittels DSC gemessen und ausgewertet. Dies gilt sowohl für die zur Modellerstellung genutzten Daten als auch für die Datenpunkte in den Diagrammen 4.1 und 4.2.

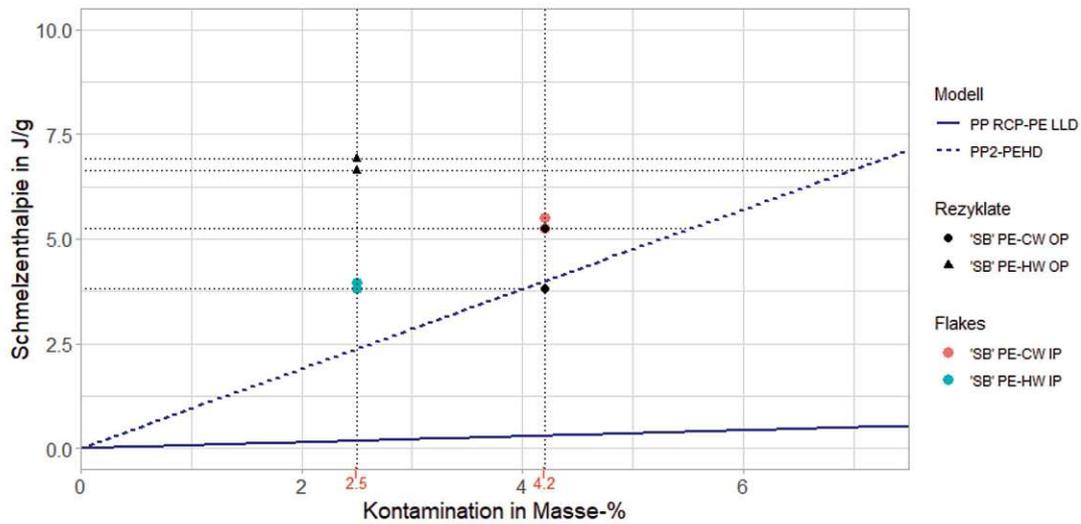


Abbildung 4.1: Plot der Polyethylen Modelle sowie der Recyclingserien

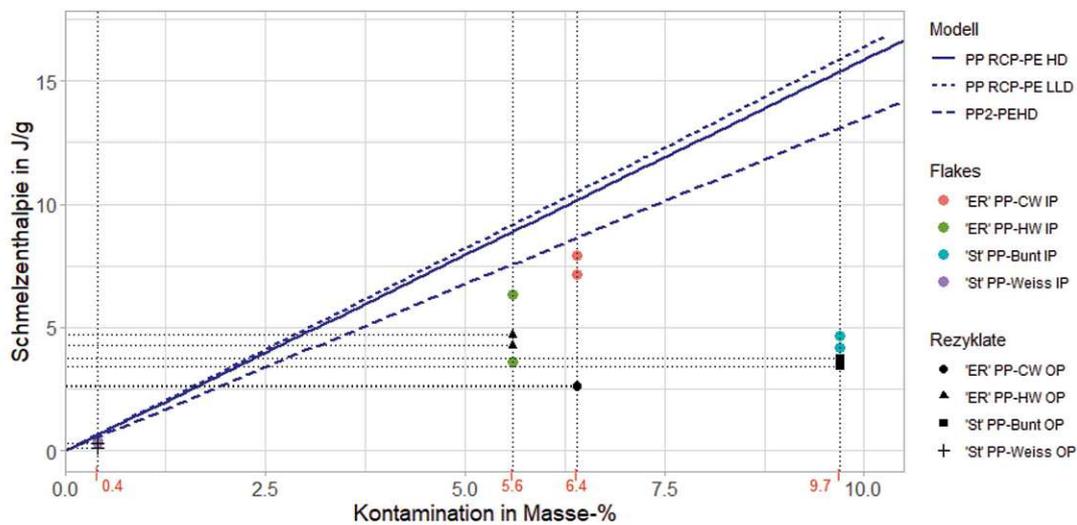


Abbildung 4.2: Plot der Polypropylen Modelle sowie der Recyclingserien

4.3 Aussichten

Diese Diplomarbeit hat einen großen Bereich verschiedener Materialien abgedeckt, jedoch diese nur in begrenzten Teilbereich, nämlich vor allem die mechanischen Kennwerte, untersucht. Die technische Eignung zur Weiterverarbeitbarkeit der Materialien bzw. Verunreinigungen in den Rezyklaten und bereitgestellten Flakes wurde im Zuge dieser Arbeit nicht untersucht, sodass eine ganzheitliche Betrachtung der Eignung zur Wiederverwendbarkeit offen bleibt.

Die Modellserien, welche bei der mechanischen Analyse immer Polypropylen-Random-Copolymer enthielten, repräsentieren wahrscheinlich keine realistische sortierte Kunststofffraktion, auch wenn sich Polypropylen-Random-Copolymer in der Verpackungsindustrie großer Beliebtheit erfreut.

4.3.1 Mechanische Prüfung

Unter Umständen wäre eine Untersuchung von Risscharakteristika bei der Zugprüfung aufschlussreich, um zu erkennen, welche Polymere und welche Kontaminationen zu erwarten sind, da sich aufgrund der Modellserie und der unterschiedlichen Kontaminationen immer eine Art von Riss durchgesetzt hat.

Der Schlagzugzähigkeitsversuch hat, wie schon erwähnt, bei nur einer Unterserie das Kriterium der Norm erreicht, nur fünf statt zwölf Proben prüfen zu müssen. Die Schwankungsbreite der durchgeführten Messungen war dementsprechend hoch, was vor allem im Hinblick auf die Modellserie und virgin Materialien stutzig macht, ob der Versuchsaufbau richtig funktionierte.

4.3.2 Thermische Analyse

Da schon das in dieser Arbeit erstellte, sehr rudimentäre Modell zum Teil realistische Werte lieferte, ist eine Entwicklung genauerer Modelle zu empfehlen. Die Optimierung der unteren Schranke des Integrals zur Verbesserung der Kompensation des Hauptmaterials wäre hier ein möglicher und wichtiger Ansatz. Auch eine komplexere Kurvenanpassung anstatt einer einfachen linearen Regression wäre denkbar und würde die Ergebnisse womöglich verbessern. Natürlich ist auch die experimentelle Analyse mit verschiedenen Kunststoffen und Additiven ein sinnvoller weiterer Schritt.

Literaturverzeichnis

- [1] Dr. Karl Hassack. Über zelluloid und verwandte erzeugnisse. *Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien*, 44:39, 1904.
- [2] Finestre sull'Arte. Der Konstruktivismus. Geschichte und Stil der russischen Avantgarde-b.
- [3] ENL Group. War on Plastics: How World War II Changed The Plastics Industry. <https://tinyurl.com/4zkfa873>, May 2022. (Accessed on 05/21/2024).
- [4] Jo Foster. How plastic was crucial to the war effort. November 2019.
- [5] V.E. Yarsley, E.G. Couzens, and Penguin. *Plastics*. Pelican book. Penguin, München, 1945.
- [6] Dart Industries Inc. Tupperware - die Geschichte. <https://tinyurl.com/2j9rbp9t>, 2024. (Accessed on 05/25/2024).
- [7] Peter Stackpole. Throwaway living - disposable items cut down household chores. *LIFE*, 39(5), 1955.
- [8] Michael Musto. Tischapparat w 28 aus bakelit von siemens & halske. <https://tinyurl.com/2ubtum72>, 2021. (Accessed on 06/17/2024).
- [9] J.L. Meikle and Rutgers University Press. *American Plastic: A Cultural History*. Rutgers University Press, Rutgers, 1995.
- [10] Lloyd Stouffer. 1963 national plastics conference. *The Society of the Plastics Industry, Inc.*, page 4, 1963.
- [11] Geyer et al. (2017); OECD (2022) – with major processing by Our World in Data. Global plastics production. <https://tinyurl.com/58wptxx6>, 2022. (Accessed on 06/17/2024).
- [12] PoloPlast. *Technisches Handbuch*. Poloplast GmbH & Co KG, Leonding, Austria, 2023. (Accessed on 05/26/2024).
- [13] Anthony L. Andrady and Mike A. Neal. Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 364(1526):1977–1984, 2009.
- [14] Ensinger Sintimid GmbH. Chemisch beständige Kunststoffe. <https://tinyurl.com/5n9a47p4>, 2024. (Accessed on 05/26/2024).
- [15] A. Behr, D.W. Agar, and J. Jörissen. *Einführung in die Technische Chemie*. Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
- [16] FasterCapital. Fraktionierung Trennung der Bestandteile von Erdgasflüssigkeiten. <https://tinyurl.com/2dk86z62>, June 2024. (Accessed on 06/02/2024).
- [17] Zahra Gholami, Fatemeh Gholami, Zdeněk Tišler, and Mohammadtaghi Vakili. A review on the production of light olefins using steam cracking of hydrocarbons. *Energies (Basel)*, 14(23):8190, 2021.

- [18] Heinz Zimmermann. *Propene*. John Wiley and Sons, Ltd, Hoboken, New Jersey, 2013.
- [19] Martin Kansy, Philipp Neuner, Siegfried Bajohr, Reinhard Rauch, and Thomas Kolb. Vergleich verschiedener ansätze zur nachhaltigen olefinproduktion nach dem mto- und ft-verfahren. *Chemie Ingenieur Technik*, 95(9):1476–1481, 2023.
- [20] Zhitong Zhao, Jingyang Jiang, and Feng Wang. An economic analysis of twenty light olefin production pathways. *Journal of energy chemistry*, 56:193–202, 2021.
- [21] Sesotec. Kunststoffkreislaufwirtschaft. <https://tinyurl.com/5y3c8e34>, July 2023. (Accessed on 06/18/2024).
- [22] Jaume Duch Guillot. Plastic waste and recycling in the eu: facts and figures. *Topics - European Parliament*, December 2018. <https://tinyurl.com/7mvnyvcj>.
- [23] Plastics Europe enabling a sustainable future. *Plastics - the fast Facts 2023*. Plastics Europe AISBL, Brussels, Belgium, 2023.
- [24] Isabelle Huber Tobias Schleicher Lina-Sophie Achilles Johannes Betz, Hannah Bachmann. *Kunststoffabfälle aus Deutschland: Handlungsempfehlungen zu einer umweltgerechten Behandlung im In- und Ausland*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Germany, March 2024. <https://tinyurl.com/yc3kwez>.
- [25] Europäisches Parlament. Plastikmüll und recycling in der eu: Zahlen und fakten. *Artikel*, 20181212STO21610, 2021. <https://tinyurl.com/5ydc2uxn>.
- [26] blick.ch. Manschiyyet Nasser recycelt den Müll aus Kairo. <https://tinyurl.com/4tj4nkst>, 2023. (Accessed on 06/17/2024).
- [27] Amy L. Brooks, Shunli Wang, and Jenna R. Jambeck. The chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. *Science Advances*, 4(6):eaat0131, 2018.
- [28] European Commission. Plastics strategy. *Energy, Climate change, Enviroment*, 2023. <https://tinyurl.com/7mvnyvcj>.
- [29] Katharina Beyerl, Franz Bogner, Maria Daskalakis, Thomas Decker, Anja Hentschel, Mandy Hinzmann, Bastian Loges, Doris Knoblauch, Linda Mederake, Ruth Müller, Frieder Rubik, Stefan Schweiger, and Immanuel Stieß. Wege zum nachhaltigen umgang mit kunststoffen: Kernbotschaften sozialwissenschaftlicher forschung. *Gaia*, 31(1):51–53, 2022.
- [30] Beth Gardiner. The plastics pipeline: A surge of new production is on the way. *Yale E360*, December 2019. <https://tinyurl.com/mutjzb95>.
- [31] Kenneth R. Weiss. Altered oceans: Part four: Plague of plastic chokes the seas. *Los Angeles Times*, August 2006. (Accessed on 07/29/2024).
- [32] Adriana García Rellán, Diego Vázquez Ares, Constantino Vázquez Brea, Ahinara Francisco López, and Pastora M. Bello Bugallo. Sources, sinks and transformations of plastics in our oceans: Review, management strategies and modelling. *Science of The Total Environment*, 854:158745, 2023.
- [33] Ieva Rucevska Thomas Maes Lars Rosendahl Appelquist Miles Macmillan-Lawler Peter Harris Karen Raubenheimer Romain Langeard Heidi Savelli-Soderberg Kei Ohno Woodall Jost Dittkrist Tabea Anna Zwimpfer Ruta Aidis Clever Mafuta Tina Schoolmeester Maria Tsakona, Elaine Baker. Drowning in plastics – marine litter and plastic waste vital graphics. *United Nations Environment Programme*, page 77, 2021.

- [34] Sarah J Morath. *Our plastic problem and how to solve it*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2022.
- [35] Sheng Liu, Chenyang Wang, Yunxiao Yang, Zhiyong Du, Li Li, Meng Zhang, Siyao Ni, Zhijian Yue, Kexin Yang, Yu Wang, Xinxin Li, Yaochen Yang, Yanwen Qin, Jianrong Li, Yaoguo Yang, and Ming Zhang. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (py-gc/ms). *Journal of hazardous materials*, 469:133855–133855, 2024.
- [36] European Commission. Waste framework directive. *Energy, Climate change, Environment*, 2023. <https://tinyurl.com/7mvnyvcj>.
- [37] Maria Tesar Peter Thaler Christian Neubauer, Barbara Stoifl. Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich: Status 2019. *Report - Umweltbundesamt*, REP-0744, 2021. <https://tinyurl.com/5ydc2uxn>.
- [38] APA. Österreich recycelt nur 14 Prozent seiner Plastikverpackungen. *derStandard*, July 2024. (Accessed on 07/29/2024).
- [39] S. A. Cruz and M. Zanin. Pet recycling: Evaluation of the solid state polymerization process. *Journal of applied polymer science*, 99(5):2117–2123, 2006.
- [40] EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes, Flavourings and Processing Aids (CEF) . Scientific opinion on the safety assessment of the process “4pet” used to recycle post-consumer pet into food contact materials. *EFSA Journal*, 11(10):3399, 2013.
- [41] F. Devlieghere and A. Huyghebaert. Removal of microorganisms from polymer bottles by caustic washing. *LWT - Food Science and Technology*, 30(1):62–69, 1997.
- [42] Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO 527-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-2:2012, 2012.
- [43] Kunststoffe - Bestimmung der Schlagzugzähigkeit (ISO/DIS 8256:2022); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 8256:2022, 2022.
- [44] Thermo Scientific. *HAAKE MiniLab II*. Fisher Scientific GmbH, Waltham, Massachusetts, 2008.
- [45] TA Instruments. *Thermanl Analysis Brochure*. Waters Corporation, Milford, Massachusetts, 2012.
- [46] Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2019, 2019.
- [47] Instron. Pendelschlagwerk-prüfmaschine. <https://tinyurl.com/bdehwv6t>, 2024. (Accessed on 06/17/2024).
- [48] Amir Bashirgonbadi, Yannick Ureel, Laurens Delva, Rudinei Fiorio, Kevin M. Van Geem, and Kim Ragaert. Accurate determination of polyethylene (pe) and polypropylene (pp) content in polyolefin blends using machine learning-assisted differential scanning calorimetry (dsc) analysis. *Polymer Testing*, 131:108353, 2024.
- [49] Åge G. Larsen, Kjell Olafsen, and Ben Alcock. Determining the PE fraction in recycled PP. *Polymer Testing*, 96:107058, 2021.
- [50] Xu W Ren Y Leng H Liang L Zheng D Chen J Jiang H Wu B, Zheng X. Beta-nucleated polypropylene: Preparation, nucleating efficiency, composite, and future prospects. *Polymers*, July 2023.

4.3.1 Mechanische Prüfung

Unter Umständen wäre eine Untersuchung von Risscharakteristika bei der Zugprüfung aufschlussreich, um zu erkennen, welche Polymere und welche Kontaminationen zu erwarten sind, da sich aufgrund der Modellserie und der unterschiedlichen Kontaminationen immer eine Art von Riss durchgesetzt hat.

Der Schlagzugfähigkeitsversuch hat, wie schon erwähnt, bei nur einer Unterserie das Kriterium der Norm erreicht, nur fünf statt zwölf Proben prüfen zu müssen. Die Schwankungsbreite der durchgeführten Messungen war dementsprechend hoch, was vor allem im Hinblick auf die Modellserie und virgin Materialien stutzig macht, ob der Versuchsaufbau richtig funktionierte.

4.3.2 Thermische Analyse

Da schon das in dieser Arbeit erstellte, sehr rudimentäre Modell zum Teil realistische Werte lieferte, ist eine Entwicklung genauerer Modelle zu empfehlen. Die Optimierung der unteren Schranke des Integrals zur Verbesserung der Kompensation des Hauptmaterials wäre hier ein möglicher und wichtiger Ansatz. Auch eine komplexere Kurvenanpassung anstatt einer einfachen linearen Regression wäre denkbar und würde die Ergebnisse womöglich verbessern. Natürlich ist auch die experimentelle Analyse mit verschiedenen Kunststoffen und Additiven ein sinnvoller weiterer Schritt.

3.4	Regressionsgerade	40
3.5	Boxplots der Zugprüfungsergebnisse der Serie PP-Random Copolymer + PE-Linear Low Density	41
3.6	Boxplots der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der Serie PP-Random Copolymer + PE-Linear Low Density	42
3.7	Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC des Polypropylen Random Copolymer & Polyethylen Linear Low Density Blends	44
3.8	Regressionsgerade	44
3.9	Boxplots der Zugprüfungsergebnisse der Serie PE High Density + PP Random Copolymer	45
3.10	Boxplots der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der Serie PE High Density + PP-Random Copolymer	46
3.11	Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC des Polyethylen High Density & Polypropylen Random Copolymer Blends	48
3.12	Regressionsgerade	48
3.13	Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC des Polypropylen Homopolymer & Polyethylen High Density Blends	49
3.14	Regressionsgerade	49
3.15	Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC des Polyethylen High Density & Polypropylen Homopolymer Blends	50
3.16	Regressionsgerade	50
3.17	Flakeanalyse für ER Polypropylen kaltgewaschene post consumer Flakes	52
3.18	Flakeanalyse für ER Polypropylen heißgewaschene post consumer Flakes	53
3.19	Boxplots der Zugprüfungsergebnisse der ER Polypropylensortierungen	54
3.20	Boxplots der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der ER Propylensortierungen	55
3.21	Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC der ER Polypropylen Sortierung	58
3.22	Flakeanalyse für SB Polyethylen kaltgewaschene post consumer Flakes - Sortierergebnisse	60
3.23	Flakeanalyse für SB Polyethylen heißgewaschene post consumer Flakes	61
3.24	Boxplots der Zugprüfungsergebnisse der SB Polyethylensortierung	62
3.25	Boxplots der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der SB Polyethylensortierung	63
3.26	Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC der ER Polyethylen Sortierung	65
3.27	Flakeanalyse für St Polypropylen kaltegewaschene bunte post consumer Flakes	67
3.28	Boxplots der Zugprüfungsergebnisse der bunten St Polypropylen Sortierung	68
3.29	Boxplots der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der bunten St Polypropylen Sortierung	69
3.30	Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC der bunten St Polypropylen Sortierung	71
3.31	Flakeanalyse für St Polypropylen hießgewaschene weiße post consumer Flakes	72
3.32	Boxplots der Zugprüfungsergebnisse der weißen St Polypropylen Sortierung	73
3.33	Boxplots der Schlagzugzähigkeitsversuchsergebnisse der weißen St Polypropylen Sortierung	74
3.34	Die Abbildungen zeigen die thermische Analyse mittels DSC der weissen St Polypropylen Sortierung	76
4.1	Plot der Polyethylen Modelle sowie der Recyclingserien	80
4.2	Plot der Polypropylen Modelle sowie der Recyclingserien	81

4.3.1 Mechanische Prüfung

Unter Umständen wäre eine Untersuchung von Risscharakteristika bei der Zugprüfung aufschlussreich, um zu erkennen, welche Polymere und welche Kontaminationen zu erwarten sind, da sich aufgrund der Modellserie und der unterschiedlichen Kontaminationen immer eine Art von Riss durchgesetzt hat.

Der Schlagzugzähigkeitsversuch hat, wie schon erwähnt, bei nur einer Unterserie das Kriterium der Norm erreicht, nur fünf statt zwölf Proben prüfen zu müssen. Die Schwankungsbreite der durchgeführten Messungen war dementsprechend hoch, was vor allem im Hinblick auf die Modellserie und virgin Materialien stutzig macht, ob der Versuchsaufbau richtig funktionierte.

4.3.2 Thermische Analyse

Da schon das in dieser Arbeit erstellte, sehr rudimentäre Modell zum Teil realistische Werte lieferte, ist eine Entwicklung genauerer Modelle zu empfehlen. Die Optimierung der unteren Schranke des Integrals zur Verbesserung der Kompensation des Hauptmaterials wäre hier ein möglicher und wichtiger Ansatz. Auch eine komplexere Kurvenanpassung anstatt einer einfachen linearen Regression wäre denkbar und würde die Ergebnisse womöglich verbessern. Natürlich ist auch die experimentelle Analyse mit verschiedenen Kunststoffen und Additiven ein sinnvoller weiterer Schritt.

4.3.1 Mechanische Prüfung

Unter Umständen wäre eine Untersuchung von Risscharakteristika bei der Zugprüfung ausschlaggebend, um zu erkennen, welche Polymere und welche Kontaminationen zu erwarten sind, da sich aufgrund der Modellserie und der unterschiedlichen Kontaminationen immer eine Art von Riss durchgesetzt hat.

Der Schlagzugfähigkeitsversuch hat, wie schon erwähnt, bei nur einer Unterserie das Kriterium der Norm erreicht, nur fünf statt zwölf Proben prüfen zu müssen. Die Schwankungsbreite der durchgeführten Messungen war dementsprechend hoch, was vor allem im Hinblick auf die Modellserie und virgin Materialien stützig macht, ob der Versuchsaufbau richtig funktionierte.

4.3.2 Thermische Analyse

Da schon das in dieser Arbeit erstellte, sehr rudimentäre Modell zum Teil realistische Werte lieferte, ist eine Entwicklung genauerer Modelle zu empfehlen. Die Optimierung der unteren Schranke des Integrals zur Verbesserung der Kompensation des Hauptmaterials wäre hier ein möglicher und wichtiger Ansatz. Auch eine komplexere Kurvenanpassung anstatt einer einfachen linearen Regression wäre denkbar und würde die Ergebnisse womöglich verbessern. Natürlich ist auch die experimentelle Analyse mit verschiedenen Kunststoffen und Additiven ein sinnvoller weiterer Schritt.