



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN



Diplomarbeit

# **Einflüsse von Waschparametern und makromolekularen Kontaminationen auf die Materialeigenschaften von "post- consumer" Verpackungskunststoffen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs  
(Dipl.-Ing. oder DI), eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und  
Betriebswissenschaften, von

**Philipp-Raphael HEFTBERGER, BSc**

Mat.Nr.: 00826537

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof.in Dipl.-Ing. Dr.in mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki

betreut von

Dipl.-Ing. Lorenz Pinkas Bichler, BSc

Institut für Werkstoffwissenschaften und Werkstofftechnologie, E308-02-1

Wien, Mai 2025

# Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit sowie während meiner Studienzeit unterstützt haben.

Besonderen Dank möchte ich Frau Prof. Archodoulaki als Hauptbetreuerin dieser Arbeit aussprechen, die mir die Anfertigung dieser Arbeit ermöglichte und dabei viel Geduld aufbrachte. Mein weiterer Dank gilt meinem Betreuer Lorenz Bichler, der mich durch seine hilfsbereite und kompetente Art maßgeblich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützte. Ebenso danke ich meinem privaten Umfeld, das mich während meiner gesamten Studienzeit begleitet und bestärkt hat.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Post-Consumer Flakes wurden durch die Mithilfe aller Forschungspartner des Projekts „Pack2TheLoop“ und durch die großzügige Bereitstellung von Ausrüstung durch die Johannes Kepler Universität Linz im „LIT Open Innovation Center“ geschreddert und gewaschen.

Ich bedanke mich deshalb für die Koordination, Durchführung und Bereitstellung der erforderlichen Gerätschaften bei:

- Elisabeth Jahn, Manuel Pfizner, Katrin Detter, Martin Novak und Roman Reinbacher (**FH Campus Wien**, Koordination und Waschversuche);
- Klaus Straka, Jörg Fischer und Thomas Kranzl (**Leitung LIT Open Innovation Center**, Bereitstellung von Gerätschaften);
- Nina Krempf (**Montanuniversität Leoben**, Koordination, Waschversuche und Probenlogistik);
- Elisabeth Pinter und Michael Washüttl (**OFI**, Koordination und Waschversuche), sowie
- Martin Bammer (**TU Wien**, Waschversuche).

## Kurzfassung

Kunststoffrecycling ist bereits seit den 1970er-Jahren ein relevantes Thema, bedingt durch die hohe Umweltbeständigkeit dieser Materialien und den bereits damals prognostiziert steigenden Produktionszahlen. [1] Die heutige Produktionsmenge übersteigt diese Werte signifikant, wobei Verpackungskunststoffe einen Großteil des Kunststoffverbrauchs ausmachen. Diese spielen somit eine zentrale Rolle in der Kreislaufwirtschaft. Für die Verarbeitung von Rezyklaten sind definierte und konsistente Materialeigenschaften entscheidend, um produktspezifische Anforderungen zu erfüllen und eine in etwa äquivalente Qualität wie mit Primärrohstoffen zu erreichen. Ein entscheidender Schritt ist dabei das mechanische Recycling, bei dem Kunststoffe gewaschen, zerkleinert und eingeschmolzen werden. Die Herausforderungen in diesem Prozess umfassen Verunreinigungen, Degradation durch vorherige Nutzung und Verarbeitung, sowie unsortierte Materialmischungen, welche die Qualität der Rezyklate beeinträchtigen.

In dieser Arbeit wurden zwei der dominierenden Verpackungskunststoffe, Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP), sowie das ebenfalls weit verbreitete Polystyrol (PS) untersucht, um ihr Materialverhalten im Recyclingprozess zu charakterisieren. Der Fokus lag auf der Analyse des Einflusses von Waschtemperatur und Waschmedium auf die rheologischen und mechanischen Eigenschaften von PP- und PS-Rezyklaten aus Post-Consumer-Bechern. Variiert wurden die Parameter Temperatur (60 °C/80 °C) und Waschmedium (Wasser/Natronlauge). Für die Untersuchungen wurden im Vorfeld zu dieser Arbeit händisch sortierte und mit den verschiedenen Waschparametern gereinigte und geschredderte Becher herangezogen. Zur Simulation des Recyclingprozesses und Analyse der Auswirkungen einer Mehrfachverarbeitung wurden die Materialien bis zu fünfmal extrudiert. Zur quantitativen Analyse der Eigenschaften der Proben kamen Zugversuche, Schlagzugversuche, MFR-Messungen sowie Viskositätsmessungen am Rheometer zur Anwendung. Zusätzlich wurde die Relevanz sortenreiner Trennung anhand einer Materialmischung aus PP und High-Density-Polyethylen (HDPE) evaluiert, wobei eine Duschgelflasche als Modell diente.

Die Untersuchungen zeigten, dass Waschbehandlungen mit Natronlauge und höheren Temperaturen die Reinigungswirkung gegenüber Wasser verbessern, insbesondere durch die effektivere Entfernung von Etiketten, Druckfarben und Aluminium, jedoch teilweise eine Verschlechterung der rheologischen und mechanischen Eigenschaften verursachen. PS erwies sich aufgrund seiner Materialeigenschaften besser für den Recyclingprozess geeignet, da die Mehrfachverarbeitung hier geringere Auswirkungen zeigte. Anhand der Materialien der Duschgelflasche konnte zudem die Relevanz einer sortenreinen Trennung verdeutlicht werden, da die Mischung der Materialien zu erheblichen Qualitätseinbußen führte.

Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse die Bedeutung angepasster Sortier- und Aufbereitungsverfahren, um die Materialqualität recycelter Kunststoffe langfristig zu erhalten.

## Abstract

Since the 1970s, plastic recycling has been a pertinent topic due to the high environmental resistance of these materials and the already then predicted increase in production figures. [1] Today's production volumes significantly exceed these figures, whereas packaging plastics accounts for a large proportion of plastic consumption. Hence, they play a key role in the circular economy. Defined and consistent material properties are crucial for the processing of recyclates to meet product-specific requirements and achieve a quality approximately equivalent to the one of primary raw materials. An essential step in this process is mechanical recycling, in which plastics are washed, shredded and melted. The challenges in this process comprise impurities, degradation from previous use and processing, as well as unsorted material mixtures impairing the quality of the recyclates.

In this thesis, two of the dominant packaging plastics, polyethylene (PE) and polypropylene (PP), as well as polystyrene (PS), which is also widely used, were examined aiming to characterise their material behaviour in the recycling process. The focus was put on analysing the influence of washing temperature and washing medium on the rheological and mechanical properties of PP and PS recyclates from post-consumer cups. The parameters temperature (60 °C/80 °C) and washing medium (water/caustic soda solution) were altered. For examination, cups that had been manually sorted, cleaned with the various washing parameters, and shredded beforehand, were used. The materials were extruded up to five times to simulate the recycling process and analyse the impact of multiple processing. For the purpose of quantitative analysis of the samples, tensile tests, tensile impact tests, MFR measurements and viscosity measurements on the rheometer were performed. In addition, the relevance of unmixed separation was assessed using a material mixture of PP and high-density polyethylene (HDPE), whereas a shower gel bottle served as model.

The tests showed that washing treatments with caustic soda and higher temperatures improve the cleaning effect by more effectively removing labels, printing inks and aluminium from PP and PS flakes compared to pure water. However, in some cases deterioration in the rheological and mechanical properties occurred. PS proved to be more suitable for the recycling process due to its material properties, considering that multiple processing had less impact. The materials in the shower gel bottle were also used to illustrate the importance of sorting by type, since mixing the materials led to significant quality losses.

Overall, the results emphasise the importance of adapted sorting and processing methods in order to maintain the material quality of recycled plastics in the long term.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Kunststoffe.....	3
1.1.1	Verarbeitung von Thermoplasten.....	5
1.1.1.1	Spritzgießen .....	6
1.1.1.2	Extrusion .....	6
1.1.1.3	Extrusionsblasformen .....	7
1.1.1.4	Tiefziehen (Thermoformen).....	7
1.1.2	Wichtige Thermoplaste .....	8
1.1.2.1	Polyethylen (PE) .....	8
1.1.2.2	Polypropylen (PP).....	10
1.1.2.3	Polystyrol (PS).....	11
1.2	Recycling von Kunststoffen .....	12
2	Materialien und Methoden.....	14
2.1	Materialien.....	14
2.1.1	Becher.....	14
2.1.1.1	PP und PS Flakes .....	15
2.1.1.2	Referenzmaterial: PP Becher (Fa. Greiner) .....	17
2.1.1.3	Referenzmaterial: PS Flakes und Regranulat (Fa. Viscotec).....	18
2.1.2	Duschgelflasche .....	19
2.2	Methoden.....	20
2.2.1	Übersicht Probeherstellungsverfahren und Methoden .....	20
2.2.2	Probenherstellung.....	23
2.2.2.1	Materialaufbereitung.....	23
2.2.2.1.1	Schwimm-Sink-Verfahren .....	23
2.2.2.1.2	Sortierung.....	25
2.2.2.1.3	Mühle .....	25
2.2.2.2	Extrusion .....	26
2.2.2.3	Extrusion und Spritzguss .....	27
2.2.2.4	Presse .....	28
2.2.2.5	Stanzen.....	29
2.2.3	Thermische Analyse .....	29
2.2.3.1	Dynamische Differenzkalorimetrie.....	30
2.2.4	Rheologische Analysen.....	31

2.2.4.1	Scherrheologie – Frequency Sweep.....	32
2.2.4.2	Schmelze-Massefließrate (MFR).....	34
2.2.5	Mechanische Prüfungen .....	35
2.2.5.1	Zugversuch.....	36
2.2.5.2	Schlagzugversuch .....	39
3	Ergebnisse .....	41
3.1	Ergebnisse Sortierung.....	41
3.1.1	PP Flakes .....	43
3.1.2	PS Flakes .....	45
3.2	Ergebnisse thermische Analyse (DSC).....	46
3.3	Ergebnisse rheologische Analyse .....	47
3.3.1	Becher.....	47
3.3.1.1	MFR .....	47
3.3.1.2	Frequency-Sweep.....	51
3.3.2	Duschgelflasche .....	62
3.3.2.1	MFR .....	62
3.3.2.2	Frequency-Sweep.....	63
3.4	Ergebnisse mechanische Prüfung .....	64
3.4.1	Becher.....	65
3.4.1.1	Zugversuch.....	65
3.4.1.2	Schlagzugversuch .....	71
3.4.2	Duschgelflasche .....	74
3.4.2.1	Zugversuch.....	75
3.4.2.2	Schlagzugversuch .....	75
4	Zusammenfassung und Ausblick .....	76
5	Anhang.....	79
5.1	Messergebnisse Bechermaterialien.....	79
5.2	Messergebnisse Duschgelflasche .....	84
5.3	Fotos .....	85
6	Literaturverzeichnis .....	94
7	Abbildungsverzeichnis.....	97
8	Formelverzeichnis.....	101
9	Tabellenverzeichnis .....	102

## Abkürzungsverzeichnis

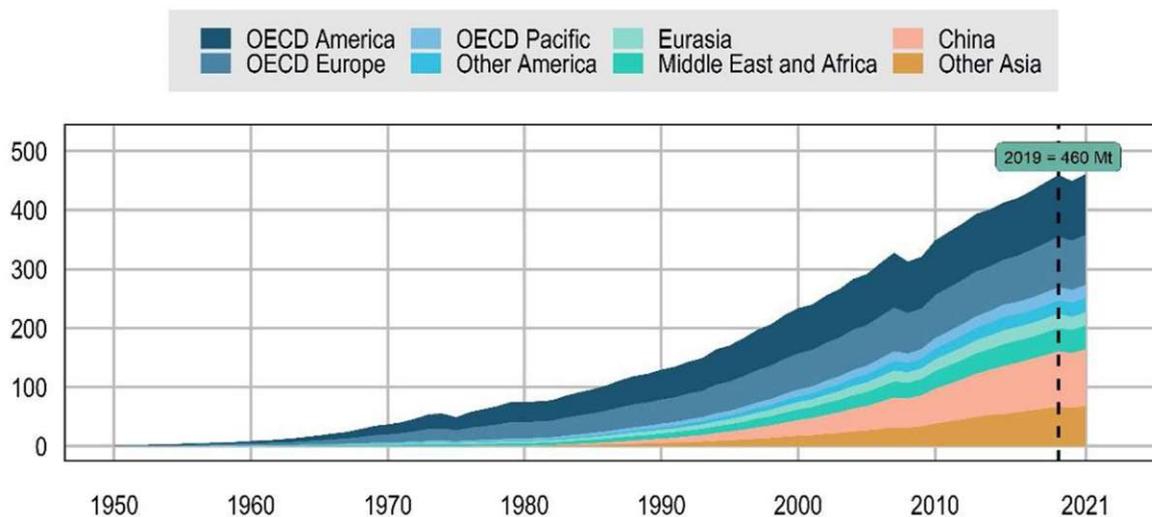
COP	Cross-Over-Point
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie, engl. differential scanning calorimetry
$E_t$	Elastizitätsmodul
EU	Europäischen Union
HDPE	Polyethylen mit hoher Dichte (PE-HD), engl. High-density polyethylen
LDPE	Polyethylen mit niedriger Dichte (PE-LD), engl. Low-density polyethylen
$G_{COP}$	Speicher- und Verlustmodul bei COP
MFR	Schmelze-Massefließrate, engl. melt mass-flow rate
NaOH	Natronlauge
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, engl. Organisation for Economic Co-operation and Development
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PS-E	Expandiertes Polystyrol
PS-HI	High impact Polystyrol
RGR	Regranulat
SZ	Schlagzugversuch
spg	Spritzguss
tgz	Tiefziehen
$T_g$	Glasübergangstemperatur
$T_m$	Kristallitschmelztemperatur oder Schmelztemperatur
ZV	Zugversuch

# 1 Einleitung

Kunststoffe sind aus dem modernen Alltag nicht mehr wegzudenken. Sie erweisen sich in den verschiedensten Anwendungsgebieten als äußerst nützlich, wie beispielsweise bei der Konservierung von Nahrungsmitteln oder bei der Erhöhung der Energieeffizienz von Fahrzeugen. Ihre breiten Anwendungsbereiche ergeben sich aus dem Umstand, dass sich ihr Aufbau und somit ihre Eigenschaften stark beeinflussen lassen. [2] Ihr unsachgemäßer Umgang hat jedoch gravierende Folgen für die Umwelt. Achtlos zurückgelassene oder unsachgemäß entsorgte Kunststoffe verschmutzen Landschaften, Meere und Flüsse. Sie stellen Gefahren für Lebewesen dar, sei es durch die direkte Aufnahme von Plastikpartikeln oder durch die schleichende Akkumulation toxischer Substanzen in der Nahrungskette. Neben ökologischen Auswirkungen führt die steigende Produktion und Entsorgung von Kunststoffen auch zu einem hohen Ressourcenverbrauch, der im Widerspruch zu den Prinzipien einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft steht.

Die globale Kunststoffproduktion hat sich von 2000 bis 2019 nahezu verdoppelt, während das Aufkommen von Kunststoffabfällen in diesem Zeitraum noch schneller angestiegen ist. Zwei Drittel der hergestellten Produkte besitzen dabei eine Gebrauchsdauer von weniger als fünf Jahren. Von den entstandenen Abfällen werden jedoch lediglich 9 % recycelt. [3]

Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der jährlichen Produktionszahlen im Verlauf der letzten Jahrzehnte.



**Abbildung 1:** Entwicklung der weltweiten Kunststoffproduktion [in Megatonnen (Mt)] [3]

Wie anhand der Grafik zu sehen ist, zeichnet sich kein Rückgang in den jährlichen Produktionsmengen ab. Daher ist es erforderlich, die Wieder- oder Weiterverwendbarkeit der hergestellten Produkte und Komponenten gezielt zu optimieren und weiterzuentwickeln. Im letzten Jahrzehnt (2010 - 2021) entfielen etwa 40% der EU-weit erzeugten Kunststoffmenge auf Verpackungsmaterialien. [4]

Um einerseits die Abfallvermeidung zu erhöhen und andererseits die Kreislaufwirtschaft zu fördern, wurden durch die Politik zunehmend Maßnahmen ergriffen. An der Spitze dieser Anstrengungen steht die Verordnung (EU) 2025/40 über Verpackungen und Verpackungsabfälle der Europäischen Union, welche am 22.01.2025 veröffentlicht wurde und deren übergeordnetes Ziel die Abfallvermeidung sowie die Förderung der Kreislaufwirtschaft ist.

Die Verordnung legt fest, dass ab 2030 alle Verpackungen recyclingfähig sein müssen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass Sekundärrohstoffe in ausreichender Qualität vorliegen, um Primärrohstoffe bei der Erzeugung neuer Produkte substituieren zu können. Zur Bewertung der Recyclingfähigkeit werden *Design for Recycling Guidelines* erstellt, die von der Europäischen Kommission bis 2028 publiziert werden. In weiterer Folge müssen ab 2035 Verpackungen im großen Maßstab recycelt werden (*Recycled at Scale*). Das bedeutet, dass die theoretische Recyclingfähigkeit in die Realität umgesetzt werden muss, und Stoffströme überwacht werden. Wird ab diesem Zeitpunkt eine Recyclingfähigkeit unter 70 % erreicht, wird das Inverkehrbringen der Verpackung beschränkt, da sie mit dieser Leistungsstufe als „technisch nicht recyclingfähig“ gilt.

Eine weitere wesentliche Maßnahme der Verordnung stellt die Einfuhr von Mindestrezyklatanteilen in Kunststoffverpackungen dar. Durch diesen Markteingriff forciert die EU die Nutzung von Rezyklaten für die Herstellung neuer Produkte und Komponenten. Für kontaktempfindliche Kunststoffverpackungen, mit der Ausnahme von PET, ist ab 2030 ein Mindestprozentsatz von 10 % Rezyklatanteil, der aus der Verwertung von Post-Consumer Kunststoffabfällen gewonnen wurde, vorgeschrieben. Ab dem Jahr 2040 gelten für diese Kategorie mindestens 25 % Rezyklatanteil. [4]

Im Laufe der nächsten Jahre ist durch EU-Vorgaben mit einer Vervielfachung der Nachfrage an hochwertigen Rezyklaten zu rechnen. Um Kunststoffverpackungen als Sekundärrohstoffe gewinnen zu können und damit der Kreislaufwirtschaft zuzuführen, müssen diese recycelt werden. Dabei wird zwischen mechanischem und chemischem Recycling unterschieden, wobei das mechanische Recycling die dominierende Methode zur Wiederverwertung von Kunststoffen darstellt. Um recyceltes Material auch in hochwertigen Verpackungen einzusetzen, ist die Qualität des Rezyklats von Bedeutung. Sortierung, Vorbehandlung und Reinigung sind wesentliche Faktoren zur Verbesserung der Qualität von recyceltem Kunststoff. Ebenso muss die Möglichkeit der Trennbarkeit der Materialien gegeben sein, um eine sortenreine Trennung zu ermöglichen, was es bereits in der Produktentwicklung zu berücksichtigen gilt.

Die Sammlung von Post-Consumer Kunststoffabfällen, insbesondere aus Haushalten, ist mit hohen Kosten verbunden, verursacht durch aufwendige Logistik und substanziellen Anteilen an Verunreinigungen. [3]

Diese Arbeit untersucht die Einflüsse von Waschparametern und makromolekularen Kontaminationen auf die mechanischen und rheologischen Eigenschaften von Post-Consumer Verpackungen, welche aus Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS) hergestellt wurden. Weiters wird die Auswirkung einer nicht sortenreinen Trennung anhand der beiden Kunststoffe PP und High-Density Polyethylen (HDPE oder PE-HD) untersucht.

Zielsetzung dieser Arbeit ist es ein umfassenderes Verständnis für die Einflüsse von Waschparametern und Kontaminationen zu gewinnen, um Optimierungsmöglichkeiten für Recyclingprozesse zu erkunden und somit zur Erreichung der rechtlichen Auflagen für Kunststoffzyklate aus Verpackungen beizutragen.

## 1.1 Kunststoffe

Kunststoffe zählen zur Klasse der organischen Werkstoffe und bestehen vorherrschend aus Kohlenwasserstoffen. Im Vergleich zu Metallen und Keramiken sind Kunststoffe relativ junge Werkstoffe. Ihre Eigenschaften unterscheiden sich wesentlich von denen der Metalle. Aufgrund ihres Eigenschaftenprofils haben sie in verschiedenen Anwendungsbereichen diverse klassische Werkstoffe, wie Metall, Keramik und Holz, ersetzt. So beispielsweise im Fahrzeugbau oder Bauwesen. Sie zeichnen sich besonders durch die Kombination der Eigenschaften Korrosionsbeständigkeit, geringe Dichte und kostengünstige Herstellung von Bauteilen aus. Ein sehr wichtiger Unterschied im Vergleich zu Metallen ist ihr temperatur- und zeitabhängiges Verhalten. Diese Eigenschaften werden im experimentellen Teil dieser Arbeit genauer behandelt. Kunststoffe werden auch als Polymere (poly = viel und mer = Teil) bezeichnet. Sie bestehen aus vielen chemisch miteinander verbundenen Einzelbausteinen, den Monomeren. Kunststoffe oder Polymere entstehen über eine chemische Reaktion vom Monomer zum Polymer, der so genannten Polymerisation. [5]

Polymere werden in Thermoplaste, Duromere und Elastomere unterteilt. Welchem dieser Gruppen ein Polymer zuzuordnen ist, hängt von ihrem molekularen Aufbau ab. Es wird dabei zwischen unvernetzten (Thermoplaste) und vernetzten Polymeren (Duromere und Elastomere) unterschieden. In Abbildung 2 wird diese Unterteilung der verschiedenen Kunststoffe veranschaulicht. Des Weiteren enthält sie die in dieser Arbeit untersuchten Kunststoffsorten Polyethylen (PE), PP und PS, sowie deren Klassifizierung.

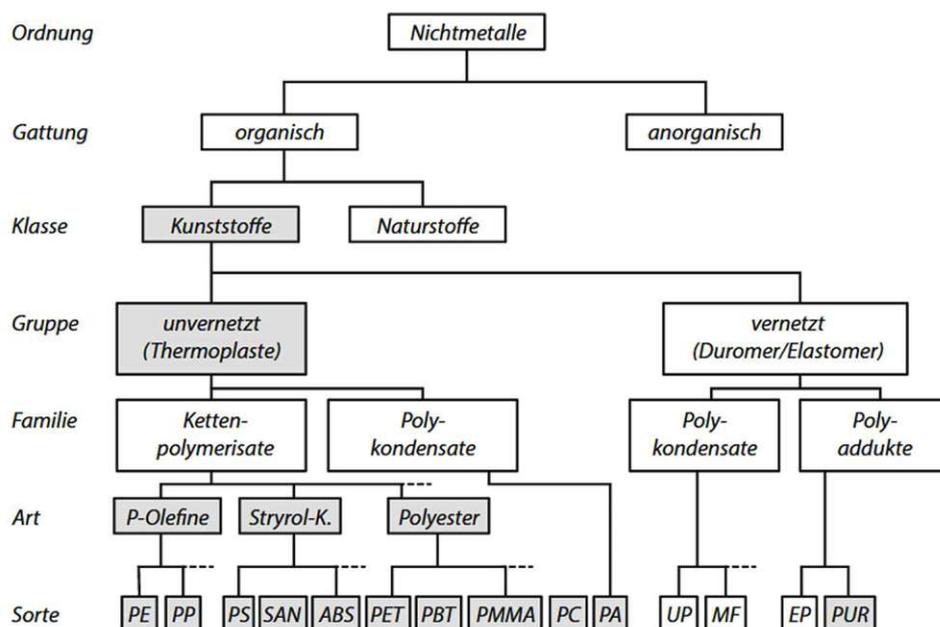
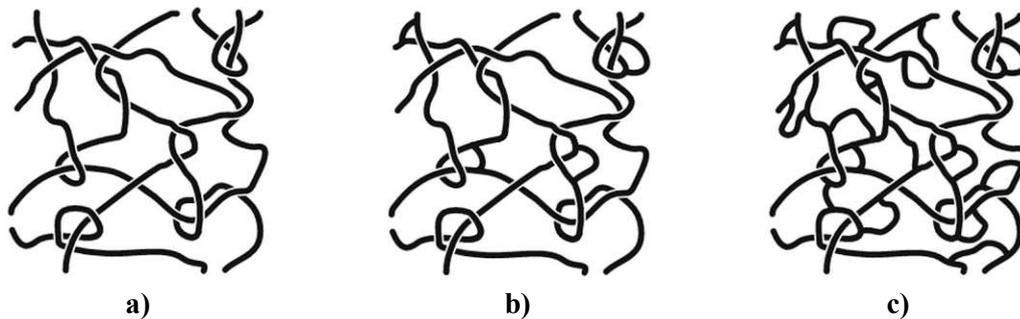


Abbildung 2: Sortierung der Kunststoffe in Familien und Arten [5]

Abbildung 3 demonstriert die unterschiedlichen Molekülstrukturen. Während die Makromoleküle von Thermoplasten kettenartig aufgebaut und nicht miteinander chemisch verbunden sind, ist der Aufbau der Duromere und Elastomere netzartig. Das bedeutet, dass auch zwischen den einzelnen Molekülen chemische Verbindungen vorhanden sind, was die Eigenschaften wesentlich beeinflusst. [5]



**Abbildung 3:** Schematische Darstellung der Vernetzung unterschiedlicher Polymere: a) Thermoplast: die Molekülketten sind unvernetzt, b) Elastomer: Zwischen den Molekülketten existieren wenige Vernetzungsstellen, c) Duromer: Die Molekülketten sind an vielen Stellen vernetzt [2]

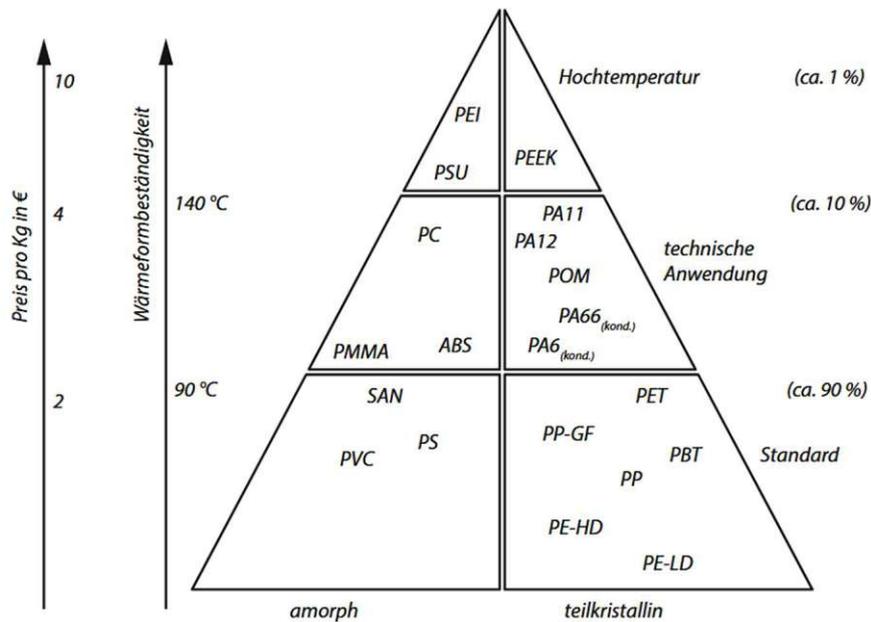
In dieser Arbeit wurden Polymere, welche der Gruppe der Thermoplaste zugeordnet sind, verwendet. In weiterer Folge wird daher nur auf diese Gruppe näher eingegangen.

Metalle und Keramiken können im Vergleich zu Polymeren eine vollständig kristalline Struktur aufweisen. Statistisch gesehen ist dies bei Polymeren jedoch sehr unwahrscheinlich, da ihre Molekülketten sehr lang sind. Bei der Abkühlung aus dem flüssigen Zustand liegen sie daher in der Regel nicht in linearer oder gefalteter Form vor. Stattdessen verknäulen sie sich zu sogenannten amorphen Strukturen, die keine Fernordnung aufweisen. Fernordnung bezeichnet dabei eine über die nächsten Nachbarn der Molekülkette hinausgehende Ordnung hinsichtlich Orientierung, Anordnung und Abstand. [2], [6] Elastomere und Duromere liegen im Vergleich zu Thermoplasten ausschließlich im vollkommen amorphen Zustand vor, da die chemischen Verbindungen zwischen den Ketten die Bildung kristalliner Bereiche verhindern. In diesem Zustand sind homogene Kunststoffe ohne Farb- und Füllstoffe durchsichtig. Bei Thermoplasten kann es jedoch in Abhängigkeit des molekularen Aufbaus zur Bildung kristalliner Bereiche kommen. In diesen richten sich die Molekülketten regelmäßig aus, und man spricht von teilkristallinen Thermoplasten. Abbildung 4 gibt eine Übersicht wichtiger Kunststoffe, welche entsprechend ihrer Struktur aufgeteilt sind.

Thermoplaste können somit eine amorphe oder teilkristalline Struktur aufweisen. Zwischen den teilkristallinen Phasen befinden sich amorphe Phasen. Kunststoffe, welche rein amorph sind, haben eine sogenannte Glasübergangstemperatur  $T_g$ . Kunststoffe mit kristallinen Bereichen besitzen darüber hinaus eine Kristallitschmelztemperatur  $T_m$ . Der Volumenanteil der kristallinen Bereiche wird als Kristallinität bezeichnet und hat einen starken Einfluss auf die Eigenschaften des Polymers. [2],[5]

Neben der Einteilung in Abhängigkeit ihrer Struktur ist bei Verwendung als Konstruktionswerkstoff eine Klassifizierung über die Wärmebeständigkeit sinnvoll. So ist für die Werkstoffauswahl die Dauergebrauchstemperatur von besonderer Bedeutung. Die Wärmebeständigkeit hat einen wesentlichen Einfluss auf den Preis pro Kilogramm, wie in Abbildung 4 ersichtlich. Die Abbildung gibt weiters einen Überblick zu einigen wichtigen

Kunststoffen und ihrer Wärmeformbeständigkeit. Die überwiegende Zahl der Kunststoffe wird jedoch von Standardkunststoffen gebildet, welche in einem Temperaturbereich und 100 °C eingesetzt werden. Sie werden beispielsweise für Verpackungen verwendet, die keine hohe Dauergebrauchstemperatur erfordern.



**Abbildung 4:** Übersicht wichtiger amorpher und teilkristalliner Kunststoffe entsprechend des Temperatureinsatzes [5]

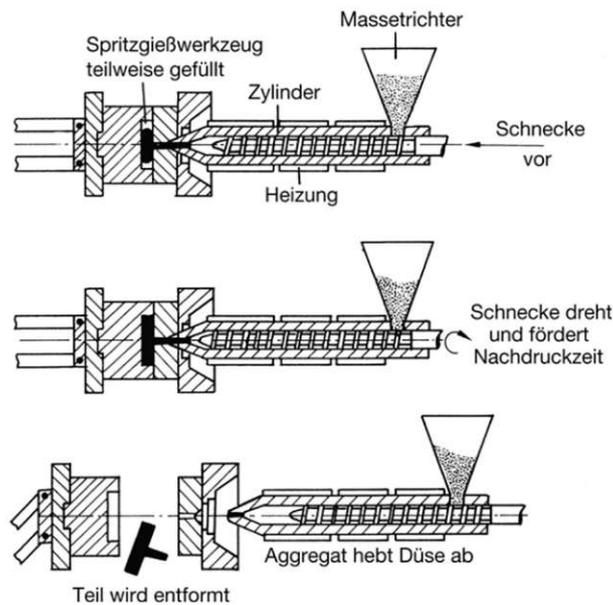
Die Eigenschaften von Kunststoffen lassen sich durch die Zugabe von Füllstoffen vielseitig verändern. Neben diesen haben auch die Kettenlängen starken Einfluss auf ihre Eigenschaften und beeinflussen die Verarbeitungseigenschaften im flüssigen Zustand. Zur Charakterisierung dient das mittlere Molekulargewicht und die Molekulargewichtsverteilung. Das Molekulargewicht ist ein Maß für die Länge der Molekülketten, wobei Kunststoffe mit niedrigem Molekulargewicht leichter fließen und dadurch für Spritzgussanwendungen besser geeignet sind. Hochmolekulare Kunststoffe eignen sich hingegen für Extrusionsprozesse. Die Molekulargewichtsverteilung gibt an, wie stark sich die Längen der Moleküle unterscheiden. Sind die Moleküle Großteils gleich lang, liegt ein Werkstoff mit einer engen Molekulargewichtsverteilung vor. Unterscheiden sich die Längen jedoch stärker, wird von einer breiten Verteilung gesprochen, und der Kunststoff weist bessere Fließeigenschaften auf. [5]

### 1.1.1 Verarbeitung von Thermoplasten

Amorphe und teilkristalline Thermoplaste werden im Fließbereich hergestellt. Die beiden wichtigsten Urformverfahren sind das Spritzgießen und das Extrudieren, [6] die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Ergänzend dazu werden das Extrusionsblasformen, eine spezielle Form des Extrudierens, und das Tiefziehverfahren betrachtet, welches ein Umformfahren darstellt. Die beiden zusätzlichen Verfahren sind für diese Arbeit von Relevanz, da ein Teil der untersuchten Materialien damit hergestellt wurde.

### 1.1.1.1 Spritzgießen

Mit dem Verfahren des Spritzgießens lassen sich komplexe und qualitativ hochwertige Formteile herstellen. Der zu verarbeitende Kunststoff wird üblicherweise in Form von Granulat oder Pulver durch Rotation einer Schnecke plastifiziert. Durch die entstehende Reibung und eine zusätzliche Heizung wird das Material erhitzt. In weiterer Folge wird das Material durch einen axialen Vorschub der Schnecke in das geschlossene Werkzeug gepresst, wodurch die Kavität gefüllt wird. Anschließend kühlen thermoplastische Formteile im Werkzeug ab. Im Gegensatz dazu vulkanisieren/vernetzen Elastomere und Duromere im beheizten Werkzeug. Der schematische Verfahrensablauf ist in Abbildung 5 veranschaulicht. [6]



**Abbildung 5:** Schematische Darstellung des Spritzgießverfahrens [7]

Während bei amorphen Thermoplasten die Werkzeugtemperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur liegen, befindet sie sich bei teilkristallinen Thermoplasten oberhalb der Glasübergangstemperatur und unterhalb der Kristallitschmelztemperatur. [7]

### 1.1.1.2 Extrusion

Der Aufbau eines Extruders ähnelt dem einer Schneckenspritzgießmaschine. Im Gegensatz dazu wird die Schnecke jedoch nicht axial verschoben und als Kolben zum Einspritzen des zu verarbeitenden Materials verwendet. Die Schnecke rotiert lediglich um ihre Achse. Dadurch fördert und verdichtet sie das aufschmelzende Material kontinuierlich. Durch die Förderschnecke wird das Material vermischt und homogenisiert. Der Extruder wird in verschiedene Bereiche unterteilt: Einzugszone, Umwandlungszone, Ausstoßzone und Bereich des Formwerkzeugs. [6]

Abbildung 6 zeigt das Schnittbild des prinzipiellen Aufbaus eines Einschneckenextruders mit seinen Funktionszonen.

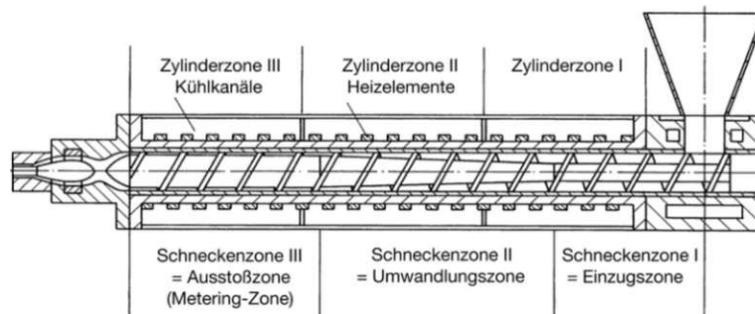


Abbildung 6: Schnittbild eines Einschneckenextruders [7]

### 1.1.1.3 Extrusionsblasformen

Das Extrusionsblasformen oder Hohlkörperblasen ist ein ergänzendes Verfahren zum Extrudieren, welches zur Herstellung von Hohlkörpern ohne Kern, wie Flaschen oder Kanister, genutzt wird. [7] Es laufen bei diesem Verfahren zwei Prozesse parallel ab. So wird kontinuierlich ein Vorformling extrudiert, und zyklisch wird der Vorformling übernommen und durch Druckluft im Werkzeug in Form geblasen. [6]

Abbildung 7 zeigt eine vereinfachte schematische Darstellung von dem Verfahrensablauf.

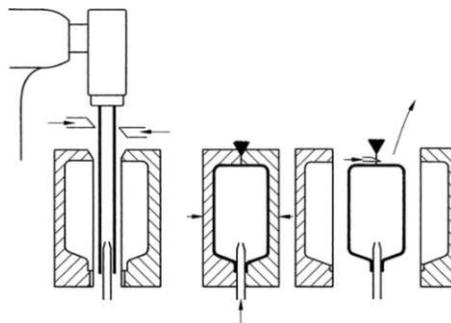


Abbildung 7: Schematische Darstellung Extrusionsblasformen [7]

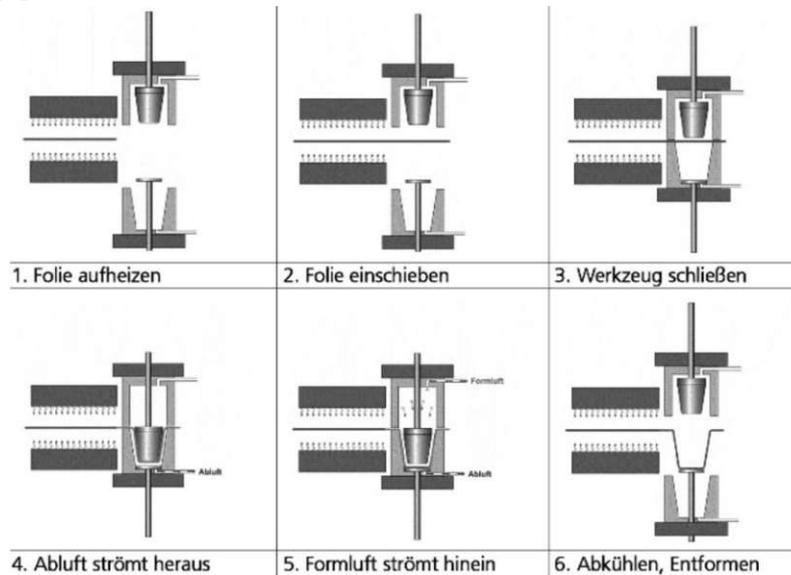
### 1.1.1.4 Tiefziehen (Thermoformen)

Das Tiefziehen (auch Thermoformen genannt) ist eine häufige Alternative zum Spritzgießen, wobei es sich um ein Umformverfahren und nicht um ein Urformverfahren handelt. Dabei wird das Material, eine Folie oder Platte, zunächst bis zur Verformbarkeit erwärmt. Anschließend wird der Werkstoff mit geringem Kraftaufwand im Werkzeug in Form gebracht, wo es abkühlt. Die Formgebung erfolgt überwiegend in einer Werkzeughälfte, wodurch nur eine einseitige Konturprägung möglich ist, was aber den Vorteil mit sich bringt, dass nur eine Werkzeughälfte hergestellt werden muss. Die unterschiedlichen Verfahren lassen sich in folgende Varianten unterteilen:

- Positiv
- Negativ
- Druckluft
- Vakuum
- Plattenautomaten
- Rollenautomaten
- Kaschieren

In Abbildung 8 ist zur Veranschaulichung des Verfahrensprinzips beispielhaft ein Negativ-Druckluftformverfahren beschrieben. Bei dem Verfahren wird die erwärmte Folie in das Werkzeug eingeschoben. Anschließend schließt das Werkzeug, wobei der Formstempel in das Werkzeug eintaucht. Die Abluft strömt aus, und die Formluft strömt ein. Dabei dient die

Formluft dazu, die Folie vom Stempel zu lösen und zur Formgebung gegen die Werkzeugwand zu drücken. In weiterer Folge kühlt das Werkstück aus, bevor es zur weiteren Bearbeitung entformt wird. [8]



**Abbildung 8:** Schematische Darstellung der Verfahrensschritte einer Negativ-Druckluftformung [8]

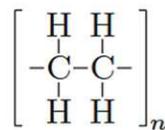
### 1.1.2 Wichtige Thermoplaste

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Kunststoffe vorgestellt, welche alle zur Familie der Kettenpolymerisate gehören und eine große Relevanz für Verpackungskunststoffe haben.

#### 1.1.2.1 Polyethylen (PE)

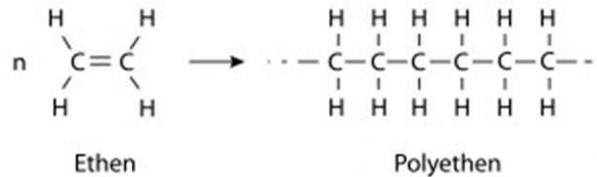
Polyethylen (PE) gehört zur Kunststoffart der Polyolefine (siehe Abbildung 2) und zählt zu den Massenkunststoffen. [7] Mengenmäßig ist Polyethylen der am häufigsten eingesetzte Kunststoff. Werden alle PE-Typen kombiniert, hatte PE im Jahr 2022 einen Anteil von 22,1 % der in Europa produzierten Kunststoffmenge. [10]

Polyethylen hat eine teilkristalline Struktur und ist unpolar. Im ungefärbten Zustand ist es milchig weiß und opak. [7] PE wird aus dem Monomer Ethylen (Ethen) synthetisiert, welches das einfachste Monomer darstellt, aus dem ein Polymer gebildet werden kann. Die Strukturformel von PE ist in Abbildung 9 dargestellt. Der Index n gibt den Polymersiationsgrad an und steht für die Anzahl der sich wiederholenden Einheiten. [2]



**Abbildung 9:** Strukturformel Polyethylen [2]

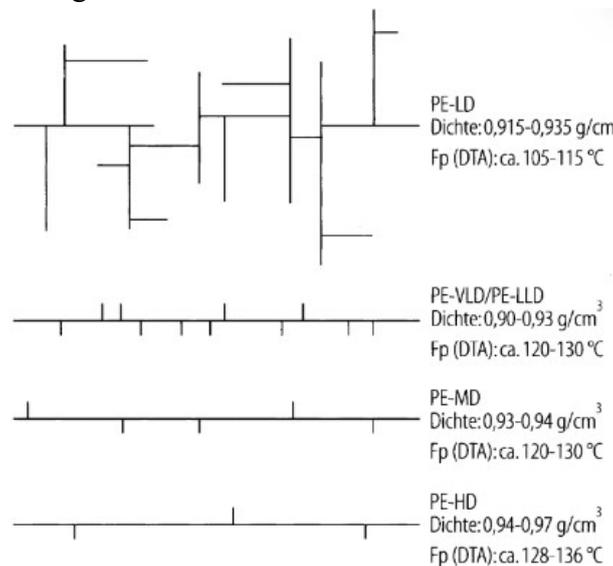
Die Herstellung erfolgt durch Kettenwachstumspolymerisation [9], wobei eine Kette aus Kohlenstoffatomen entsteht, deren freie Bindungen mit Wasserstoff abgesättigt sind. [2] Abbildung 10 zeigt den Prozess der Polymerisation auf vereinfachte Weise.



**Abbildung 10:** Polymerisation von Ethen zu Polyethylen [10]

Bei der Polymerisation entstehen langgestreckte oder verzweigte Ketten, deren Struktur wesentlichen Einfluss auf das Kristallisationsverhalten haben, da das Vorhandensein von Verzweigungen die Kristallisation behindert. Die Entstehung von kristallinen Bereichen hat wiederum wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und die Dichte, welche abhängig vom Herstellungsverfahren im Bereich von  $0,915\text{-}0,97\text{ g/cm}^3$  liegen. Mit dem Kristallisationsgrad steigt auch die Härte und Festigkeit.

Es kann zwischen Niederdruckverfahren zur Herstellung von Polyethylen im hohen Dichtebereich, sogenanntes High-Density Polyethylene (HDPE), und Hochdruckverfahren zur Herstellung von Polyethylen im niedrigen Dichtebereich, sogenanntes Low-Density Polyethylen (LDPE), unterschieden werden. [5] Niederdruckfahren arbeiten mit Drücken in der Größenordnung von 1 bis 50 bar und Temperaturen von 85 bis 180 °C. Im Vergleich dazu wird zur Herstellung von LDPE mit Drücken von 1000 bis 3500 bar und Temperaturen von 80 bis 300 °C gearbeitet. [9] Abhängig vom Herstellungsverfahren und dem strukturellen Aufbau ergibt sich eine Vielzahl an unterschiedlichen PE-Typen. [6] In Abbildung 11 sind die wichtigsten schematisch dargestellt.



**Abbildung 11:** Schematische Darstellung der unterschiedlichen Strukturen und Verzweigungen bei Polyethylen [6]

Alle PE-Typen weisen eine hohe chemische Beständigkeit auf. Verglichen mit anderen Kunststoffen hat PE eine geringe Dichte, eine hohe Zähigkeit und Reißdehnung. [6] Die geringe Dichte macht ihn für Verpackungsanwendungen sehr interessant, da das geringe Gewicht Kostenvorteile mit sich bringt. [5]

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf HDPE und wird im Folgenden näher beschrieben.

### High-Density Polyethylen (HDPE oder PE-HD)

HDPE hat weitestgehend lineare Makromoleküle mit niedrigem Verzweigungsgrad. Dies führt zu einem erhöhten Kristallinitätsgrad von 60 bis 80 %, der eine höhere Dichte und Schmelztemperatur im Vergleich zu LDPE zur Folge hat. Die Dichte von HDPE liegt in der Größenordnung von 0,942-0,965 g/cm<sup>3</sup>. [6] Die Glasübergangstemperatur liegt bei -100 °C und die Kristallitschmelztemperatur im Bereich von 135 °C. [5]

HDPE zeichnet sich durch eine ungewöhnlich hohe Beständigkeit gegenüber Chemikalien aus. [6] Die Hauptanwendungsgebiete für HDPE sind etwa Behälter für den Transport von Flüssigkeiten, Flaschenkästen, Rohre und Folien, während LDPE der wichtigste Thermoplast zur Herstellung von Folien ist. [9], [10]

#### 1.1.2.2 Polypropylen (PP)

So wie PE gehört Polypropylen (PP) zur Kunststoffart der Polyolefine und ist ähnlich weit verbreitet. Im Jahr 2022 hatte PP 15,4 % Anteil an der in Europa produzierten Kunststoffmenge und belegt somit den zweiten Platz der am meisten eingesetzten Kunststoffe. [11]

PP hat ein teilkristallines Gefüge und ist im ungefärbten Zustand schwach transparent bis opak. [7] Der Aufbau ähnelt jenem von HDPE, nur dass PP Molekülketten in regelmäßigen Abständen CH<sub>3</sub>-Moleküle (Methylgruppen) enthalten, wie in der Strukturformel von PE in Abbildung 12 zu sehen ist. [5]

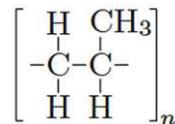


Abbildung 12: Strukturformel Polypropylen [2]

Die Eigenschaften von PP sind stark von der Herstellung, der molekularen Struktur und der Vorgeschichte hinsichtlich thermischer und mechanischer Beanspruchung abhängig. [5] Der Prozess der Polymerisation ist in Abbildung 13 vereinfacht dargestellt.

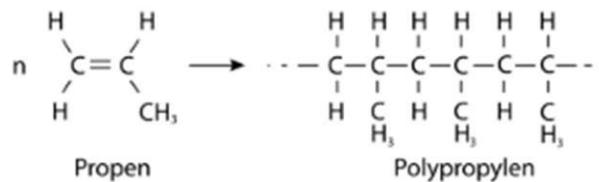
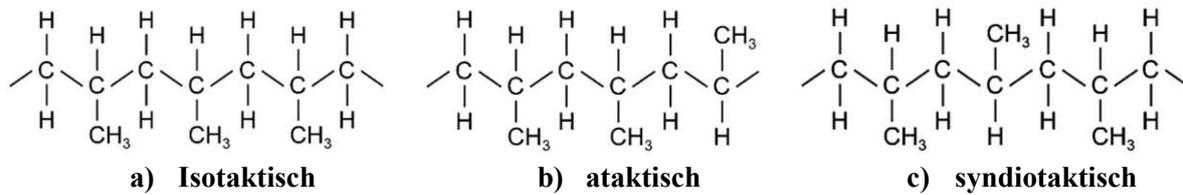


Abbildung 13: Polymerisation von Propen zu Polypropylen [10]

Das technisch bedeutendste PP ist derzeit das mit stereospezifischen Katalysatoren nach Ziegler/Natta gewonnene isotaktische Polypropylen. [8] Durch die Anordnung der CH<sub>3</sub>-Seitenmoleküle ergibt sich im Vergleich zu PE eine geringe Dichte in der Größenordnung von 0,9 bis 0,915 g/cm<sup>3</sup>, die ebenfalls einen Zusammenhang mit dem Kristallisationsgrad aufweist. Dieser erreicht Größenordnungen von 40 und 80 %. [7] Die Kristallisationsfähigkeit und der Kristallisationsgrad werden stark durch die Taktizität der Molekülkette bestimmt. Die Methylgruppen können neben der isotaktischen Konfigurationen auch syndiotaktisch oder ataktischen vorliegen. Dies bedeutet, dass die CH<sub>3</sub>-Gruppen in einer unterschiedlichen

Reihenfolge angeordnet sein können. Abbildung 14 gibt einen Überblick zu den verschiedenen möglichen Konfigurationstypen.



**Abbildung 14:** Taktizität von Polypropylen: a) alle CH<sub>3</sub>-Gruppen sind auf derselben Seite angeordnet, b) die CH<sub>3</sub>-Gruppen sind regellos angeordnet, c) die CH<sub>3</sub>-Gruppen befinden sich abwechselnd auf verschiedenen Seiten der Kohlenstoffkette [8]

Die Glasübergangstemperatur liegt bei 10 °C und die Kristallitschmelztemperatur im Bereich von 160 °C. Durch die höhere Glasübergangstemperatur ist PP im Vergleich zu PE steifer, hat eine höhere Härte und Festigkeit, jedoch eine geringere Kerbschlagzähigkeit. [7] Aus der hohen Schmelztemperatur ergibt sich für PP ein höherer Dauereinsatzbereich von bis zu 100 °C. Ähnlich wie PE weist PP eine gute Beständigkeit gegenüber Chemikalien auf. [5]

PP ist sehr gut für Spritzgießanwendungen geeignet. Durch die breit einstellbaren Eigenschaften ergeben sich zahlreiche Einsatzbereiche, wobei die Verwendung für Verpackungen und Verschlüsse aller Art am weitesten verbreitet ist. [6], [7]

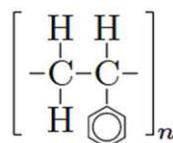
### 1.1.2.3 Polystyrol (PS)

Polystyrol (PS) gehört zu der Kunststoffart der Styrol-Polymerisate. Diese zählen wie die Polyolefine zu den Massenkunststoffen. [7] Im Jahr 2022 hatte Polystyrol einen Anteil von 5,4 % an der in Europa produzierten Kunststoffmenge. [11]

Polystyrol hat eine amorphe Struktur und ist glasklar. Seine Dichte liegt in der Größenordnung von 1,05 g/cm<sup>3</sup>. Es sinkt also in Wasser. Die Glasübergangstemperatur liegt bei 90 °C, wodurch Polystyrol sehr spröde ist. Da PS eine amorphe Struktur besitzt, hat es keine Schmelztemperatur. [5] PS ist hart, sowie sehr schlag- und kerbempfindlich. [7]

Wie bei anderen Kunststoffen, existieren verschiedene Modifikationen zur zielgerichteten Optimierung der Eigenschaften. So kann beispielsweise die Schlagzähigkeit durch Zugabe von Kautschukpartikeln erhöht werden, wodurch der Werkstoff seine Transparenz verliert. Dadurch entsteht sogenanntes schlagzähmodifiziertes PS (PS-HI, high impact). Eine weitere verbreitete Modifikation ist expandiertes PS (PS-E), welches unter dem Markennamen Styropor bekannt ist. Im Vergleich zu PE und PP hat PS eine schlechtere Chemikalienbeständigkeit. [5]

Im Aufbau ähnelt PS ebenfalls PE, nur dass ein Wasserstoffatom durch einen Benzolring ersetzt wird. [2] Die Strukturformel von PS ist in Abbildung 15 dargestellt.



**Abbildung 15:** Strukturformel Polystyrol [2]

Die Herstellung von Polystyrol basiert auf den Grundchemikalien Benzol und Ethen, aus welchen Ethylbenzol hergestellt wird. Dieses wird zu Styrol dehydriert. Aus dem gewonnenen Styrol wird in weiterer Folge durch den Prozess der Polymerisation Polystyrol. Der Prozess der Polymerisation ist in Abbildung 16 vereinfacht dargestellt.

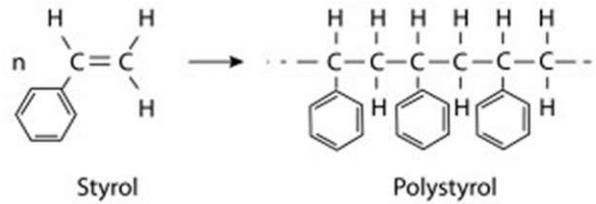


Abbildung 16: Polymerisation von Styrol zu Polystyrol [10]

Die Verteilung der Benzolringe ist beim technischen Polystyrol ataktisch. Das bedeutet, dass die Anordnung unregelmäßig ist. Die von der Hauptkette des Polymers abstehenden Ringe sind sperrig, wodurch keine Kristallisation stattfindet. [8]

Bei der Abkühlung weist PS eine geringe Schwindung auf und ist gut für maßhaltige Bauteile geeignet. [5] Zur Verarbeitung sind Spritzgießen, Extrudieren und Thermoformen die wichtigsten Verarbeitungsverfahren. [9] PS besitzt vielfältige Anwendungen, wie beispielsweise im Verpackungsbereich für Klarsichtverpackungen, Becher, Flaschen oder im Haushalt für Eierbecher und Kühlschranksinnenteile.

## 1.2 Recycling von Kunststoffen

Im Jahr 2022 wurden in Europa 19,7 % der Kunststoffproduktion aus zirkulärem Material hergestellt. Davon wurden 13,2 % Post-Consumer und 5,4 % Pre-Consumer Material mechanisch recycelt. Lediglich 0,1 % stammten von chemischem Recycling. [11]

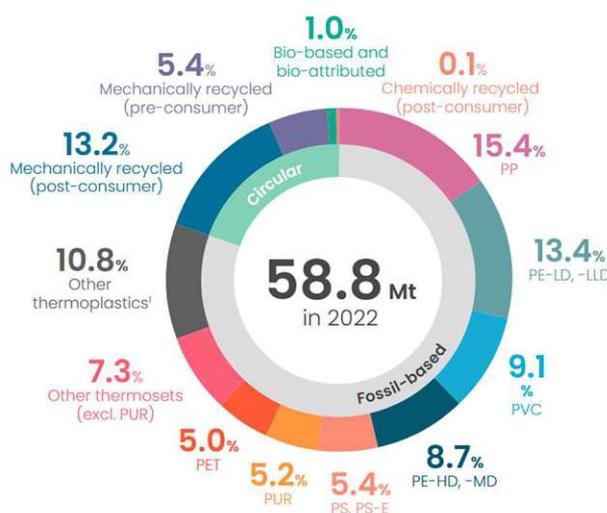


Abbildung 17: Zusammensetzung der Kunststoffproduktion innerhalb der EU (2022) [11]

Recycling von Kunststoffen kann auf verschiedene Arten erfolgen, was einerseits von der Abfallzusammensetzung und andererseits von der ursprünglichen Materialverwendung

abhängt. Es kann dabei in mechanisches, chemisches und lösungsmittelbasiertes Recycling unterteilt werden. Alternativ dazu kann das Material energetisch verwertet werden.

Mechanisches Recycling ist das am weitesten verbreitete Verfahren zum Recycling von Kunststoffabfällen. Dabei werden diese aufbereitet, indem sie gesammelt, sortiert, gewaschen, zerkleinert und anschließend zu Flakes oder Regranulaten verarbeitet werden. [12] Ein wesentlicher Schritt ist die Reinigung, bei der organische und anorganische Verunreinigungen entfernt werden. Trotz seiner Vorteile gibt es beim mechanischen Recycling auch Herausforderungen. Ein wesentliches Problem ist die thermo-mechanische Degradation der Polymere während der Verarbeitung. Durch die Kombination von Hitze und Scherbeanspruchung im Extruder kommt es zu Kettenspaltungen, die zu einer Abnahme der Molmasse und damit zu Verschlechterungen der mechanischen und rheologischen Eigenschaften führen. Eine bereits im Produktlebenszyklus entstandene Alterung, wie beispielsweise durch UV-Strahlung, kann die Materialqualität zusätzlich beeinträchtigen. [12] Die notwendige Geruchsentfernung ist ebenso eine Hürde, um eine breitere Marktakzeptanz von Rezyklaten zu erreichen. Mit diesem Thema setzt sich die Arbeit [13] im Detail auseinander. Eine weitere Herausforderung des mechanischen Recyclings von gemischten Kunststoffabfällen sind die unterschiedlichen Schmelzpunkte und Verarbeitungstemperaturen der einzelnen Polymere innerhalb der Mischung. Bei der Wiederverarbeitung solcher Mischungen ist der Recycler häufig gezwungen die Verarbeitungstemperatur an die Komponente mit dem höchsten Schmelzpunkt anzupassen. Dies führt häufig zu einer Überhitzung und Degradation von Komponenten mit niedrigeren Schmelzpunkten, was wiederum die Endprodukteigenschaften mindert.

Chemisches Recycling stellt eine ergänzende und wachsende Lösung zum mechanischen Recycling dar und ermöglicht theoretisch den vollständigen Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft. [11] Dabei werden Polymerabfälle in ihre chemischen Grundbausteine zerlegt, die anschließend wieder als Rohstoffe für die Herstellung neuer Kunststoffe oder anderer Produkte genutzt werden können. Chemisches Recycling gewinnt zwar an Bedeutung, nimmt am Gesamtmarkt jedoch noch eine untergeordnete Rolle ein. Die dominierende Technologie stellt dabei die Pyrolyse dar. [12], [14], [15]

Eine umfassende Übersicht aktueller Ansätze zum Recycling von Polymeren durch mechanisches und chemisches Recycling liefert die Arbeit [12]. Wenn diese Recyclingoptionen nicht anwendbar sind, stellt die energetische Verwertung durch Verbrennung eine weitere Möglichkeit zur Verwertung dar. [12]

## 2 Materialien und Methoden

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick zu den untersuchten Materialien gegeben. In weiterer Folge werden die verwendeten Methoden zur Materialaufbereitung und Probenherstellung beschrieben. Abschließend werden die Methoden zur Analyse und Prüfung vorgestellt. Diese setzen sich aus einer thermischen Analyse mittels Dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC), einer rheologischen Analyse mit Scherrheologie (Frequency Sweep) und Schmelze-Massefließrate (MFR), sowie der mechanischen Prüfungen mittels Zugversuch und Schlagzugversuch zusammen.

### 2.1 Materialien

Im experimentellen Teil dieser Arbeit wurden drei verschiedene thermoplastische Kunststoffe untersucht, die entsprechend ihren Anwendungsfällen in zwei Gruppen gegliedert sind. Diese werden als Gruppe der „Bechermaterialien“ und Gruppe der „Duschgefäßflasche“ bezeichnet. Die Materialien der beiden Gruppen werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

#### 2.1.1 Becher

Die Gruppe der Becher setzt sich aus unterschiedlichen Post-Consumer Bechern aus den Materialien Polypropylen und Polystyrol zusammen, wobei die verschiedenen Materialien in unterschiedlichen Ausgangsformen vorlagen. Diese können in zwei Untergruppen gegliedert werden:

- 1) PP- und PS Flakes aus zerkleinerten Post-Consumer Bechern:  
Diese wurden, zur Untersuchung der Einflüsse von Waschparametern und makromolekularen Kontaminationen auf die Materialeigenschaften, unterschiedlichen Waschbehandlungen unterzogen, welche nachfolgend beschrieben sind.
- 2) Drei Referenzmaterialien aus industrieller Aufbereitung, welche zur Erzeugung von Vergleichswerten für die PP- und PS Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen dienen:
  - a. Vollständige Becher aus recyceltem Post-Consumer PP von der Fa. Greiner;
  - b. Post-Consumer PS in Form von Flakes von der Fa. Viscotec;
  - c. Post-Consumer PS Regranulat (RGR), ebenfalls von der Fa. Viscotec, welches einer Vakuumbehandlung im Zuge der Aufbereitung unterzogen wurde.

Tabelle 1 gibt einen Überblick zu allen Ausgangsmaterialien in der Gruppe „Becher“, die nachfolgend noch näher beschrieben werden. Zusätzlich ist in der Tabelle der primäre Untersuchungsgegenstand für diese Arbeit angeführt. Einerseits die Analyse der Auswirkungen verschiedener Waschprozeduren, andererseits die Nutzung als Referenzmaterial zu den gewaschenen Flakes.

**Tabelle 1:** Übersicht der untersuchten Post-Consumer Bechermaterialien

Material	Materialtyp	Probenform	Hersteller	Gegenstand der Untersuchung
PP	tiefgezogen	Flakes	unbekannt	Waschparameter
PP	spritzgegossen	Flakes	unbekannt	Waschparameter
PS	tiefgezogen	Flakes	unbekannt	Waschparameter
PP	tiefgezogen	Ganze Becher	Fa. Greiner	Referenzmaterial
PS	tiefgezogen	Flakes	Fa. Viscotec	Referenzmaterial
PS	tiefgezogen	Regranulat	Fa. Viscotec	Referenzmaterial

### 2.1.1.1 PP und PS Flakes

Der zentrale Bestandteil dieser Arbeit ist die Untersuchung von Post-Consumer PP- und PS-Flakes, die aus geschredderten Bechern unterschiedlicher Formen, Fassungsvermögen, Farben und Herstellern gewonnen und zur Reinigung unterschiedlichen Waschprozeduren unterworfen wurden. Das Schreddern und die Durchführung der Waschversuche erfolgte durch die Zusammenarbeit der Forschungspartner im Projekt „**Pack2Loop**“, und wurde an der **LIT Factory** durch die Mithilfe aller Forschungspartner (**LIT Open Innovation Center, FH Campus Wien, Montanuniversität Leoben, OFI** und **TU Wien**) durchgeführt.

Die Ausgangsmaterialien entstammten einer manuelle Sortierung, wobei etwa 150 kg tiefgezogener und spritzgegossener PP Becher sowie etwa 50 kg tiefgezogener PS Becher gesammelt wurden. Die Unterscheidung nach der Herstellungsart wurde vorgenommen, da tiefgezogene und spritzgegossene Materialien bekanntermaßen unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. [16]

Der Ablauf der Waschbehandlung setzte sich für alle Materialien aus den folgenden Schritten zusammen:

- Erste Vorwäsche der ganzen Becher mit Kaltwasser
- Zerkleinerung der Becher (Korngrößen: PP: 30 – 50 mm, PS: 20 mm)
- Zweite Vorwäsche der Flakes mit Kaltwasser
- Heißwäsche: 60 °C oder 80 °C, mit Wasser oder wässriger Ätznatronlösung (1-3 wt.%)
- Trocknung mit 60 °C Heißluft in Wäschenetzen

Bei allen drei Waschvorgängen wurden die Parameter 10 min Wälzen und 5 min Schleudern angewendet. Zwischen jedem Durchgang wurde die Waschtrommel gereinigt und zusätzlich einem Spülvorgang unterzogen. Die Mühle wurde nach Verwendung ebenfalls nach jedem Durchgang händisch gereinigt.

Da es sich um Post-Consumer Material handelte, waren auch nach den Waschbehandlungen diverse Nebenbestandteile wie Etiketten, Folien, Aluminium, unbekannte Materialien und auch andere Kunststoffe enthalten. Aus diesem Grund wurde ein Teil der unerwünschten Materialien mit Hilfe des Schwimm-Sink-Verfahrens abgetrennt. Anschließend wurden die Flakes manuell sortiert, um die Zusammensetzung anhand optischer Erscheinung zu ermitteln. Dieser Prozess der Probenaufbereitung wird in Abschnitt 2.2.2.1 näher erläutert. Tabelle 2 gibt einen Überblick zu den vier verwendeten Varianten der Waschparametern.

**Tabelle 2:** Verwendete Varianten der Waschparameter für PP und PS Flakes

	Temperatur	Medium
Variante 1	60 °C	H <sub>2</sub> O
Variante 2	60 °C	NaOH
Variante 3	80 °C	H <sub>2</sub> O
Variante 4	80 °C	NaOH

Die PS Flakes wurden aufgrund beschränkter Materialverfügbarkeit nur den Waschbehandlungsvarianten 2 und 4 unterzogen. Somit ergeben sich aus den verschiedenen Waschbehandlungen zehn Serien, welche Tabelle 3 zu entnehmen sind.

**Tabelle 3:** Übersicht der untersuchten Flakes

Material	Formgebungsverfahren	Waschparameter	Benennung
PP	Spritzguss (spg)	Variante 1	PP spg 60 °C H <sub>2</sub> O
		Variante 3	PP spg 80 °C H <sub>2</sub> O
		Variante 2	PP spg 60 °C NaOH
		Variante 4	PP spg 80 °C NaOH
	Tiefziehen (tgz)	Variante 1	PP tgz 60 °C H <sub>2</sub> O
		Variante 3	PP tgz 80 °C H <sub>2</sub> O
		Variante 2	PP tgz 60 °C NaOH
		Variante 4	PP tgz 80 °C NaOH
PS	Tiefziehen (tgz)	Variante 3	PS tgz 80 °C H <sub>2</sub> O
		Variante 4	PS tgz 80 °C NaOH

In Abbildung 18 sind drei verschiedene Fraktionen der untersuchten Flakes dargestellt, welche nach dem Schwimm-Sink Bad zum Trocknen an der Luft ausgebreitet wurden.

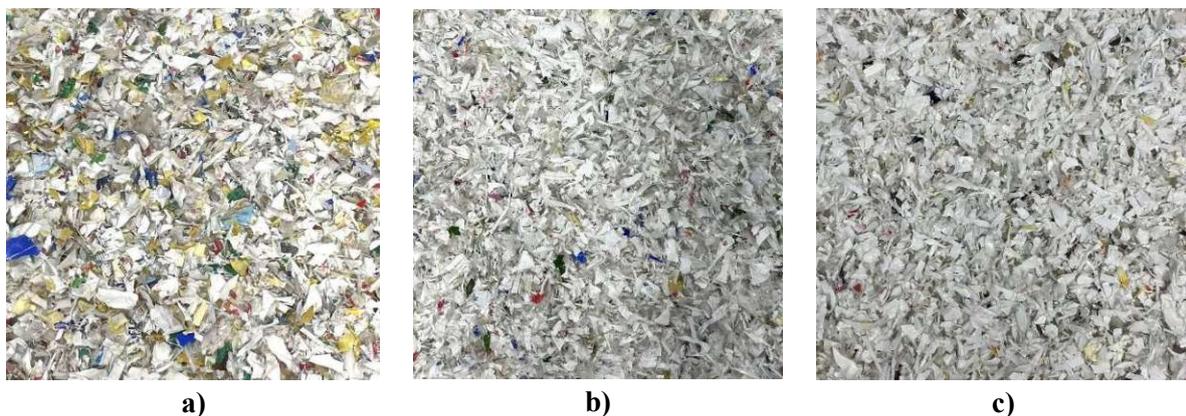
**Abbildung 18:** Flakes: a) PP spritzgegossen, b) PP tiefgezogen, c) PS tiefgezogen

Tabelle 4 gibt eine Übersicht zu den PP und PS Flakes.

**Tabelle 4:** Materialien PP und PS Flakes

Material	PP		PS
	Formgebungsverfahren	Spritzguss (spg)	Tiefziehen (tgz)
Materialform	Flakes		
Gewinnung des Ausgangsmaterials*	Manuelle Sortierung von Bechern mit anschließender Zerkleinerung		
Aufbereitung*	Anwendung von Waschbehandlungen mit Variation der Waschparameter Temperatur und Waschmedium		
Vorbereitende Maßnahmen zur Probenherstellung	Dichteabscheidung mit Schwimm-Sink-Verfahren (siehe Abschnitt 2.2.2.1.1)		
MFR** [g/10 min]	~65	~15	~4
Benennung in dieser Arbeit	PP spg & „Waschparameter“	PP tgz & „Waschparameter“	PS tgz & „Waschparameter“

\* im Vorfeld zu dieser Arbeit durchgeführte Schritte

\*\* MFR Messungen gemäß DIN EN ISO 1133;

Parameter: PP: Temperatur: 230 °C, Masse: 2,16 kg / PP: Temperatur: 200 °C, Masse: 5 kg;

Eine Übersicht der genauen experimentell ermittelten Werte sind im Kapitel der Ergebnisse zu finden.

### 2.1.1.2 Referenzmaterial: PP Becher (Fa. Greiner)

Als erstes Referenzmaterial wurde industriell aufbereitetes PP genutzt, welches von der Fa. Greiner zu tiefgezogenen Bechern aus 100 % Rezyklat verarbeitet vorlag. Die Becher wurden zerkleinert, um sie in weiterer Folge dem Prozess der Probenherstellung zuzuführen. Das so gewonnene Ausgangsmaterial diente als Referenz für die tiefgezogenen PP Flakes aus Abschnitt 2.1.1.1. Abbildung 19 zeigt die ganzen Becher, welche die Basis für die folgenden Untersuchungen dieser Fallstudie waren.



**Abbildung 19:** PP Becher aus 100% Rezyklat

Tabelle 5 gibt einen Überblick zu diesem Referenzmaterialmaterial.

**Tabelle 5:** PP Referenzmaterial

Material	PP
Formgebungsverfahren	Tiefziehen (tgz)
Materialform	Vollständige Becher
Gewinnung des Ausgangsmaterials	Bereitstellung durch Industriepartner
Aufbereitung/Herstellung	Von Industriepartner
Vorbereitende Maßnahmen zur Probenherstellung	Manuelles zerkleinern
MFR* [g/10 min]	~35

\* MFR Messungen gemäß DIN EN ISO 1133;

Parameter: Temperatur: 230 °C, Masse: 2,16 kg;

Eine Übersicht der genauen experimentell ermittelten Werte sind im Kapitel der Ergebnisse zu finden.

Zur Durchführung der Analyse- und Prüfmethode waren, abgesehen von der Zerkleinerung vor der Probenherstellung, keine weiteren vorbereitenden Maßnahmen erforderlich.

### 2.1.1.3 Referenzmaterial: PS Flakes und Regranulat (Fa. Viscotec)

Als weitere Referenzmaterialien wurde industriell aufbereitetes tiefgezogenes PS, welches zu Flakes und zu Regranulat verarbeitet war, untersucht. Das Regranulat wurde einer Vakuumbehandlung im Schmelzzustand unterzogen, wobei die genauen Parameter aufgrund von Geheimhaltung zur Wahrung von Betriebsgeheimnissen nicht geteilt wurde. Die beiden Materialien dienten als Referenz zu den tiefgezogenen PS Flakes aus Abschnitt 2.1.1.1. Weiters wurden die Auswirkungen der Dekontaminationsbehandlung, sowie die Auswirkung der Mehrfachverarbeitung untersucht. In Abbildung 20 sind die beiden Ausgangsmaterialien abgebildet.



**Abbildung 20:** PS (Viscotec): a) PS Flakes, b) PS Regranulat

Tabelle 6 gibt einen Überblick zu den beiden Materialien.

**Tabelle 6:** PS Referenzmaterialien

Material	PS	
Formgebungsverfahren	Tiefziehen (tgz)	
Materialform	Flakes	Vakuumbehandeltes Regranulat (RGR)
Gewinnung des Ausgangsmaterials	Bereitstellung durch Industriepartner	
Aufbereitung/Herstellung	Von Industriepartner	
MFR* [g/10 min]	~5	~6

\* MFR Messungen gemäß DIN EN ISO 1133;

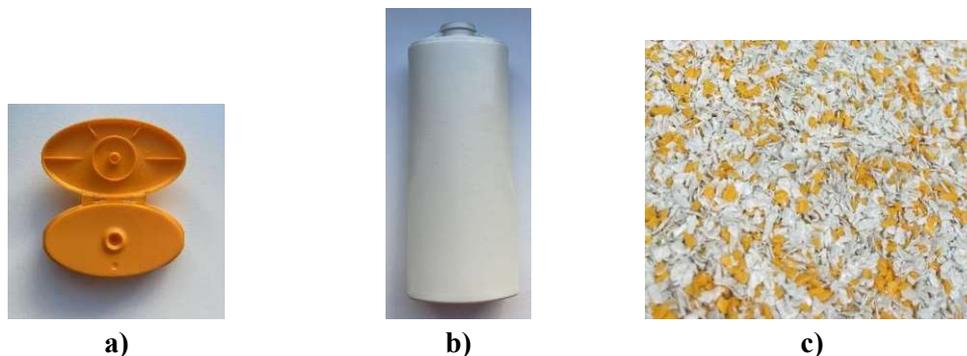
Parameter: Temperatur: 200 °C, Masse: 5 kg;

Eine Übersicht der genauen experimentell ermittelten Werte sind im Kapitel der Ergebnisse zu finden.

Zur Durchführung der Analyse- und Prüfmethode waren keine vorbereitenden Maßnahmen notwendig, um Proben aus den Ausgangsmaterialien herzustellen.

### 2.1.2 Duschgefäße

Mit den Materialien der zweiten Versuchsgruppe wurde die Relevanz der sortenreinen Sortierung untersucht. Als Fallbeispiel dienen die Hauptbestandteile einer Duschgefäße, welche die Materialien dieser Gruppe bilden. Die Duschgefäße mit einem Fassungsvermögen von 300 ml wurde von der Firma dm drogerie markt GmbH im befüllten Zustand zur Verfügung gestellt. Nach Verbrauch des Inhalts wurden die leeren Post-Consumer Flaschen in ihre Hauptbestandteile zerlegt und mit Leitungswasser ausgespült. Der Verschluss aus Polypropylen, der Hohlkörper aus High Density Polyethylen und die Mischung der beiden Komponenten wurden analysiert. Abbildung 21 zeigt die drei Materialien. Bei der Materialmischung wurde ein Mischungsverhältnis entsprechend den Massenanteilen der vollständigen Duschgefäße gewählt. Dafür wurden die beiden Komponenten geschreddert und nach Einwaage vermischt. Der Sleeve der Flasche wurde für die Untersuchungen entfernt und nicht berücksichtigt.



**Abbildung 21:** Komponenten Duschgefäße: a) Cap PP, b) Body HDPE, c) Blend HDPE+PP

Die Massen der beiden Komponenten, die verwendete Benennung in dieser Arbeit sowie die im Verlauf der Arbeit ermittelten Schmelze-Massefließraten (MFR) können Tabelle 7 entnommen werden.

**Tabelle 7:** Komponenten der Duschgelflasche

	<b>Verschlusskappe</b>	<b>Hohlkörper</b>	<b>Mischung (ganze Flasche)</b>
Material	PP	HDPE	HDPE & PP
Formgebungsverfahren	Spritzguss	Extrusionsblasformen	-
Masse [g]	6,9	21,1	28
Massenanteil [wt.%]	24,7	75,3	100
MFR* [g/10 min]	~34	~2	~8
Benennung in dieser Arbeit	Cap PP	Body HDPE	Blend HDPE+PP

\* MFR Messungen gemäß DIN EN ISO 1133;

Parameter: Temperatur: 230 °C, Masse: 2,16 kg;

Eine Übersicht der genauen experimentell ermittelten Werte sind im Kapitel der Ergebnisse zu finden.

## 2.2 Methoden

In diesem Abschnitt werden zunächst die verwendeten Verfahren zur Materialaufbereitung und der Probenherstellung beschrieben. Darunter finden sich Aufbereitungsschritte wie das Schwimm-Sink-Verfahren, das Mahlen der Ausgangsmaterialien sowie verschiedene Formgebungsverfahren wie Extrusion, Spritzguss, Stanzen und Pressen.

Anschließend werden eingesetzten Analyse- und Prüfmethode erläutert, die zur Identifikation der Grundmaterialien sowie zur Untersuchung der Werkstoffeigenschaften verwendet wurden. Hierzu wurden thermische, rheologische und mechanische Untersuchungen durchgeführt, um eine ausführliche Charakterisierung der Materialien zu ermöglichen.

### 2.2.1 Übersicht Probenherstellungsverfahren und Methoden

In diesem Kapitel wird eine Übersicht zu den verschiedenen Prozessen der Materialaufbereitung, der Probenherstellung der zugehörigen Analyse- und Prüfmethode gegeben. Zur Veranschaulichung werden Ablaufdiagramme verwendet, die die Schritte der Prozesskette übersichtlich darstellen. Der Abschnitt ist nach den beiden untersuchten Materialgruppen, den Bechermaterialien und der Duschgelflasche, gegliedert. Weiters sind die Materialien innerhalb der jeweiligen Gruppe zusammengefasst, sofern sich die Prozesse einander ähnelten.

#### „Becher“

Die Gruppe der „Becher“ setzt sich, wie beschrieben, aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien zusammen, weshalb verschiedene Verarbeitungsschritte zur Probenherstellung erforderlich waren.

Die in Kapitel 2.1.1.1 beschriebenen Flakes wurden zu Beginn mittels Dichteabscheideverfahren aufbereitet, bevor sie sortiert und weiterverarbeitet werden konnten. Abbildung 22 gibt einen Überblick zu dem Prozess der Materialaufbereitung, der Probenherstellung und der durchgeführten Versuche. In dieser Abbildung sind weiters die PP Becher aus industrieller Produktion enthalten. Diese mussten keiner Dichteabscheidung mittels

Schwimm-Sink-Verfahren unterzogen werden, sondern wurden manuell zerkleinert, um in weiterer Folge dem Verarbeitungs- und Probenherstellungsprozess zugeführt zu werden.

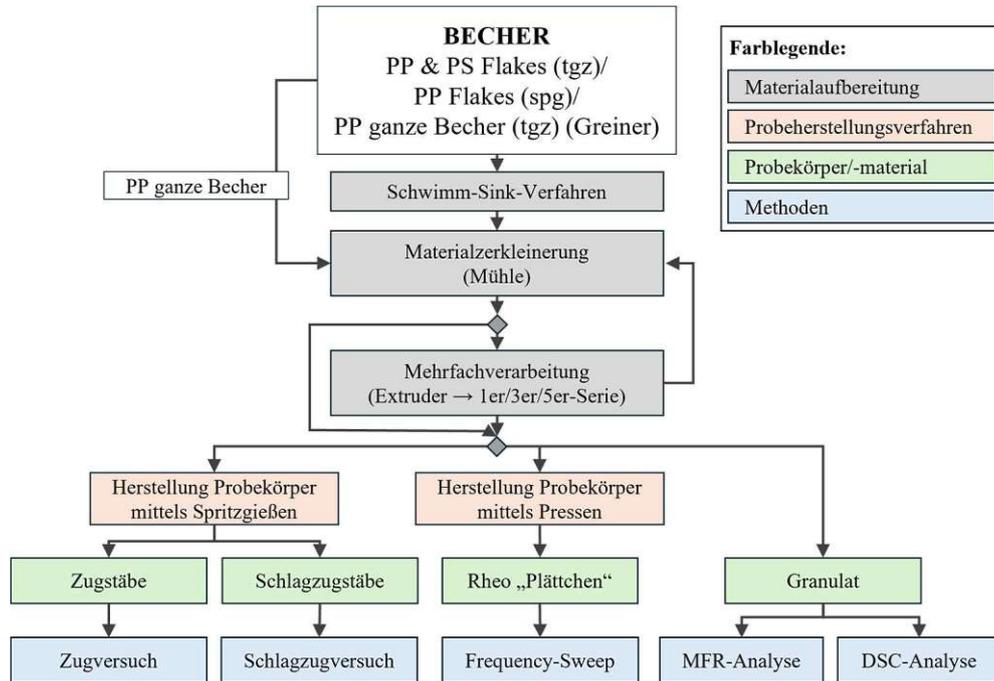


Abbildung 22: Übersicht Verarbeitung und Untersuchung PP & PS Flakes & PP ganze Becher

Das Referenzmaterial aus industrieller Aufbereitung von der Fa. Viscotec, beschrieben in Kapitel 2.1.1.3, lag in Form von Flakes und Regranulat vor. Diese Ausgangsmaterialien konnten direkt den weiteren Verarbeitungsschritten sowie Prüfungen zugeführt werden.

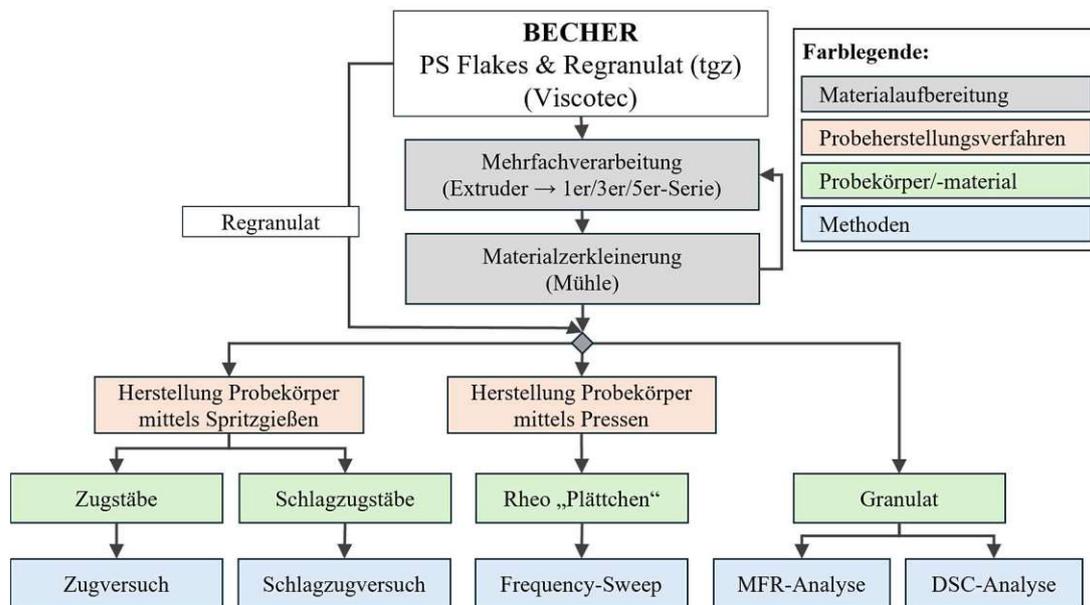


Abbildung 23: Übersicht Verarbeitung und Untersuchung PS Flakes & Granulat (Viscotec)

„Duschgelflasche“

Die Materialien der Duschgelflasche mussten zunächst manuell zerkleinert, um mittels Mühle in Granulat geschreddert zu werden. In weiterer Folge wurden die Materialien zu Proben

verarbeitet, wobei die PP Verschlüsse mittels Spritzguss verarbeitet wurden. Der Ablauf der Verarbeitung der PP Verschlüsse ist in Abbildung 24 dargestellt.

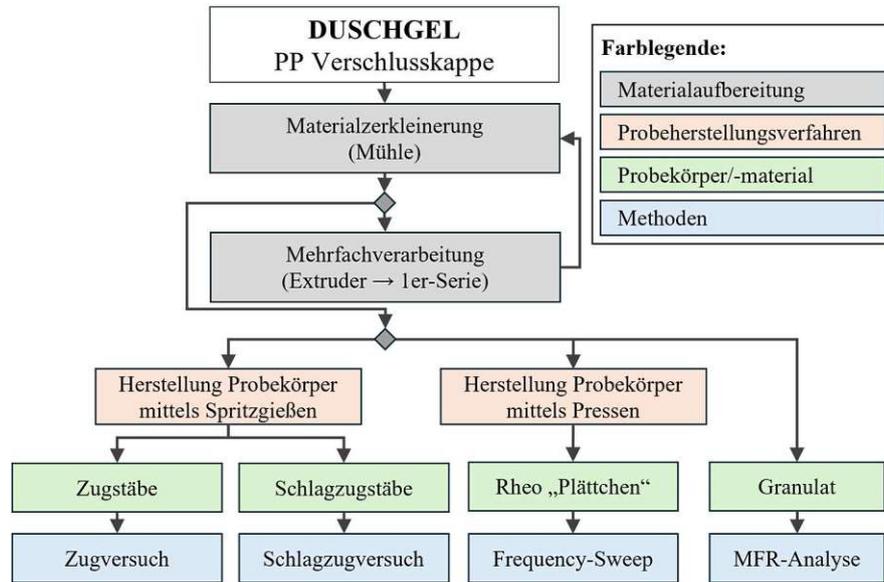


Abbildung 24: Übersicht Verarbeitung und Untersuchung Duschgel PP Verschlusskappe

Die Verarbeitung der Hohlkörper der Duschgelflasche aus HPDE, sowie die Materialmischung aus HDPE und PP unterschied sich dahingehend, dass die Probekörper zum Teil aus heißgepressten Platten ausgestanzt und nicht mittels Spritzguss hergestellt wurden. Das Ablaufdiagramm in Abbildung 25 zeigt dieses Vorgehen.

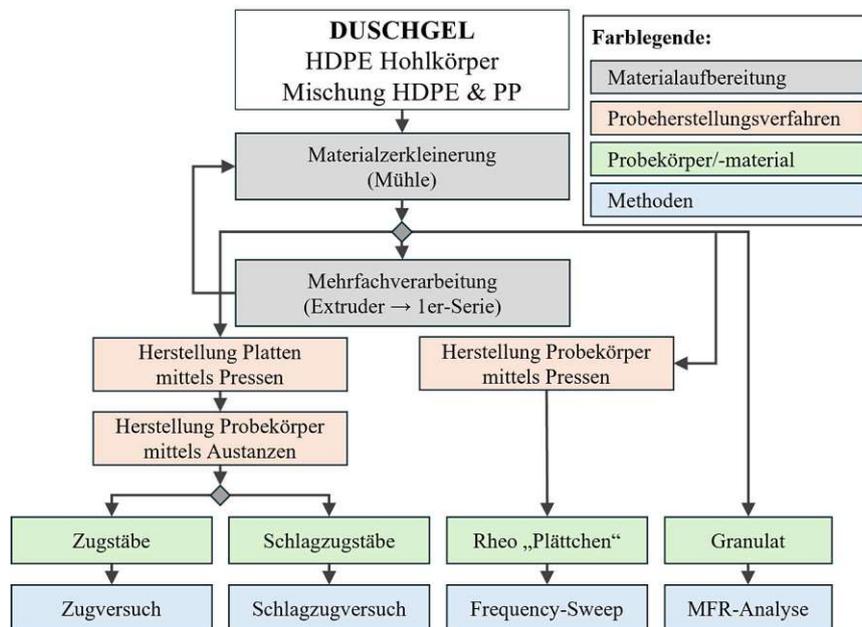


Abbildung 25: Übersicht Verarbeitung und Untersuchung Duschgel HDPE Hohlkörper / Mischung HDPE & PP

## 2.2.2 Probenherstellung

In Abhängigkeit der verwendeten Untersuchungsmethode und den zu prüfenden Materialien waren unterschiedliche Verarbeitungsschritte erforderlich. Während einige Ausgangsmaterialien direkt für die Analyse verwendet werden konnten, mussten andere Materialien und Methoden zunächst aufbereitet werden.

Es folgten direkte oder indirekte Formgebungsschritte zur Herstellung der Prüfkörper. Die in diesem Zusammenhang eingesetzten Maschinen und Verfahren, sowie die dafür verwendeten Verarbeitungsparameter, werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

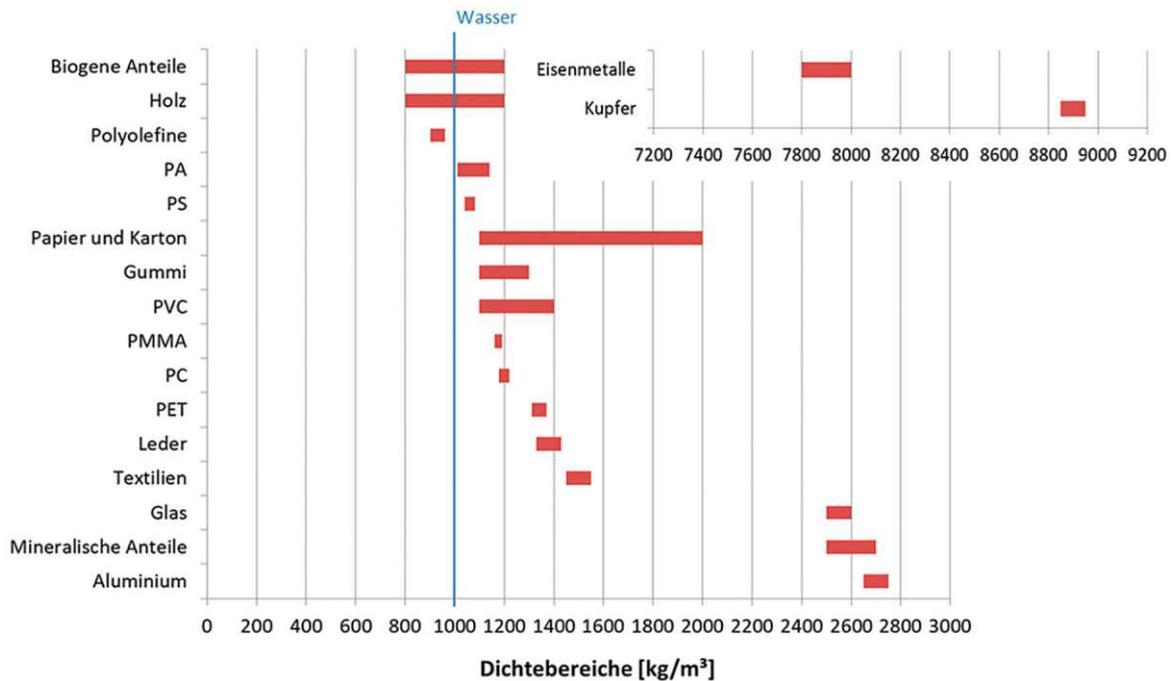
### 2.2.2.1 Materialaufbereitung

Wie in der jeweiligen Übersicht im Abschnitt 2.2.1 gezeigt, waren in Abhängigkeit des Ausgangsmaterial und dem verwendeten Prüfverfahren verschiedene Schritte zur Materialaufbereitung und -verarbeitung notwendig, um aus den Ausgangsmaterialien Materialproben und Probekörper herzustellen. Die entsprechenden Verfahren und Schritte werden im Folgenden erläutert.

#### 2.2.2.1.1 Schwimm-Sink-Verfahren

Die PP- und PS Flakes wurden vor der Verarbeitung zu Proben einem gesonderten Aufbereitungsverfahren unterzogen, da nach der manuellen Vorsortierung unerwünschte Abfallfraktionen enthalten waren. Deshalb wurden die Flakes einem Schwimm-Sink-Verfahren unterzogen mit dem Ziel unerwünschte Materialien, wie Metalle und andere Kunststoffarten, von den jeweiligen zu untersuchenden Flakes abzutrennen.

Das Schwimm-Sink-Verfahren stellt ein etabliertes Aufbereitungsverfahren zur Abtrennung von Polyolefinen (wie PP und PE) von den restlichen Abfallfraktionen dar. Als Abtrennungsmerkmal wird die Dichte der unterschiedlichen Fraktion genutzt. [17] Wasser wird als Trennmedium eingesetzt. Da die Dichte der Polyolefine PP und PE niedriger ist als jene von Wasser, schwimmen diese Materialien. Andere Kunststoffe, wie PS und diverse andere typische Abfallfraktionen aus Siedlungsabfällen, sinken hingegen im Wasser. Abbildung 26 zeigt die Dichtebereiche von häufig vorkommenden Materialien in Siedlungsabfällen. Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass Polyolefine eine deutlich geringere Dichte, verglichen mit den restlichen Fraktionen, aufweisen. Die Dichte von Wasser wird dabei mit etwa  $1 \text{ g/cm}^3$  angenommen. Die Dichte der Polyolefine wird nur von biogenen Anteilen und Holz unterboten.



**Abbildung 26:** Dichtebereiche häufig vorkommender Materialtypen in Siedlungsabfällen [17]

Ziel war es, mit dem Schwimm-Sink-Verfahren von den vorsortierten PP- und PS Flakes unerwünschte Fraktionen abzutrennen. Im Fall von PP konnte die Schwimmfraktion von der Sinkfraktionen getrennt und zur weiteren Verarbeitung direkt herangezogen werden, da PP in Wasser schwimmt. Die PS Flakes bildeten allerdings aufgrund ihrer höheren Dichte als Wasser den Hauptbestandteil der Sinkfraktion, gemeinsam mit anderen unerwünschten Bestandteilen, wie etwa Metallen. Die Sinkfraktion des Wasserbades für die PS Flakes musste nach der Abtrennung zur Schwimmfraktion weiter manuell sortiert werden, um metallische und andere Bestandteile unterschiedlichen Ursprungs abzutrennen.

Für das Wasserbad, in dem die Flakes angesetzt wurden, wurde eine mit etwa 16 Liter Wasser befüllte Wanne verwendet. Die Abmessungen des Wasserbades betragen etwa 53×35×10,5 cm (L×B×T). Die Flakes blieben für mindestens 48 Stunden im Wasserbad. Um eine möglichst gute Benetzung zu erreichen, wurde in dieser Zeit mehrfach umgerührt. Für die Aufbereitung der PP Flakes wurden pro Serie etwa 500 g Flakes des vorsortierten Materials als Ausgangsbasis herangezogen. Zur Abtrennung der PS Flakes wurden im Durchschnitt 750 g Flakes verwendet, da der Austrag nur bei etwa 80 % (Verhältnis aus Sinkanteil, einschließlich metallischer Bestandteile zu Ausgangsmaterial) lag. Demgegenüber betrug der Austrag der Schwimm-Sink-Behandlungen der PP Flakes etwa 95 % (Verhältnis aus Schwimmanteil zu Ausgangsmaterial). In diesem Kontext bezeichnet der Austrag die jeweils abgetrennte Materialmenge, welche zur weiteren Aufbereitung herangezogen wurde. In Abbildung 27 sind beispielhaft Flakes aus verschiedenen Serien im Wasserbad zu sehen.



**Abbildung 27:** Flakes im Wasserbad: a) Draufsicht zwei verschiedener Serien (beides PP); b) Seitenansicht einer PP Serie

Die Schwimmanteile wurden abgeschöpft, während die Sinkanteile aus dem restlichen Wasserbad gefiltert wurden. Beide Anteile wurden in weiterer Folge zum Trocknen auf Papier aufgelegt, um im nächsten Schritt sortiert zu werden.

#### 2.2.2.1.2 Sortierung

Die getrockneten Flakes wurden anschließend an das Schwimm-Sink-Verfahren zur Bestimmung der Flakes Zusammensetzung aller Serien manuell sortiert. Dabei wurden von den Schwimmfraktionen der Serien der PP Flakes Stichproben in der Größe von etwa 50 g entnommen, was etwa 10 % der verarbeiteten Gesamtmenge jeder Serie entspricht. Die Sortierung erfolgte hinsichtlich farblicher Zusammensetzung der Kunststoff-Flakes, sowie ggf. vorhandenen Rückständen von Etiketten oder vorhandenen Aufdrucken. Ebenso wurden die verbliebenen Anteile anderer Abfallfraktionen, wie zum Beispiel Restanteile von Metall, kategorisiert.

Das Vorgehen der Sortierung des PS Flakes unterschied sich dahingehend, dass die PS Flakes der Sinkfraktion angehörten. Daher musste der gesamte Sinkanteil sortiert werden, um metallische Anteil vor der weiteren Verarbeitung zu entfernen, da diese auch für die Verarbeitung notwendigen Maschinen eine schädigende Wirkung zur Folge haben können.

Die Ergebnisse der Sortierungen sind im Ergebnisteil dieser Arbeit in Abschnitt 3.1 im Detail aufgeführt.

#### 2.2.2.1.3 Mühle

Alle vorhandenen Materialien, außer sie lagen bereits als Granulat vor, wurden zunächst mit Hilfe der Schneidmühle Pulverisette 19 (Fritsch GmbH, Deutschland) gemahlen. Die Materialien der Duschgelflasche und der ganzen Becher wurden im Vorfeld zerkleinert, um sie in weiterer Folge mit der Mühle weiter verarbeiten zu können.

In weiterer Folge kam die Schneidmühle zur Zerkleinerung der extrudierten Stränge zum Einsatz, sodass das Material der weiteren Verarbeitung oder der vorgesehenen Methode zugeführt werden konnte.

Mit der Schneidemühle wurden die in Tabelle 8 aufgelisteten Materialien verarbeitet.

**Tabelle 8:** Mittels Mühle verarbeitete Materialien

Materialien
Becher - PP & PS Flakes Tiefziehtype
Becher - PP Flakes Spritzgusstype
Becher - PP ganze Becher (Greiner)
Duschgel - PP Verschlüsse
Duschgel - HDPE Hohlkörper
Duschgel - Mischung HDPE & PP

### 2.2.2.2 Extrusion

Um den Prozess des industriellen Recyclings zu simulieren, wurden Mehrfachextrusionen durchgeführt. Vor bzw. nach der Extrusion wurde das Material gemahlen und dem nächsten Verarbeitungsschritt zur Probenherstellung, oder direkt einem Analyseverfahren zugeführt. **Zusätzlich wurde zu jedem Material eine 0er Serie als Referenz verwendet, welche nicht extrudiert wurde, um den Ausgangszustand festzuhalten. Entsprechend der Anzahl der durchgeführten Extrusionen wurden die Serien als 0er, 1er, 3er und 5er Serie bezeichnet.**

Beim Durchlauf des Materials durch den Extruder wurde der austretende extrudierte Stang regelmäßig von Hand abgeschlagen. Das Endprodukt des Herstellungsverfahrens stellte Granulat in mehreren Verarbeitungsstufen dar.

Verwendet wurde der Einschneckenextruder EXTRON EX 18-26-1.5, welcher in Abbildung 28 dargestellt ist. Dieser verfügt über drei unabhängig regelbare Heizzonen. Die verwendeten Prozessparameter sind in Tabelle 9 aufgeführt und wurden abhängig vom zu verarbeitenden Material gewählt.

**Abbildung 28:** EXTRON EX 18-26-1.5**Tabelle 9:** Prozessparameter Extruder

Parameter	PS	PP	HDPE
Drehzahl	70 U/min		
Temperatur Zone 1	165 °C	165 °C	165 °C
Temperatur Zone 2	230 °C	240 °C	240 °C
Temperatur Zone 3	230 °C	200 °C	200 °C

Für jede zu untersuchende Serie wurden zu Beginn etwa 400 g dem Extruder zugeführt, um für jede der drei mehrfachverarbeiteten Serie (1er, 3er und 5er Serie) etwa 100 g Basismaterial zur weiteren Verarbeitung zu Probekörper und direkten Analyse zur Verfügung zu haben. Dabei wurden auch die verarbeitungsbedingten Verluste bei der Extrusion und dem Mahlen berücksichtigt.

### **Becher**

Die verschiedenen zu analysierenden Bechermaterialien wurden ein-, drei- und fünfmal extrudiert.

### **Duschgelflasche**

Die Bestandteile der Duschgelflasche (HDPE und PP) sowie deren Mischung wurden jeweils einmal extrudiert. Ziel war es, die Homogenität der Serie „Mischung“ durch die Extrusion zu verbessern, da das Granulat der beiden Bestandteile nach Einwaage lediglich händisch gemischt wurde.

Mittels Extrusion wurden die in Tabelle 10 aufgelisteten Materialien verarbeitet.

**Tabelle 10:** Mittels Extruder verarbeitete Materialien

<b>Materialien</b>
Becher - PP & PS Flakes Tiefziehtype
Becher - PP Flakes Spritzgusstype
Becher - PP ganze Becher (Greiner)
Becher - PS Flakes & Regranulat (Viscotec)
Duschgel - PP Verschlüsse
Duschgel - HDPE Hohlkörper
Duschgel - Mischung HDPE & PP

### **2.2.2.3 Extrusion und Spritzguss**

Für die Herstellung der Prüfkörper für Zugversuche und Schlagzugversuche wurde der Zweischnellenextruder Thermo Scientific HAAKE MiniLab II und das Spritzprägesystem Thermo Scientific HAAKE MiniJet II (Thermo Fisher Scientific, USA) verwendet, welches die Produktion standardisierter Prüfkörper ermöglicht und sich durch eine hohe Reproduzierbarkeit auszeichnet. [18]

Die verwendeten Prozessparameter sind in Tabelle 11 aufgeführt und wurden abhängig vom Material gewählt.

**Tabelle 11:** Parameter Extruder und Spritzguss

Gerät	Parameter	PS	PP
Haake Mini Lab II	Temperatur	200 °C	230 °C
	Drehzahl	100 /min	
Haake Mini Jet II	Zylindertemperatur	200 °C	230 °C
	Werkzeugtemperatur	105 °C	40 °C
	Einspritzdruck	350 bar	
	Nachdruck	(Haltedauer je 10 s)	

Das Verfahren wurde für die in Tabelle 12 aufgelisteten Materialien angewandt, um aus diesen Materialien Prüfkörper für mechanische Prüfungen herzustellen.

**Tabelle 12:** Materialien für Probekörper die mittels Spritzguss hergestellt wurden

#### Materialien

Becher - PP & PS Flakes Tiefziehtype

Becher - PP Flakes Spritzgusstype

Becher - PP ganze Becher (Greiner)

Becher - PS Flakes & Regranulat (Viscotec)

Duschgel - PP Verschlüsse

#### 2.2.2.4 Presse

Zur Herstellung von „Rheologieplättchen“ (in weiterer Folge auch nur als „Plättchen“ bezeichnet) für Frequency-Sweeps (siehe Abschnitt 2.2.4.1) mit Hilfe entsprechender Schablonen sowie zur Produktion von Platten in einem Tauschkantenwerkzeug wurden die Materialien mit der Heißpresse Collin P 200 verarbeitet. Aus den gepressten Platten wurden anschließend Prüfkörper für Zugversuche und Schlagzugversuche ausgestanzt. Die mit Hilfe von Schablonen erzeugten Plättchen können nach einer geringfügigen Nachbearbeitung, wobei lediglich Materialüberstände entfernt wurden, direkt für die Analyse mittels Frequency-Sweeps genutzt werden.

Je nach Material wurden unterschiedliche Pressprogramme angewendet, die in den folgenden Tabellen aufgeführt sind. Für die Bechermaterialien (PP und PS) kamen die Pressprogramme aus Tabelle 13 und Tabelle 14 zum Einsatz, während für die Materialien der Duschgelflasche die Pressprogramme aus, Tabelle 15 und Tabelle 16 verwendet wurden.

**Tabelle 13:** Pressprogramm (Rheologieplättchen) PP

Phase	1	2	3	4	5
Temperatur [°C]	180	210	210	210	30
Haltezeit [min]	10	2	5	1	12
Druck [bar]	0	100	100	80	80

**Tabelle 14:** Pressprogramm (Rheologieplättchen) PS

Phase	1	2	3	4	5
Temperatur [°C]	180	180	180	180	30
Haltezeit [min]	10	2	5	1	12
Druck [bar]	0	100	100	80	80

**Tabelle 15:** Pressprogramm (Rheologieplättchen) HDPE

Phase	1	2	3	4	5
Temperatur [°C]	180	180	180	180	30
Haltezeit [min]	10	2	5	1	12
Druck [bar]	0	100	100	80	80

**Tabelle 16:** Pressprogramm (Platten) HDPE und HDPE+PP (Blend)

Phase	1	2	3	4	5
Temperatur [°C]	80	190	190	190	30
Haltezeit [min]	10	14	2	3	20
Druck [bar]	2	10	20	40	60

### 2.2.2.5 Stanzen

Um aus gepressten Platten und Probekörper für Zugversuche herzustellen, wurden diese mittels Zwick Z250 (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Deutschland) maschinell ausgestanzt, wobei das Stanzwerkzeug nach ISO 527 Typ 5A verwendet wurde.

Probekörper für Schlagzugversuche wurden manuell mit entsprechender Ausrüstung aus den gepressten Platten ausgestanzt, wobei der Probekörper Typ 1 nach der Norm DIN EN ISO 8256 verwendet wurde. Das Vorgehen wurde auf die in Tabelle 17 aufgelisteten Materialien angewandt.

**Tabelle 17:** Mittels Stanzen hergestellte Probekörper

Materialien
Duschgelflasche - HDPE Hohlkörper
Duschgelflasche - Mischung HDPE & PP

### 2.2.3 Thermische Analyse

Thermische Analyseverfahren ermöglichen die Messung und Analyse physikalischer und/oder chemischer Eigenschaften von Kunststoffen. Sie sind von besonderer Bedeutung, da die Eigenschaften von Polymeren, insbesondere Thermoplasten, stark temperaturabhängig sind. [19]

Zur Charakterisierung der untersuchten Materialien wurde in der vorliegenden Arbeit die Methode der Dynamischen Differenzkalorimetrie (DDK) – engl. differential scanning calorimetry (DSC) – genutzt, welche im Folgenden beschrieben wird.

### 2.2.3.1 Dynamische Differenzkalorimetrie

Die Methode der DSC-Analyse wurde genutzt, um die Materialzusammensetzung der PP und PS Flakes zu untersuchen und mögliche Verunreinigungen zu identifizieren. [20] Bei dieser Analyseverfahren wird ein Tiegel mit dem zu analysierenden Probematerial sowie ein Referenztiegel mit einem Referenzmaterial einem definierten Temperaturprogramm unterzogen. Auftretende Differenzen der Wärmeströme werden gemessen und als Funktion der Temperatur und/oder der Zeit dargestellt. Anhand dieser Wärmestromdifferenzen können, unter anderem, charakteristische Temperaturen wie die Kristallitschmelztemperatur  $T_m$  und Glasübergangstemperatur  $T_g$  bestimmt werden. Diese spezifischen thermischen Eigenschaften ermöglichen Rückschlüsse auf die Zusammensetzung und Eigenschaften des analysierten Materials. [19], [21]

Die Änderungen des Wärmestroms resultieren bei abweichendem Verhalten von Probe und Referenzmaterial aus exothermen oder endothermen Reaktionen der Probe, welche eine Temperaturdifferenz erzeugen. Diese Wärmestromänderungen sind anhand vorhandener Peaks in den Kurvenverläufen ersichtlich. Abbildung 29 zeigt einen beispielhaften Kurvenverlauf für das Aufschmelzen und das Kristallisieren eines kristallisationsfähigen Polymers.

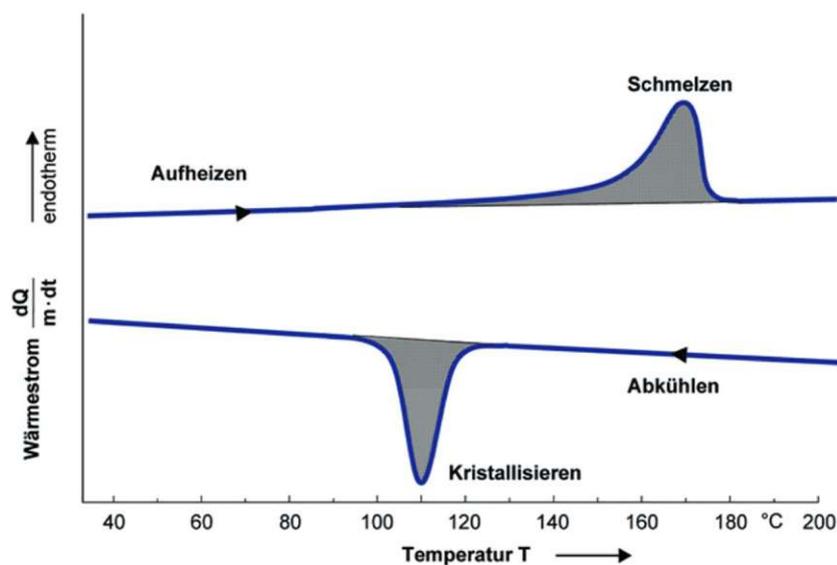
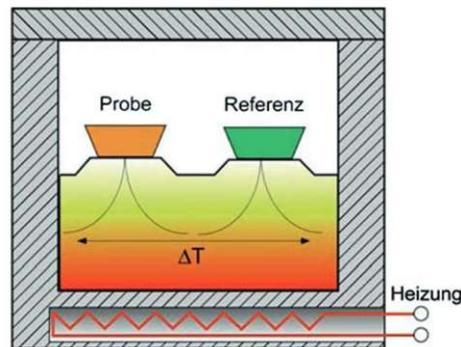


Abbildung 29: Typische DSC-Kurve [22]

Der positive Peak der Aufheizkurve weist auf einen endothermen Vorgang hin, bei dem Wärme zugeführt werden muss. Der negative Peak hingegen resultiert aus einem exothermen Prozess während der Kristallisation, bei dem Wärme freigesetzt wird. [22]

Bei Polymeren werden die DSC-Analysen stark von der thermischen und mechanischen Vorgeschichte und der Morphologie der Probekörper beeinflusst. [19] Aus diesem Grund wurde das jeweilige Temperaturprogramm zweimal durchlaufen, wobei durch den ersten Durchlauf die thermische Vorgeschichte des Probekörpers gelöscht wurde. Eine schematische Darstellung dieses Prüfaufbaus ist in Abbildung 30 ersichtlich.



**Abbildung 30:** Schematische Darstellung einer DSC-Messzelle [22]

Die Durchführung der DSC-Analysen in dieser Arbeit basieren auf DIN EN ISO 11357 [21] und wurden mit dem Dynamischen Differenzkalorimeter DSC Q2000 (TA Instruments, USA) durchgeführt. Das Probematerial wurde mittels Präzisionswaage eingewogen, wobei das Probengewicht  $5 \text{ mg} \pm 0,5 \text{ mg}$  betrug. Für jedes zu prüfende Material wurden zwei Materialproben analysiert. Für die Analyse der Bechermaterialien wurde das fünffach extrudierte Material herangezogen, da durch die Mehrfachverarbeitung von der höchsten Durchmischung ausgegangen wurde. Dies versprach die aussagekräftigsten Ergebnisse zur Bestimmung der Materialzusammensetzung. Das Probematerial wurde in einem Aluminiumtiegel mit einer Masse von etwa 20 mg verpresst. Sowohl der Probentiegel als auch der Referenztiegel wurden einzeln gewogen. Als Referenzmaterial wurde Luft verwendet. Beide Tiegel durchliefen, abhängig vom untersuchten Material, dasselbe Temperaturprogramm, dessen Parameter in Tabelle 18 dargestellt sind. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte mit der Software TA Universal Analysis.

**Tabelle 18:** DSC-Temperaturprogramme

Material	Rampe	Starttemperatur	Endtemperatur
PP	10 °C/min	30 °C	220 °C
PS	20 °C/min		

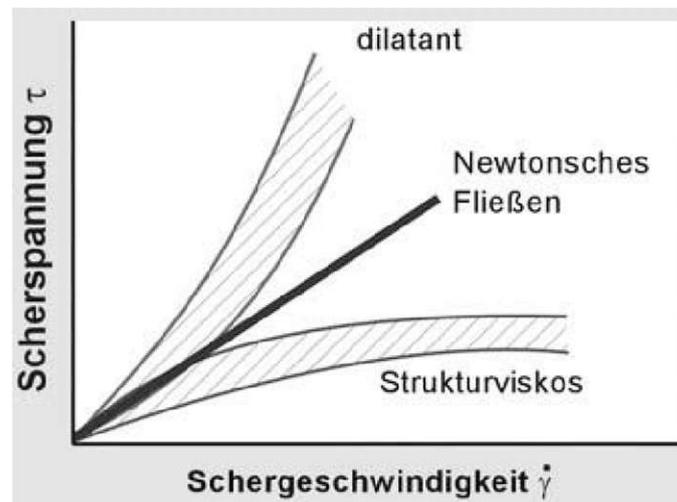
## 2.2.4 Rheologische Analysen

Die Rheologie wird als die Wissenschaft von der Deformation und dem Fließen von Körpern bezeichnet. Dabei werden die Fließeigenschaften beschrieben, erklärt und gemessen.

Kunststoffe müssen zur Verarbeitung meistens in einem fließfähigen Zustand vorliegen, weshalb das Fließverhalten besonders für die Verarbeitung von zentraler Bedeutung ist. [6]

Zur Charakterisierung der Fließeigenschaften von Fluiden wird die Viskosität als Kenngröße genutzt. Diese beschreibt den inneren Widerstand eines Fluids gegenüber einer äußeren Beanspruchung. Fluide lassen sich aufgrund ihres Fließverhaltens in Newton'sche und nicht Newton'sche Fluide unterteilen. [19] Während bei einem Fluid mit Newton'schem Fließverhalten die Scherspannungen proportional zu den Verformungsgeschwindigkeiten sind, trifft dies auf Kunststoffschmelzen nicht zu. Sie verhalten sich strukturviskos. Das bedeutet, dass die Viskosität eine Funktion der Schergeschwindigkeit ist, ebenso wie die Scherspannung,

welche mit der Schergeschwindigkeit degressiv abnimmt, wie in Abbildung 31 ersichtlich. Somit ist bei höheren Schergeschwindigkeiten weniger Kraftaufwand erforderlich, was für die Verarbeitung von Vorteil ist. [6]

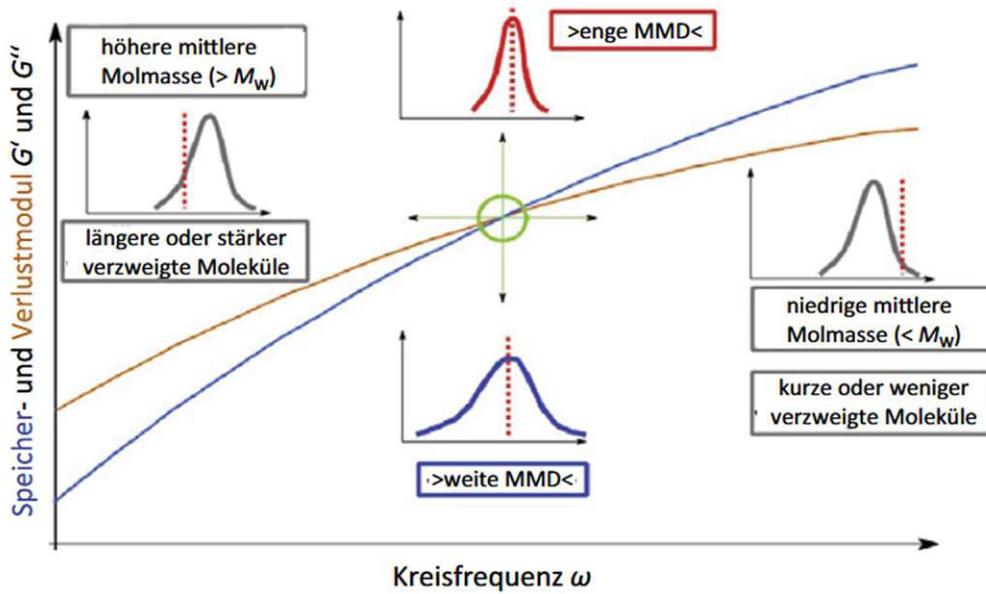


**Abbildung 31:** Fließverhalten Newton'scher, strukturviskoser und dilatanter Flüssigkeiten bzw. Schmelzen [6]

Zur Charakterisierung der untersuchten Materialien anhand ihrer rheologischen Eigenschaften und zur Stoffdatenermittlung wurden in der vorliegenden Arbeit Frequenzversuche (auch als Frequenz-Sweeps bezeichnet) mit einem Rotationsrheometer und Versuche zur Ermittlung der Schmelze-Massefließraten durchgeführt.

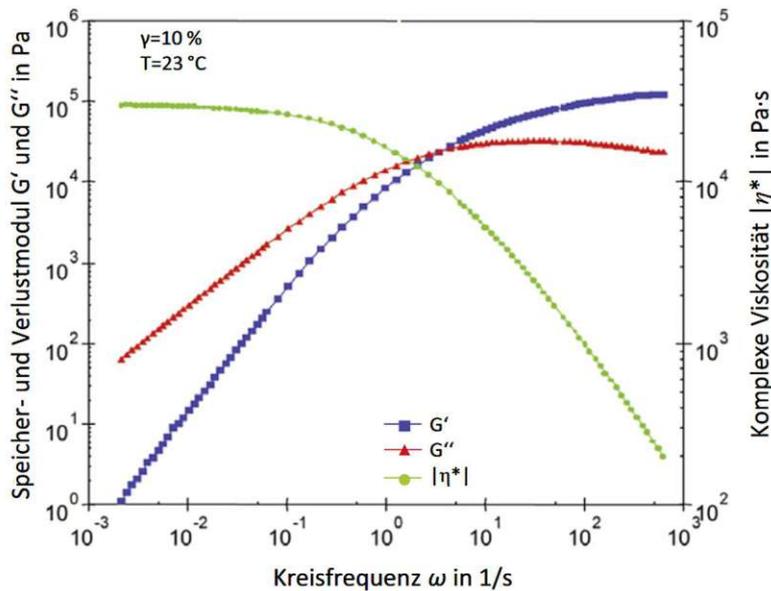
#### 2.2.4.1 Scherrheologie – Frequency Sweep

Zur Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften der untersuchten Materialien wurden sogenannte Frequency Sweeps mit einem Rotationsrheometer durchgeführt. Zur Bestimmung der rheometrischen Größen Scherrate und Schubspannung werden in diesem Versuch die Messgrößen Drehzahl und das, durch die Scherbeanspruchung des untersuchten Materials, erzeugte Drehmoment herangezogen. Diese rheometrischen Größen korrelieren mit den erfassten Messwerten. [23] Mittels Frequency Sweeps lassen sich Speichermodul und Verlustmodul in Abhängigkeit der Kreisfrequenz ermitteln und darstellen. Der Speichermodul stellt ein Maß für das elastische Verhalten, der Verlustmodul ein Maß für das viskose Verhalten eines viskoelastischen Materials dar. [24] Durch den Schnittpunkt der beiden erzeugten Kurven lässt sich der sogenannte Cross-Over-Point COP ermitteln. Bei Vorliegen von Vergleichswerten ermöglicht die Position bzw. die Verschiebung des COP einen Rückschluss auf die Molmassenverteilung im Material, relativ zu den Referenzwerten. In Abbildung 32 sind die Zusammenhänge der mittleren Molmasse und der Molmassenverteilung in Abhängigkeit der Position des COP dargestellt. Weiters lässt sich mittels Frequency Sweep aus dem Speichermodul und dem Verlustmodul über die Oszillation die sogenannte komplexe Viskosität ermitteln.



**Abbildung 32:** Position des Cross-Over-Point von Speicher- und Verlustmodul in Abhängigkeit von der Molmasse und der Molmassenverteilung [23]

Abbildung 33 zeigt beispielhaften den Verlauf von Speicher- und Verlustmodul sowie den Verlauf der komplexen Viskosität.



**Abbildung 33:** Verlauf von Speicher- und Verlustmodul sowie der komplexen Viskosität eines Kunststoffes [23]

In der vorliegenden Arbeit wurden die Versuche mit dem Rheometer MCR 302 (Anton Paar, Österreich) unter Stickstoffatmosphäre durchgeführt. Als Messgeometrie wurde eine Platte-Platte-Konfiguration mit einem Durchmesser von 25 mm und einem Spalt von 1 mm verwendet. Eine schematische Darstellung des Aufbaus ist in Abbildung 34 ersichtlic.

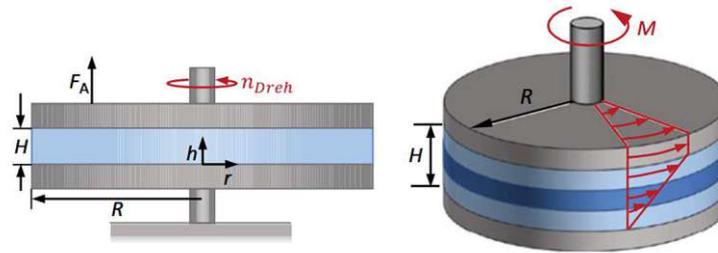


Abbildung 34: Schematischer Aufbau eines Platte-Platte Rheometers [23]

Wie anhand des Geschwindigkeitsprofils in Abbildung 34 zu erkennen, hängt die Schergeschwindigkeit vom Radius und der Spaltdicke der Messgeometrie ab.

Die Erfassung und Auswertung der Messdaten erfolgte mit der Prüfsoftware RheoCompass. Für jedes untersuchte Material wurden drei Frequency Sweeps durchgeführt. Als Probekörper wurden gestanzte Plättchen mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Höhe  $\geq 1$  mm verwendet. Die verwendeten Prüftemperaturen sind in Tabelle 19 ersichtlich.

Tabelle 19: Prüftemperaturen Rheometer

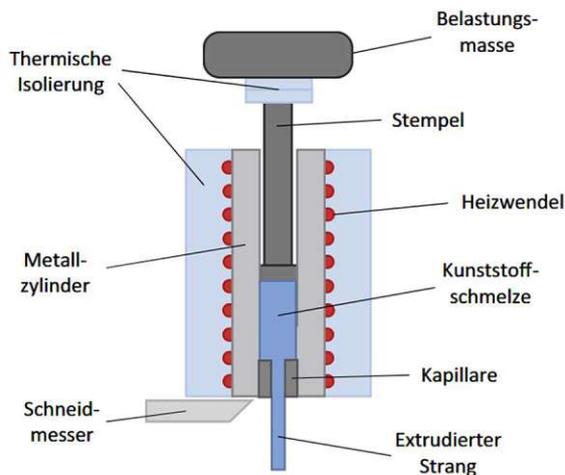
Material	Prüftemperatur
PS	200 °C
PP	230 °C
HDPE	230 °C
Mischung (HDPE, PP)	230 °C

#### 2.2.4.2 Schmelze-Massefließrate (MFR)

Zur Bestimmung der Fließfähigkeit der untersuchten Materialien wurden MFR-Messungen mit einem Niederdruck-Kapillarrheometer durchgeführt. Im Vergleich zu Verarbeitungsprozessen wie dem Spritzgießen und dem Extrudieren erfolgen MFR-Messungen bei sehr geringen Schergeschwindigkeiten. Daher dient die MFR lediglich als Anhaltspunkt bei der Charakterisierung der Fließverhaltens. Materialien mit niedrigen Schmelze-Massefließraten weisen eine höhere mittlere molare Masse auf und werden in Verarbeitungsverfahren wie der Extrusion benötigt. Im Gegensatz dazu besitzen Materialien mit einer niedrigeren mittleren molaren Masse höhere Schmelze-Massefließraten, was für Spritzgießprozesse notwendig ist. Diese Zusammenhänge ermöglichen Rückschlüsse auf eine mögliche Verringerung der molaren Masse, beispielsweise durch Kettenabbau während der Verarbeitung. Da das Verfahren eine einfache und schnelle Methode für die Wareneingangs- oder die Qualitätskontrolle bietet, findet es breite Anwendung. [7], [19]

Für MFR-Messungen wird geschmolzenes Material durch ein Extrusionswerkzeug mit definierter Länge und Durchmesser unter vorgegebener Belastung und Temperatur gefördert. Unter Zeitaufnahme wird wiederholt extrudiertes Material abgeschlagen und gewogen. Die MFR ergibt sich aus den Messwerten Zeit und Masse, welche entsprechend angewandter Norm in g/10 min angegeben wird. [25] Die Ermittlung der Schmelze-Massefließrate erfolgte gemäß DIN EN ISO 1133 [25] Verfahren A unter Verwendung des Schmelzindex-Prüfgeräts

MeltFloW basic (Emmeram Karg Industrietechnik, Deutschland). In Abbildung 35 ist der schematische Aufbau und in Abbildung 36 das in dieser Arbeit verwendete Prüfgerät dargestellt.



**Abbildung 35:** Schematischer Aufbau eines Schmelzindex-Prüfgerätes [23]



**Abbildung 36:** Verwendetes Schmelzindex-Prüfgerät

In Abhängigkeit des untersuchten Materials und den resultierenden Durchflussgeschwindigkeiten, bedingt durch die verschiedenen Viskositäten, wurden zwischen sechs und fünfzehn Proben abgeschlagen. Die Variation der Anzahl der Messungen resultiert daraus, dass eine hohe Durchflussgeschwindigkeit und somit ein hoher MFR-Wert eine geringere Anzahl an Messungen im selben Abschlagintervall zulassen, und nur eine begrenzte Materialmenge vom Messgerätes aufgenommen werden kann. Die verwendeten Prüfparameter sind Tabelle 20 zu entnehmen.

**Tabelle 20:** Prüfparameter MFR

Material	Prüftemperatur	Masse
PS	200 °C	5 kg
PP	230 °C	2,16 kg
HDPE	230 °C	5 kg
Mischung (HDPE + PP)	230 °C	5 g

## 2.2.5 Mechanische Prüfungen

Polymere können sich im Vergleich zu Metallen deutlich stärker elastisch dehnen, ohne sich dabei plastisch zu verformen. Zudem weisen sie ein stark zeitabhängiges mechanisches Verhalten auf, was sowohl ihr elastisches als auch plastisches Verformungsverhalten betrifft. In Abhängigkeit einer anliegenden Belastung zeigen sie daher ein viskoelastisches und viskoplastisches Verhalten. Aufgrund der Zeitabhängigkeit der Verformungen von Polymeren haben ihre Kennwerte eine andere Bedeutung als jene der Metalle. Dieser Umstand, sowie die Fähigkeit sich deutlich stärker elastisch zu verformen, ist bei der Auslegung von Bauteilen zu berücksichtigen. [2]

Mechanische Prüfmethode können in Abhängigkeit der Verformungsgeschwindigkeit der Probekörper in statische, quasistatische und dynamische Prüfverfahren unterteilt werden. [19] Im Folgenden werden die beiden in dieser Arbeit verwendeten Verfahren zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften vorgestellt. Der Zugversuch, ein quasistatisches Prüfverfahren und der Schlagzugversuch, ein dynamisches Prüfverfahren.

### 2.2.5.1 Zugversuch

Zur Bestimmung der Zugeigenschaften der untersuchten Materialien wurden Zugversuche durchgeführt. Das Verfahren findet Anwendung, um das Zugverformungsverhalten von Probekörpern zu untersuchen und relevante Materialkenngrößen unter festgelegten Prüfbedingungen zu ermitteln. Dabei wird ein Probekörper bei konstanter Prüfgeschwindigkeit in Richtung seiner Längsachse bis zum Bruch oder bis zum Erreichen eines vorgegebenen Wertes von Spannung (Kraft) oder Dehnung (Längenänderung) gedehnt. Die Dehnung und die dafür notwendige Kraft werden gemessen und aufgezeichnet. [26]

Die Ergebnisse eines Zugversuchs können in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt werden. Für Kunststoffe typische Kurvenverläufe sind in Abbildung 37 ersichtlich. Anhand der Kurvenverläufe kann zwischen spröden Werkstoffen (Kurve 1) bis hin zu gummiähnlichen Werkstoffen mit einer Bruchdehnung größer 50 % (Kurve 4) unterschieden werden. Die Kurven 2 und 3 unterscheiden sich durch ihr Verhalten nach Erreichen der Streckspannung. Kurve 2 weist gegenüber Kurve 3 einen weiteren Spannungsanstieg nach Erreichen der Streckspannung auf, hingegen verzeichnet Kurve 3 kein weiteres Spannungsmaximum.

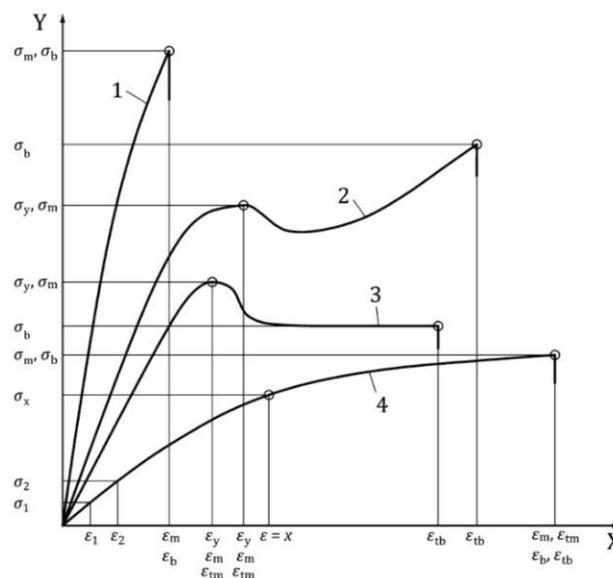


Abbildung 37: Typische Spannungs-/Dehnungskurven [26]

Ergänzend zu einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm lassen sich, unter anderem, die folgenden Materialkennwerte ermitteln:

**Tabelle 21:** Kennwerte Zugversuch [26]

Kennwert	Symbol	Einheit	Definition
<b>Elastizitätsmodul</b>	$E_t$	MPa	Steigung der Spannungs-/Dehnungskurve im Dehnungsintervall $\varepsilon_1 = 0,05 \%$ und $\varepsilon_2 = 0,25 \%$
<b>Streckdehnung</b>	$\varepsilon_y$	%	Der erste Dehnungswert, bei dem die Dehnung zunimmt ohne Steigerung der Spannung
<b>Streckspannung</b>	$\sigma_y$	MPa	Spannung bei Streckdehnung
<b>Dehnung bei Zugfestigkeit</b>	$\varepsilon_m$	%	Dehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit
<b>Zugfestigkeit</b>	$\sigma_m$	MPa	Spannung beim ersten Spannungsmaximum im Verlauf des Zugversuchs
<b>Bruchdehnung</b>	$\varepsilon_b$	%	Dehnung, bevor ein Abfall der Spannung auf $<10 \%$ der Zugfestigkeit, oder gleich $10 \%$ , wenn der Bruch vor Erreichen der Streckdehnung erfolgt
<b>Bruchspannung</b>	$\sigma_b$	MPa	Spannung, bei der die Probe bricht

Diese Kennwerte liefern wichtige Erkenntnisse über das Festigkeits- und Dehnungsverhalten der untersuchten Materialien und sind von zentraler Bedeutung für die Spezifikation von Kunststoffen, die Berechnung von Formteilen unter kurzzeitiger Belastung, sowie in der Qualitätskontrolle. [7]

Neben den charakteristischen Spannungs- und Dehnungswerten wurde auch der Elastizitätsmodul  $E_t$ , häufig auch nur als E-Modul bezeichnet, ermittelt. Dieser wurde rechnergestützt mittels linearem Regressionsverfahren im Dehnungsintervall von  $0,05$  und  $0,25 \%$  berechnet und stellt ein Maß für die Steifigkeit eines Werkstoffs dar. Ein Werkstoff mit einem hohen E-Modul weist gegenüber einem Werkstoff mit niedrigerem E-Modul eine geringere elastische Verformung bei gleicher Belastungshöhe auf.

Bei den Spannungs- und Dehnungswerten handelt es sich um die technische Spannung und die technische Dehnung, was bedeutet, dass die ermittelten Werte auf den Anfangsquerschnitt bzw. die Anfangslänge des Probekörpers bezogen werden. [2]

Zur Berechnung der Kennwerte wurden die folgenden Gleichungen verwendet:

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

**Formel 1:** Elastizitätsmodul [26]

Dabei ist:

$E_t$ .....der Elastizitätsmodul in MPa

$d\sigma/d\varepsilon$ ...die Steigung der Regressionsgeraden in MPa

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

**Formel 2:** Spannungswerte [26]

Dabei ist:

$\sigma$ ..... der Spannungswert in MPa

F..... die gemessene Kraft in N

A..... die Anfangsquerschnittsfläche des Probekörpers in mm<sup>2</sup>

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}$$

**Formel 3:** Dehnungswerte [26]

Dabei ist:

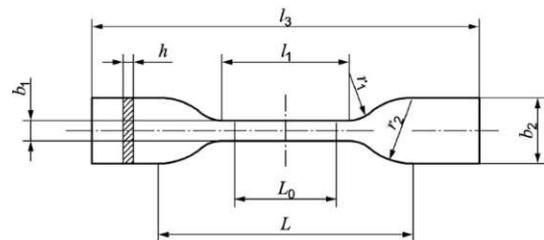
$\varepsilon$ .....Dehnungswert als dimensionsloses Verhältnis oder in Prozent (%)

$L_0$ .....Messlänge des Probekörpers in mm

$\Delta L_0$ ....die Verlängerung des Probekörpers zwischen den Messmarken in mm

Die Ermittlung der Zugeigenschaften erfolgte gemäß DIN EN ISO 527. [26], [27] Verwendet wurde der Probekörpertyp 5A, welcher in DIN EN ISO 527-2 definiert ist. Die Probekörper wurden spritzgegossen oder aus heißgepressten Platten ausgestanzt. Eine Darstellung sowie die zugehörigen Abmessungen des Prüfkörpertyps sind in Abbildung 38 ersichtlich.

Variable	Maße in mm
<b>Gesamtlänge <math>l_3</math></b>	$\geq 75$
<b>Breite an den Enden <math>b_2</math></b>	$12,5 \pm 1$
<b>Länge des engen parallelen Teils <math>l_1</math></b>	$25 \pm 1$
<b>Breite des engen Teils <math>b_1</math></b>	$4 \pm 0,1$
<b>Kleiner Radius <math>r_1</math></b>	$8 \pm 0,5$
<b>Großer Radius <math>r_2</math></b>	$12,5 \pm 1$
<b>Anfangsabstand der Klemmen <math>L</math></b>	$50 \pm 2$
<b>Messlänge <math>L_0</math></b>	$20 \pm 0,5$
<b>Dicke <math>h</math></b>	$2 \pm 0,2$



**Abbildung 38:** Probekörpertyp 5A [27]

Zur Bestimmung des genauen Anfangsquerschnitts wurden die Breite  $b_1$  und die Höhe  $h$  vermessen. Vor der Prüfung wurden die Seiten des engen parallelen Teils des Probekörpers mit Schleifpapier der Körnung 320 geschliffen. Ziel dieser Maßnahme war es, den Einfluss möglicher Oberflächendefekte, die durch die Entnahme aus dem Spritzgusswerkzeug oder das Ausstanzen entstehen können, auf die Messergebnisse auszuschließen oder zumindest zu minimieren. Bei der Versuchsdurchführung wurde bei der Ausrichtung von spritzgegossenen Proben darauf geachtet, dass der entfernte Anguss am oberen Ende des Zugstabs lag, um mögliche Einflüsse, bedingt durch die Ausrichtung, auszuschließen.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Versuche mit der Zugprüfmaschine Z050 (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Deutschland) durchgeführt. Die Traversengeschwindigkeit betrug 20 mm/min und die Messdaten wurden mit der Prüfsoftware testXpert II (v.3.6) erfasst. Es wurden mindestens acht Proben geprüft.

### 2.2.5.2 Schlagzugversuch

Zur Bestimmung der Schlagzugzähigkeit der untersuchten Materialien wurden Schlagzugversuche durchgeführt. Das Verfahren findet Anwendung zur Untersuchung der Sprödigkeit und Zähigkeit von Prüfkörpern unter festgelegten Prüfbedingungen. Im Gegensatz zu Zugversuchen wird der Prüfkörper bei Schlagzugversuchen mit einer vergleichsweise hohen Verformungsgeschwindigkeit durch einen Schlag belastet. Wie in Abschnitt 2.2.3 erwähnt, handelt es sich aufgrund der hohen Verformungsgeschwindigkeit hierbei um ein dynamisches Prüfverfahren. Die Belastung führt zu einem Bruch des Probekörpers, wobei die aufgenommene Schlagarbeit erfasst wird, welche der kinetischen Energie entspricht, die vom Pendel abgegeben wird. Da neben den Eigenschaften des untersuchten Materials auch die Gestaltung des Formteils, die Verarbeitungsbedingungen bei der Herstellung, die Beanspruchungsgeschwindigkeit sowie die Temperatur eine entscheidende Rolle spielen, können die gewonnenen Messwerte nicht als Berechnungskennwerte für beliebige Formteile herangezogen werden. Schlagzugversuche eignen sich jedoch, um in der Produktion die Gleichmäßigkeit der Verarbeitungsbedingungen zu überwachen. [7]

Der Schlagzugversuch liefert als Messergebnisse die Kerb-Schlagzugzähigkeit  $a_{tN}$  des gekerbten Probekörpers, welcher in  $\text{kJ/m}^2$  berechnet wird. In weiterer Folge wird diese als Schlagzugzähigkeit bezeichnet. Die Berechnung der Schlagzugzähigkeit erfolgt aus der verbrauchten, korrigierten Schlagarbeit, welche aus Formel 4 resultiert und den Abmessungen der ursprünglichen Querschnittfläche zwischen den beiden Kerben der Probe.

$$E_c = E_s - E_q$$

**Formel 4:** Korrigierte Schlagarbeit [28]

Dabei ist:

$E_c$ ...korrigierte Schlagarbeit in J

$E_s$ ...beim Aufprall verbrauchte Schlagarbeit in J

$E_q$ ...die Schleudrarbeit infolge der plastischen Verformung und der kinetischen Energie des Querjochs in J

Die Formel zur Berechnung der Schlagzugzähigkeit lautet wie folgt:

$$a_{tn} = \frac{E_c}{x \times h} \times 10^3$$

**Formel 5:** Kerb-Schlagzugzähigkeit [28]

Dabei ist:

$a_{tN}$ ...Kerb-Schlagzugzähigkeit in  $\text{kJ/m}^2$

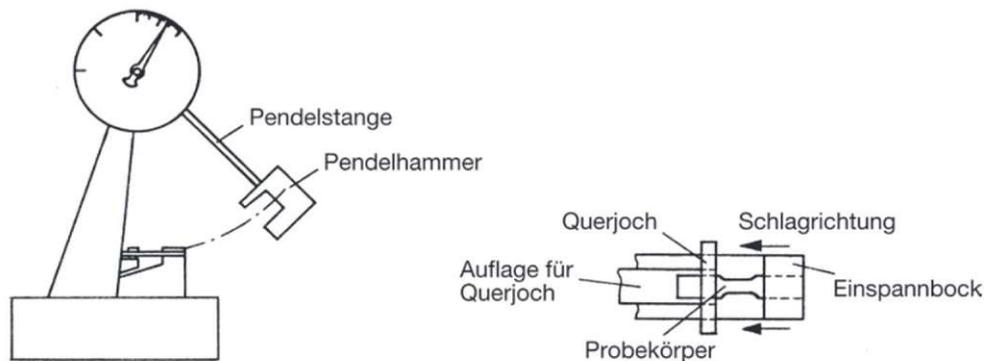
$E_c$ ...die korrigierte Schlagarbeit in J

$x$ ...Abstand zwischen den Kerben in mm

$h$ ...die Dicke des schmalen, parallelen Teils des Probekörpers in mm

Die Durchführung der Schlagzugversuche erfolgte gemäß DIN EN ISO 8256. [28] Je nach Art der Einspannung der Probe ist zwischen Verfahren A und B zu unterscheiden. In der vorliegenden Arbeit wurden Versuche entsprechend Verfahren A durchgeführt, bei dem der

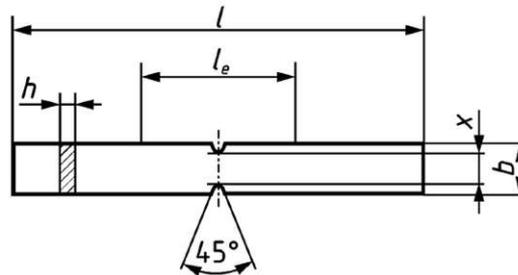
Probekörper stationär eingespannt wird. Ein Ende des Probekörpers wird am Rahmen befestigt, während das andere Ende vom Querjoch gehalten wird. Eine schematische Darstellung der Prüfanordnung ist in Abbildung 39 ersichtlich.



**Abbildung 39:** Schematische Prüfanordnung Schlagzugversuche (Verfahren A) [7]

Die untersuchten Probekörper wurden spritzgegossen oder aus heißgepressten Platten ausgestanzt. Verwendet wurde der Probekörpertyp 1, welcher in der Norm DIN EN ISO 8256 definiert ist. Eine Darstellung sowie die zugehörigen Abmessungen dieses Prüfkörpertyps sind in Abbildung 40 ersichtlich.

Abmessungen	Maße in mm
<b>Länge <math>l</math></b>	$80 \pm 2$
<b>Einspannlänge <math>l_e</math></b>	$30 \pm 2$
<b>Breite <math>b</math></b>	$10 \pm 0,2$
<b>Vorzugswert für das Maß <math>x</math></b>	$6 \pm 0,2$
<b>Dicke <math>h</math></b>	$\leq 4 \pm 0,2$



**Abbildung 40:** Prüfkörpertyp für Schlagzugversuche [28]

Die Probekörper wurden mit Hilfe der Kerbmaschine – CEAST Notch-vis (INSTRON, Illinois Tool Works Inc., USA) – gekerbt, welches eine lineare Messerschneidetechnik verwendet. Geprüft wurden mindestens zehn Proben. Für die Versuchsdurchführung wurde die Pendelschlagwerk-Prüfmaschine – CEAST 9050 (INSTRON, Illinois Tool Works Inc, USA) – verwendet, wobei die Masse des Querjochs 15 g und das Nenn-Arbeitsvermögen des Pendels 2 J betrug.

### 3 Ergebnisse

Die Messergebnisse aller Versuchsreihen sind im Anhang in tabellarischer Form für die jeweiligen Materialserien der beiden Versuchsgruppen separat zusammengefasst. Zur Darstellung und zum Vergleich einzelner Materialien wird auf die direkte und vollständige Angabe der Werte weitestgehend verzichtet. Stattdessen wird an dieser Stelle auf die entsprechenden Tabellen im Anhang verwiesen. Im Fließtext enthaltene Messwerte wurden zur besseren Lesbarkeit weitestgehend in gerundeter Form angeführt.

Die nachfolgenden Diagramme wurden mit Origin 2024 erstellt, wobei die dargestellten Messwerte aus den arithmetischen Mittelwerten gebildet wurden. Die ermittelten Standardabweichungen sind ergänzend dazu enthalten.

Aufgrund der Vielzahl verschiedener Materialien werden zur besseren Lesbarkeit in den Kapiteln 3.3.1 und 3.4.1, welche die Bechermaterialien behandeln, Kurzformen verwendet. Die Ergebnisse werden nach Materialien gegliedert, weshalb bei der Kurzform nur hinsichtlich der Waschbehandlung unterschieden wird. Dadurch ergeben sich für verschiedene Materialien dieselben Bezeichnungen. Tabelle 22 gibt einen Überblick zu den Materialien der Becherguppe und den verwendeten Abkürzungen. Die verschiedenen Verarbeitungsstufen haben die Bezeichnung 0er, 1er, 3er und 5er Serie, wobei die 0er Serie den Ausgangszustand darstellt.

**Tabelle 22:** Kurzformen der untersuchten Materialien

Material	Waschparameter	Kurzform
PP tgz & PP spg (Flakes)	60 °C H <sub>2</sub> O	V1
PP tgz & PP spg (Flakes)	80 °C H <sub>2</sub> O	V2
PP tgz & PP spg & PS tgz (Flakes)	60 °C NaOH	V3
PP tgz & PP spg & PS tgz (Flakes)	80 °C NaOH	V4
Referenz Industrie: PP Becher tgz (Fa.Greiner)	-	RI1
Referenz Industrie: PS Flakes tgz (Fa.Viscotec)	-	RI2
Referenz Industrie: PS Regranulat tgz (Fa.Viscotec)	-	RI3

#### 3.1 Ergebnisse Sortierung

Die Zusammensetzung der PS- und PP Flakes wurde durch manuelle Sortierung ermittelt. Dabei ist zu beachten, dass von den PP-Flakes jeder Waschbehandlung jeweils eine Stichprobe von etwa 50 g entnommen und sortiert wurde, was etwa 10 % der weiterverarbeiteten Materialmenge der jeweiligen Serie entspricht. Die Ergebnisse sind daher lediglich als Indikation der tatsächlichen Zusammensetzung zu verstehen.

Neben den technischen Eigenschaften stellt auch das optische Erscheinungsbild ein relevantes Qualitätsmerkmal eines Rezyklats dar, wobei weiße Rezyklate derzeit eine knappe Verfügbarkeit aufweisen. [29]

Bei der Abscheidung der PS Flakes zeigte sich, dass eine längere Verweildauer und eine gute Benetzung, welche durch mehrfaches Durchmischen erreicht wurde, notwendig waren, um die

Abtrennung der PS Flakes (Sinkfraktion) von der Schwimmfraktion zu erreichen. Weiters war der Materialoutput der PS Flakes deutlich geringer. Dieser lag bei 79 %, verglichen zu 95 % bei der Dichteabscheidung der PP Flakes. Es wird vermutet, dass sich in der abgetrennten Schwimmfraktion (21 %) ebenfalls PS Anteile befanden, die gemeinsam mit dem Fremdmaterial abgetrennt wurden. Diese Fraktion wurde im weiteren Prozess nicht verarbeitet. Dies hatte zur Folge, dass etwa 50 % mehr Ausgangsmaterial benötigt wurde, um ausreichend Material für die Probenherstellung zu generieren. Tabelle 23 gibt einen kompakten Überblick zum durchschnittlichen Output der Materialtypen mit den Anteilen der Schwimm- und Sinkfraktionen. Die Werte stellen Mittelwerte, bestehend aus den jeweiligen Serien der Materialien PP und PS, dar.

**Tabelle 23:** Output Schwimm-Sink-Verfahren

Durchschnittsmengen	PP Flakes (tgz/spg)	PS Flakes (tgz)
Inputmenge Wasserbad	514,5 g	760,2 g
Menge Schwimmanteil	489,3 g	158,7 g
Menge Sinkanteil	25,2 g	601,5 g
Schwimmanteil [wt.%]	95 %	21 %*
Sinkanteil [wt.%]	5 %	79 %

*\*gewisser PS-Anteil vermutlich enthalten, welcher im Zuge der Separierung gemeinsam mit dem Fremdmaterial (Schwimmfraktion) abgetrennt wurde*

Bei der Sortierung wurde nach den folgenden Fraktionen differenziert:

**PP Flakes:**

- „transparent“
- „weiß“
- „bedruckt“
- „etikettiert“ (respektive „in-mold labeled“)
- „bunt“ (vollständig eingefärbt)
- „Folien“

**PS Flakes:**

- „transparent“
- „weiß“
- „etikettiert“
- „bunt“ (bedruckt und vollständig eingefärbt)
- „Folien“
- „Aluminium“
- „nicht identifiziert“

Der Unterschied in der Kategorisierung kam dadurch zustande, dass im Fall der PP Flakes ein höherer Anteil an vollständig gefärbten Flakes enthalten war. Im Fall der PS Flakes wurden in der Kategorie „bunt“ die bedruckten und vollständig eingefärbten Flakes zusammengefasst, da in den PS Flakes nur geringfügig vollständig eingefärbte PS Flakes enthalten waren. Der Anteil innerhalb der Fraktion „bunt“ lag deutlich unterhalb von 5 %. Im Fall der spritzgegossenen PP Flakes sind unter der Kategorie „etikettiert“ „in-mold labeled“ Flakes zu verstehen.

Abbildung 67 und Abbildung 68 im Anhang veranschaulichen die sortierten Fraktionen der beiden PS Serien. Ergänzend dazu sind von allen Serien der Waschversuche Probekörper (Zugstäbe oder Schlagzugproben) in den vier untersuchten Verarbeitungsstufen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die farbliche Zusammensetzung der Flakes Einfluss auf die Farbgebung verarbeiteter Probekörper hat, welche mit zunehmender Verarbeitung homogenisiert wird. So

haben einzelne Probekörper der 0er Stufe oftmals eine unterschiedliche farbliche Erscheinung, welche zunehmend abnimmt, wie auch die generelle Ausprägung der Farbintensität. In den nachfolgenden Abbildungen ist zur besseren Übersicht die Beschriftung der Massenanteile ohne Kommastellen angeführt, und Massenanteile kleiner 1 % verbleiben unbeschriftet.

### 3.1.1 PP Flakes

Abbildung 41 zeigt die Zusammensetzungen der Serien der tiefgezogenen und spritzgegossenen PP Flakes. Beim Vergleich der beiden Materialtypen zeigen sich Unterschiede, was die Zusammensetzung der Serien betrifft und nicht ursächlich mit der Waschbehandlung in Verbindung steht. So zeigen sich beispielsweise unterschiedliche Anteile an transparenten, weißen oder etikettierten Flakes, die über die jeweiligen Serien des Materialtyps konstant sind, aber auf einem anderen Anteilsniveau gegenüber dem anderen Materialtyp sind.

#### PP Flakes tiefgezogen

Der Anteil an **Folien** und **bunten** Flakes ist in allen vier Serien auf einem sehr ähnlichen Niveau. Im Fall der Wasserwäsche zeigt sich in der 80 °C Wäsche ein höherer Anteil an **etikettierten** Flakes gegenüber der 60 °C Wäsche. Dies deckt sich nicht mit den Ergebnissen der Natronlauge Wäsche und auch nicht mit denen der spritzgegossenen PP Flakes. Demgegenüber zeigt sich in allen anderen Fällen ein geringerer Anteil etikettierter Flakes bei höheren Temperaturen.

Der höhere Anteil an etikettierten Flakes wird auf die Zusammensetzung der Stichprobe zurückgeführt, da alle anderen Vergleiche den gegenteiligen Effekt bestätigen.

Der Anteil an **bedruckten** Flakes nimmt mit höherer Temperatur tendenziell ab und ist bei Verwendung von Natronlauge als Waschmedium geringer. Der Anteil an **weißen** Flakes zeigt bei Verwendung von Wasser als Waschmedium und unterschiedlichen Temperaturen keine wesentliche Veränderung. Bei Natronlauge hingegen steigt der Anteil an weißen Flakes mit der Temperatur an, was mit einem reduzierten Anteil an etikettierten und bedruckten Flakes einhergeht. Es scheint daher evident, dass durch die Verwendung von Natronlauge und höheren Temperaturen Etiketten und Druckfarben effektiver entfernt werden.

Der Anteil an **transparenten** Flakes präsentiert keine wesentlichen Unterschiede, welche mit den Waschparametern korrelieren.

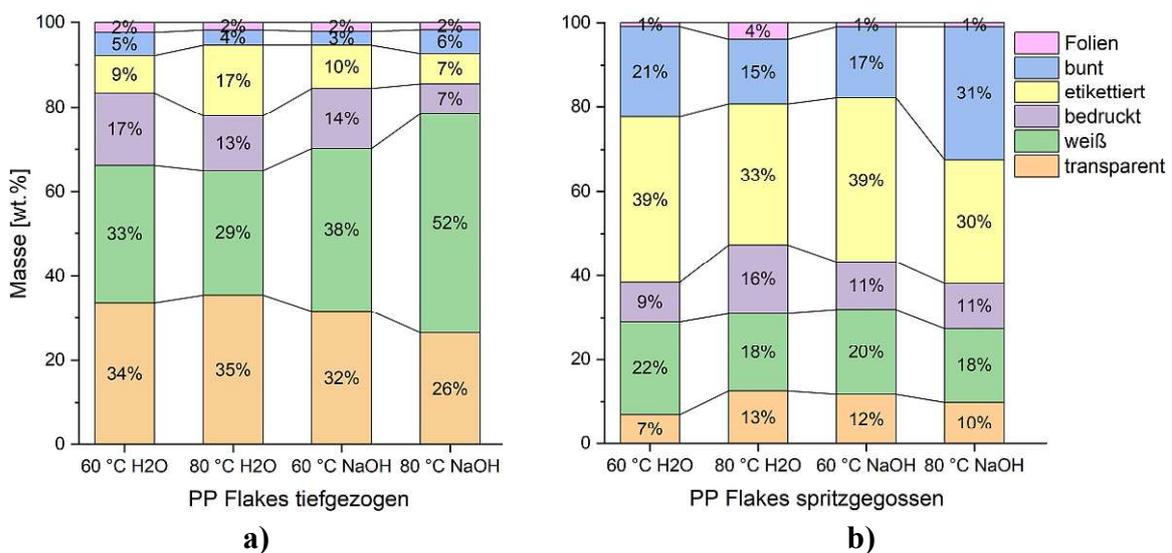
#### PP Flakes spritzgegossen

Der Anteil an **Folien** zeigt in allen Serien mit Ausnahme der Wasserwäsche mit 80 °C ein ähnliches Niveau. Der **bunte** Anteil schwankt ohne klare Tendenz in den verschiedenen Serien. Der Anteil an **etikettierten** (respektive „in-mold labeled“) Flakes nimmt bei höheren Temperaturen ab. Dieser Effekt verstärkt sich bei Verwendung von Natronlauge als Waschmedium. Neben einer besseren Entfernung von Etiketten bzw. „in-mold Labels“ zeigte sich nach der Waschbehandlung mit den Waschparametern 80 °C NaOH eine deutlich bessere Entfernung der Farben auf den Labels, was auch bei den tiefgezogenen PP Flakes der Fall war. Dies geht aus dem Vergleich der Flakes mit den Waschbehandlungen 60 °C H<sub>2</sub>O und 80 °C NaOH in Abbildung 42 deutlich hervor.

Im Fall der **bedruckten** Flakes ist kein Trend zu erkennen, da der Anteil im Fall der Wasserwäsche mit höherer Temperatur zunimmt und im Fall von Natronlauge gleich ausfällt. Ähnlich verhält sich der Anteil der **transparenten** Fraktion. Der Anteil an **weißen** Flakes liegt in allen vier Serien auf einem ähnlichen Niveau, wobei das Niveau bei den Serien mit höheren Temperaturen niedriger ausfällt.

Bei der Betrachtung der Probekörper aus spritzgegossenen PP (siehe Abbildung 73 ff.) ist ein klarer Unterschied in der farblichen Erscheinung festzustellen. So weisen die Materialien mit 80 °C NaOH Wäsche eine geringere Farbintensität auf, was auf eine effektivere Entfernung von oberflächlichen Verunreinigungen wie Pigmentreste oder Druckfarben hindeutet. Laut Literatur tritt bei PP in Natronlauge mit zunehmender Temperatur ein geringer, aber messbarer Massenverlust auf, der auf oberflächlichen Abtrag hindeutet. Die Kombination mit höheren Temperaturen könnte dabei zu einer gründlicheren Reinigung geführt haben als bei einer Waschbehandlung mit Wasser oder 60 °C NaOH. [30]

Weiters ist anhand der Probekörper zu erkennen, dass diese mit zunehmender Extrusionsanzahl eine dunkle Färbung aufweisen, die im Vergleich zu der tiefgezogenen PP Fraktion stärker ausfällt, und sich durch thermo-mechanische Degradation, bedingt durch die Mehrfachverarbeitung, erklären lässt. [12] Ein weiterer möglicher Einflussfaktor könnte in einer potenziell anderen Farbgebung für „in-mold Labels“ liegen, welche für Spritzgussanwendungen verwendet werden und zu einer stärkeren, degradationsbedingten Dunkelfärbung beitragen. Das würde erklären, warum die Dunkelfärbung bei spritzgegossenen PP intensiver ausfällt. Es ist weiters ersichtlich, dass die Dunkelfärbung bei jenen Waschbehandlungen mit niedrigerer Waschtemperatur und Wasser als Waschmedium tendenziell ausgeprägter sind, was darauf hindeutet, dass „in-mold Labels“ bzw. Farbpigmente unter diesen Waschbedingungen weniger effektiv entfernt wurden, und somit bei der nachfolgenden Mehrfachverarbeitung einen stärkeren Einfluss auf die Farbveränderung nehmen konnten. Dies deckt sich mit den Beobachtungen während der Sortierung und bei Betrachtung der Flakes, wie in Abbildung 42 dargestellt.



**Abbildung 41:** Zusammensetzung PP Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen anhand manueller Sortierung: a) PP tiefgezogen, b) PP spritzgegossen



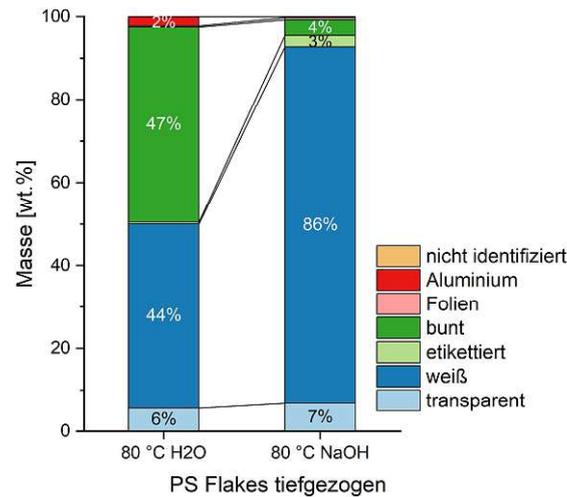
Abbildung 42: PP Flakes spritzgegossen nach Schwimm-Sink: a) 80 °C H<sub>2</sub>O, b) 80 °C NaOH

### 3.1.2 PS Flakes

Die Ergebnisse der Sortierung der beiden PS Serien (80 °C H<sub>2</sub>O-Wäsche & 80 °C NaOH-Wäsche) sind in Abbildung 43 dargestellt. In der Serie mit NaOH als Waschmedium zeigt sich im Vergleich zu der Wäsche mit Wasser ein deutlich höherer Anteil an **weißen** Flakes (86 % gegenüber 44 %). Dementsprechend fällt der Anteil an **bunten** Flakes mit 4 % deutlich geringer aus als in der Serie mit Wasserwäsche (47 %). Die farbliche Erscheinung der beiden Serien ist auch in Abbildung 44 zu sehen, wobei der höhere Anteil an weißen Flakes in der Serie mit NaOH-Waschbehandlung erkennbar ist. Der Anteil an **transparenten** Flakes und **Folien** ist nahezu gleich. Es fällt weiters auf, dass der Anteil an **etikettierten** Flakes in der Serie mit NaOH-Wäsche höher liegt (0,5 % gegenüber 2,3 %). Der **Aluminiumanteil** liegt in der NaOH-Serie mit 0,2 % deutlich unter jenem der Serie mit Wasserwäsche (2,1 %).

Der geringere Anteil an Aluminium in der NaOH-Serie lässt sich auf die aluminiumlösende Wirkung wässriger Natronlauge zurückführen, durch die der Großteil des enthaltenen Aluminiums gelöst und ausgetragen wird. [31] Der höhere Anteil an etikettierten Flakes in dem Material, welches mit Natronlauge gewaschen wurde (0,5 % gegenüber 2,8 %), erscheint nicht plausibel, da bei Verwendung von Natronlauge von einer höheren Reinigungswirkung ausgegangen wird. Es wird vermutet, dass das Ergebnis auf eine unterschiedliche Zusammensetzung der Flakes bereits vor der Waschbehandlung zurückzuführen ist. Die höhere Reinigungswirkung resultiert aus dem deutlich größeren Anteil an weißen Flakes sowie dem niedrigen Anteil an Aluminium. Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Sortierung der PS-Flakes einen deutlichen Einfluss des Waschmediums auf deren Zusammensetzung.

Während bei den aus PP Flakes hergestellten Probekörpern eine Färbung mit steigender Extrusionsanzahl zu beobachten war, ist dieser Effekt bei den PS-Proben nicht erkennbar, was auf eine höhere thermo-mechanische Stabilität von PS hindeutet (siehe Abbildung 77 ff.).



**Abbildung 43:** Zusammensetzung PS Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen anhand manueller Sortierung



**Abbildung 44:** PS Flakes im Wasserbad (Schwimm-Sink-Verfahren): a) 80 °C H<sub>2</sub>O, b) 80 °C NaOH

### 3.2 Ergebnisse thermische Analyse (DSC)

Zur Untersuchung und Bestimmung materialspezifischer Temperaturen, wie der Schmelz- und Kristallisationstemperatur, oder im Fall von PS der Glasübergangstemperatur, wurde die DSC-Analyse angewandt. Die aus den DSC-Kurven ermittelten Temperaturen sind in Tabelle 24 zusammengefasst. Die DSC-Kurven selbst sind im Anhang in Abbildung 64 bis Abbildung 66 dargestellt.

Für die tiefgezogenen PP Materialien wurde eine durchschnittliche Schmelztemperatur von 164,57 °C ermittelt. Die Kristallisationstemperatur liegt im Durchschnitt bei 126,15 °C. Mit Ausnahme von dem Material mit der 80 °C H<sub>2</sub>O Waschbehandlung sind weiters schwach ausgeprägte Wärmetönungen sichtbar, welche im Durchschnitt bei 121,82 °C liegen. Dies deutet auf PE-LLD hin, dessen Schmelztemperatur sich im Bereich von 122 °C bis 124 °C befindet. [6]

Die durchschnittlich ermittelte Schmelztemperatur des spritzgegossenen PP liegt bei 163,05 °C und die Kristallisationstemperatur bei 127,35 °C. Auch hier gab es weitere schwach ausgeprägte Wärmetönungen in der Aufheizkurve, und zwar in diesem Fall bei allen vier Serien. Diese lagen im Durchschnitt bei 124,03 °C. Aufgrund der Schmelztemperatur ist gleichfalls von geringfügigen PE-LLD Verunreinigungen auszugehen.

Die untersuchten PS Flakes wiesen eine Glasübergangstemperatur im Bereich von 99,2 °C auf. In den DSC-Kurven waren keine identifizierbaren Anstiege, die auf Fremdmaterialien hindeuten, zu erkennen. Dies legt nahe, dass Fremdmaterialien, welche zu den Polyolefinen gehören, durch das Schwimm-Sink-Verfahren weitgehend entfernt werden konnten.

Im Zuge der manuellen Sortierung der verschiedenen Serien war jeweils ein gewisser Folienanteil enthalten, weshalb die in den DSC-Analysen von PP vorhandene Wärmetönungen, welche auf PE Verunreinigung hindeuten, schlüssig sind. Um die wahre Zusammensetzung der Stichproben abzubilden, wurde der Folienanteil beibehalten.

**Tabelle 24:** Auswertung der Abkühl- und zweiten Aufheizkurve von PP- und PS Flakes

Material	Schmelztemperatur [°C]	Kristallisations-temperatur [°C]	Glasübergangstemperatur [°C]
PP tgz 60 °C H <sub>2</sub> O	164,9	125,7	-
PP tgz 80 °C H <sub>2</sub> O	164,9	125,9	-
PP tgz 60 °C NaOH	164	126,5	-
PP tgz 80 °C NaOH	164,5	126,6	-
<b>Mittelwert</b>	<b>164,6</b>	<b>126,2</b>	
PP spg 60 °C H <sub>2</sub> O	162,9	127,5	-
PP spg 80 °C H <sub>2</sub> O	162,8	127,4	-
PP spg 60 °C NaOH	163,4	127,1	-
PP spg 80 °C NaOH	163,1	127,5	-
<b>Mittelwert</b>	<b>163,1</b>	<b>127,4</b>	
PS tgz 80 °C H <sub>2</sub> O	-	-	97,9
PS tgz 80 °C NaOH	-	-	100,5
<b>Mittelwert</b>			<b>99,2</b>

### 3.3 Ergebnisse rheologische Analyse

#### 3.3.1 Becher

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse nach Material und Verarbeitungsprozess gegliedert. Dabei werden die Materialserien mit den verschiedenen Waschparametervarianten und vorhandenen Referenzen aus der industriellen Aufbereitung gemeinsam präsentiert.

##### 3.3.1.1 MFR

#### PP Flakes (tiefgezogen) & PP Becher (tiefgezogen) (Fa. Greiner)

Behandelte Materialien in diesem Abschnitt:

<b>Material</b>	<b>Kurzform für Beschreibung</b>
PP tgz 60 °C H <sub>2</sub> O	V1
PP tgz 80 °C H <sub>2</sub> O	V2
PP tgz 60 °C NaOH	V3
PP tgz 80 °C NaOH	V4
Referenz Industrie: PP tgz Becher (Greiner)	RI1

Die Schmelze-Massefließrate der Materialien V1 bis V4 verändert sich über die vier Verarbeitungsstufen nur sehr geringfügig und bleibt auf einem stabilen Niveau, ohne signifikanten Anstieg. Im Ausgangszustand weisen diese Materialien einen durchschnittlichen Wert von etwa 16 g/10 min auf. Das Referenzmaterial hat mit 24 g/10 min demgegenüber einen deutlich höheren Ausgangswert.

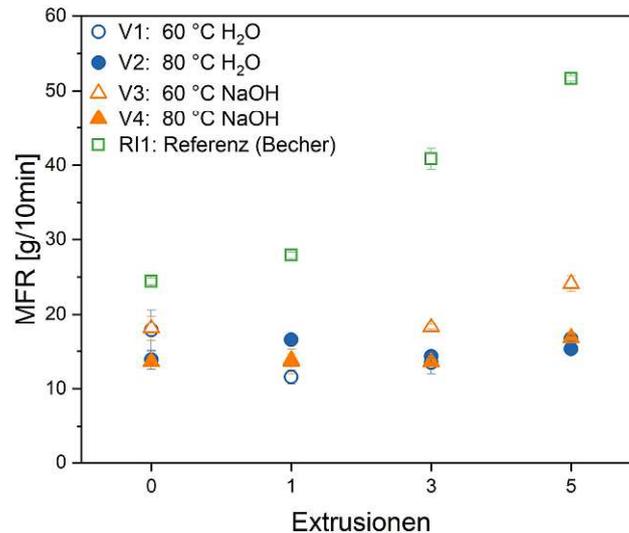
Im Vergleich zu handelsüblichen tiefgezogenen PP Rezyklaten, deren Werte üblicherweise bei 8 g/10 min oder darüber liegen, weisen die untersuchten Materialien relativ hohe Werte auf. [29] Um eine hohe Schmelzefestigkeit und einen stabilen Prozess zu gewährleisten, werden für das Tiefziehverfahren im Vergleich zu Verarbeitungsverfahren wie dem Spritzgießen deutlich niedrigere MFR Werte bevorzugt. [32] Typische Werte liegen in der Größenordnung von 1 bis 5 g/10 min. [33]

Nach der ersten Verarbeitung weisen, abgesehen von V2 und RI1, die Materialien einen geringfügig niedrigeren MFR-Wert auf, der in den Verarbeitungsstufen drei und fünf kontinuierlich ansteigt. Den höchsten Wert der Materialien der Waschversuche erzielt die 5er Serie von V3 (Waschparameter: 60 °C NaOH). Der MFR-Wert erreicht 24 g/10 min, was einen Anstieg von 33 % gegenüber dem Ausgangszustand bedeutet.

Das Referenzmaterial zeigt als einziges Material einen konstanten Anstieg des MFR-Wertes über die vier Verarbeitungsstufen und hat auch in allen Verarbeitungsstufen den höchsten MFR-Wert. Dieser erreicht sein Maximum mit 52 g/10 min nach der fünften Extrusion, womit er sich gegenüber dem Ausgangszustand mehr als verdoppelt. Im Vergleich dazu liegt der MFR-Wert der Materialien V1 bis V4 nach der fünften Verarbeitung im Durchschnitt um nur 15 % zu.

Insgesamt zeigen die Materialien der Waschbehandlung keine große Veränderung der Messwerte, die auf einen Abbau der Materialien hindeuten. Nur die Ergebnisse des Referenzmaterials lassen auf ein Abnehmen der Molmasse schließen. [12] In den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Streuung der Messergebnisse mit zunehmender Anzahl an Extrusionen tendenziell abnimmt, was mit einer steigenden Homogenisierung des Materials durch die Verarbeitung zu erklären ist.

Bei der Interpretation der Messwerte ist zu berücksichtigen, dass die Genauigkeit der Messergebnisse, bedingt durch das manuelle Abtrennen des Stranges, mit zunehmenden MFR-Werten abnimmt. Es können vermehrt Messunschärfen auftreten, weshalb Werte ab etwa 40 g/10 min nur mehr als Indikation angesehen werden, was auf die Ergebnisse des Referenzmaterials nach der dritten und der fünften Extrusion zutrifft.



**Abbildung 45:** MFR PP tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen und industriell hergestellten Rezyklat Becher (Fa. Greiner)

### PP Flakes (spritzgegossen)

Behandelte Materialien in diesem Abschnitt:

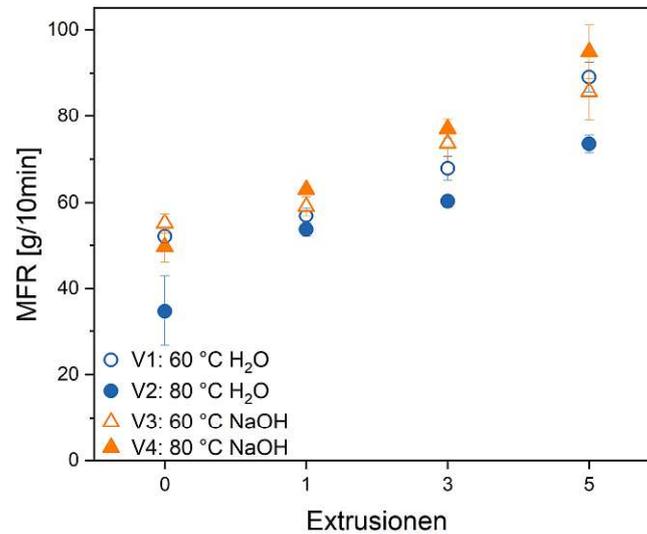
Material	Kurzform für Beschreibung
PP spg 60 °C H <sub>2</sub> O	V1
PP spg 80 °C H <sub>2</sub> O	V2
PP spg 60 °C NaOH	V3
PP spg 80 °C NaOH	V4

Alle Materialien zeigen einen konstanten Anstieg der MFR mit zunehmender Anzahl an Extrusionen. Im Ausgangszustand weisen die Materialien einen durchschnittlichen Wert von etwa 48 g/10 min auf. Im Zuge einer vergleichbaren Untersuchung wurde für recyceltes spritzgegossenes PP 64 g/10 min ermittelt. Verglichen mit tiefgezogenen Materialien sind deutlich höhere MFR Werte zu erwarten, da diese für den Prozess des Spritzgießens erforderlich sind und eine weite Bandbreite an MFR Werten abdecken. So werden zur Herstellung dünnwandiger Verpackungen MFR Werte von bis zu 100 g/10 min benötigt, um den Energiebedarf während der Herstellung zu reduzieren. [29]

Die niedrigste MFR erreicht die Serie V2 in allen Verarbeitungsstufen, weist aber mit einem Zuwachs von 111 % im Vergleich zum Ausgangszustand den stärksten Anstieg auf. Im Ausgangszustand ist die Schwankungsbreite jedoch auch am höchsten. Nach der fünften Extrusion hat es mit 74 g/10 min noch immer die niedrigste MFR. Die höchste MFR hat V4 ab der ersten Extrusion und verzeichnet einen Anstieg von 91 % bis zur fünften Extrusion gegenüber seinem Ausgangszustand. Insgesamt haben die Materialien mit Natronlauge Wäsche tendenziell einen höheren MFR als jene mit Wasserwäsche.

Die Ergebnisse signalisieren einen deutlichen Trend zu höheren MFR Werten, was auf eine Abnahme der Molmasse hindeutet. [12] Dies scheint im Zusammenhang mit einer möglichen Kettenverkürzung, bedingt durch die zunehmende Verarbeitungsanzahl, evident. Dies konnte für PP in [34], bedingt durch die Mehrfachverarbeitung, festgestellt werden. Bei den Ergebnissen gilt es, ähnlich wie schon bei den tiefgezogenen PP Materialien, zu

berücksichtigen, dass sehr hohe MFR Werte eine zunehmende Messunschärfe aufweisen, was, bedingt durch die geringeren Viskositäten beim Spritzguss, auf fast alle Messwerte zutrifft, die ab der ersten Verarbeitung allesamt oberhalb von 50 g/10 min liegen.



**Abbildung 46:** MFR PP spritzgegossen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen

### PS Flakes tiefgezogen & PS Flakes und Regranulat tiefgezogen (Fa. Viscotec)

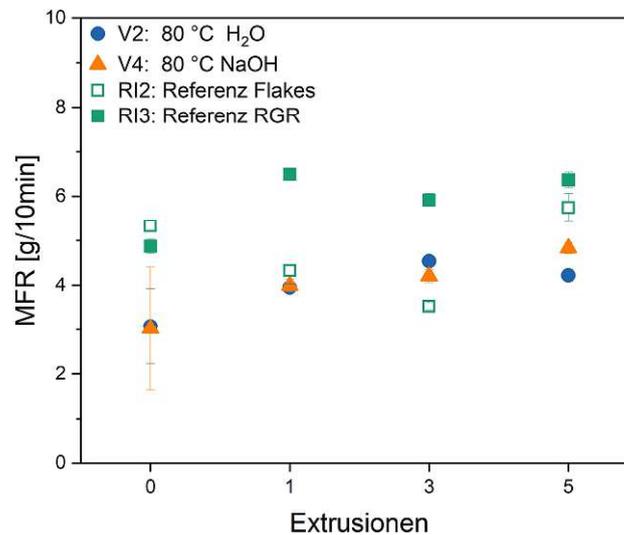
Behandelte Materialien in diesem Abschnitt:

Material	Kurzform für Beschreibung
PS tgz 80 °C H <sub>2</sub> O	V2
PS tgz 80 °C NaOH	V4
Referenz Industrie: PS tgz (Viscotec)	RI2
Referenz Industrie: PS tgz Regranulat (Viscotec)	RI3

Alle Materialien zeigen mit zunehmender Anzahl an Extrusionen einen Anstieg der MFR. Im Ausgangszustand haben die Fließraten von V2 und V4 mit etwa 3 g/10 min nahezu denselben Durchschnittswert. Einen ebenfalls ähnlichen Wert weisen die beiden Referenzmaterialien RI2 und RI3 im Ausgangszustand mit etwa 5 g/10 min auf. Damit liegen sie etwa 65 % über den Materialien des Waschversuchs. Die Werte befinden sich in einem ähnlichen Bereich, wie sie in Spezifikationen handelsüblicher PS Rezyklate zu finden sind. [35] Der Unterschied der MFR der Materialien des Waschversuchs und der Referenzmaterialien deutet darauf hin, dass diese Materialien nur bedingt vergleichbar sind.

Nach der ersten Extrusion zeigen alle Materialien, abgesehen von RI2, einen Anstieg von etwa 30 % des MFR-Wertes. Das Material RI2 hat demgegenüber einen um 19 % reduzierten MFR nach der ersten Verarbeitung. Nach der fünften Extrusion steigt der MFR-Wert aller Materialien im Vergleich zum Ausgangszustand. Am stärksten ist die Veränderung von V4 mit 60 % gegenüber der Ausgangsbasis, wobei das Material in der Ausgangsbasis eine sehr hohe Schwankungsbreite (47 %) aufweist, was den Anstieg relativiert. Am schwächsten ist der

Anstieg von RI2 mit einem 8 % Zuwachs. Die Materialien V2 und IR3 liegen nach der fünften Verarbeitung 37 % und 31 % über dem Ausgangswert. Die Ergebnisse der Waschversuche zeigen eine stärkere Erhöhung der MFR bei einer Waschbehandlung mit Natronlauge, was auf einen stärkeren Abbau hindeutet. Bei Betrachtung der Referenzmaterialien zeigt sich für das Regranulat mit Vakuumbehandlung im Vergleich zu den Flakes eine stärkere Erhöhung der MFR. Die Ergebnisse indizieren an, dass die Vakuumbehandlung einen gewissen Materialabbau verursacht.



**Abbildung 47:** MFR PS tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen sowie industriell aufbereitete Flakes und Regranulat (RGR) (Fa. Viscotec)

### 3.3.1.2 Frequency-Sweep

Zur besseren Übersicht sind in den Darstellungen jeweils nur Speicher- und Verlustmodule der 0er-Serien dargestellt, während die COPs aller Verarbeitungsstufen enthalten sind.

### PP Flakes (tiefgezogen) & PP Becher (tiefgezogen) (Fa. Greiner)

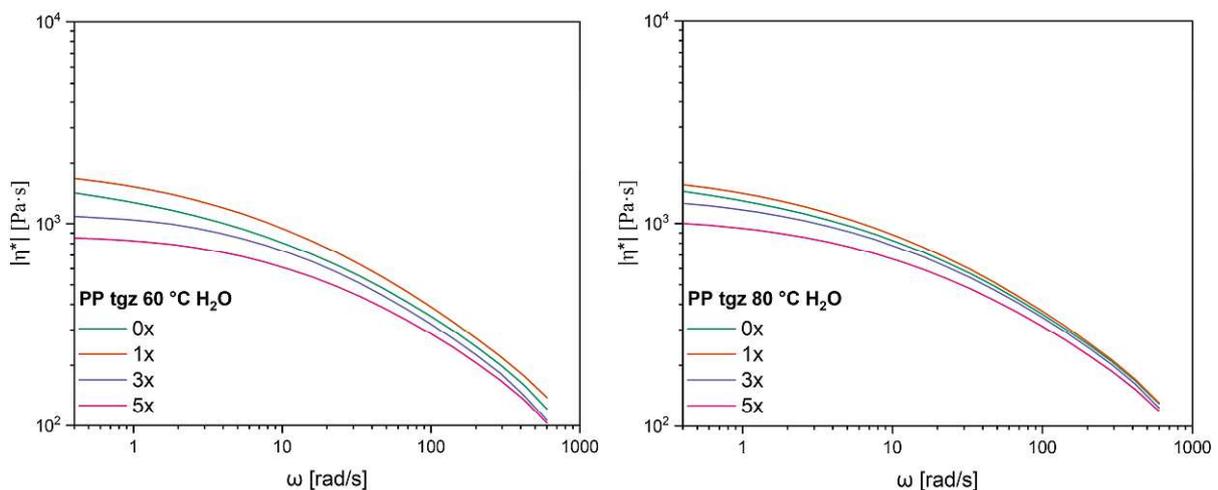
Behandelte Materialien in diesem Abschnitt:

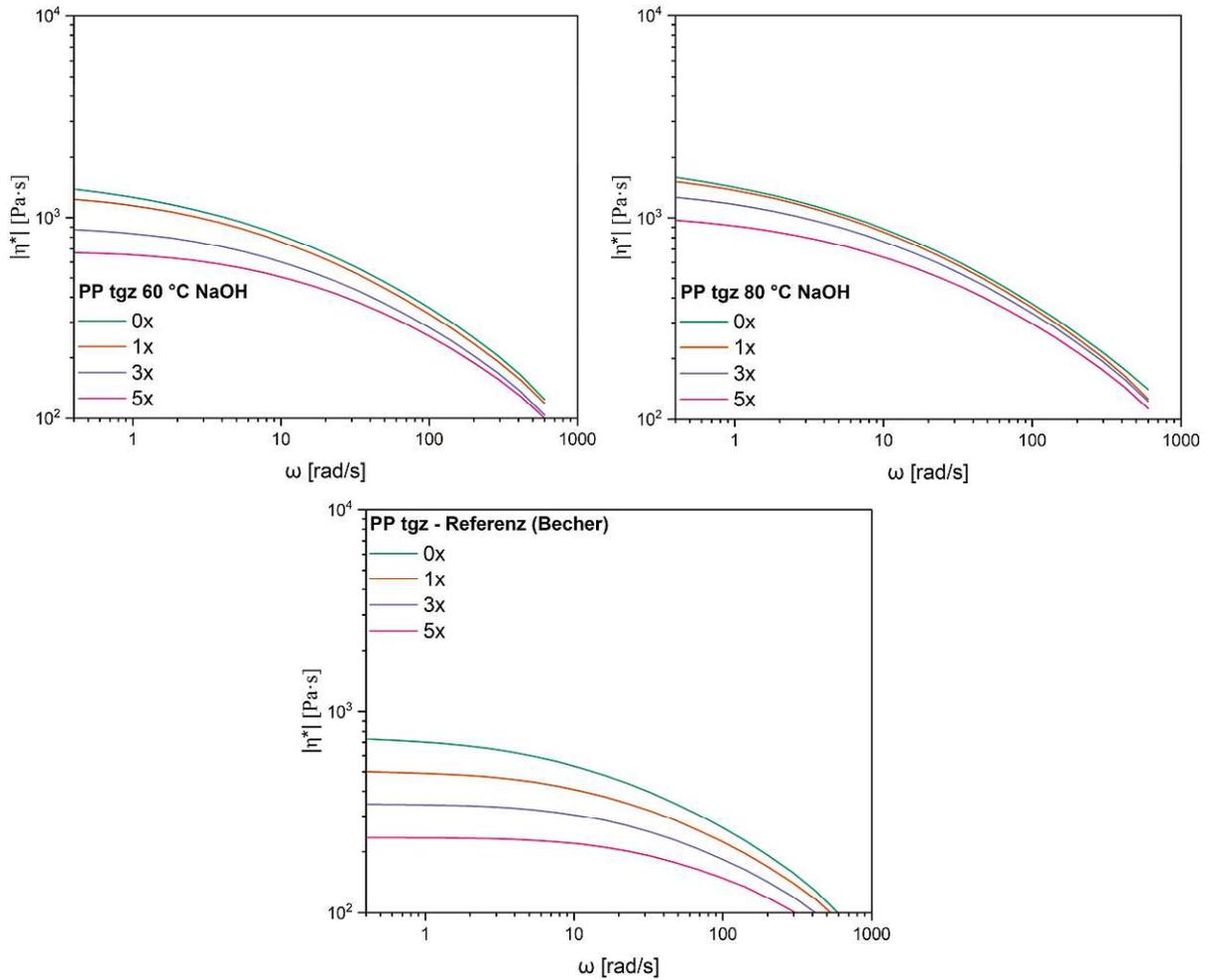
Material	Kurzform für Beschreibung
PP tgz 60 °C H <sub>2</sub> O	V1
PP tgz 80 °C H <sub>2</sub> O	V2
PP tgz 60 °C NaOH	V3
PP tgz 80 °C NaOH	V4
Referenz Industrie: PP tgz Becher (Greiner)	RI1

### Viskosität:

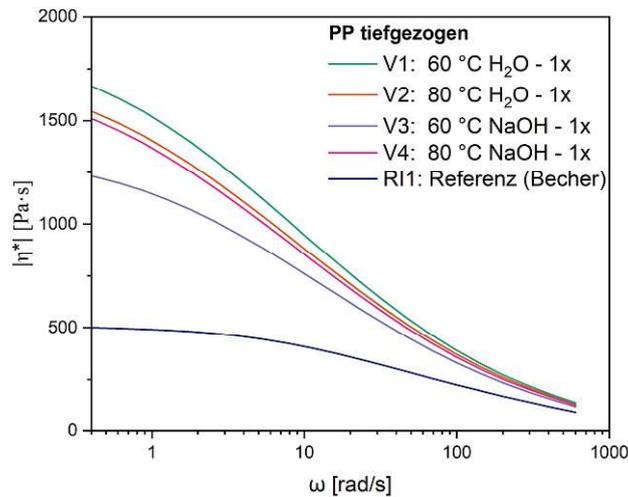
Abbildung 48 gibt die Verläufe der komplexen Viskositäten der einzelnen Materialien wieder. Weiters sind zum besseren Vergleich der Viskositäten der verschiedenen Waschbehandlungen und des Referenzmaterials zueinander die ersten Verarbeitungsstufen der fünf Materialien in Abbildung 49 dargestellt. Zum Vergleich wurde das einmal extrudierte Material herangezogen,

da durch die Verarbeitung eine gewisse Homogenisierung erzeugt wurde, während die Auswirkungen der Mehrfachverarbeitung jedoch noch nicht so stark zum Tragen kommen. Es ist zu erkennen, dass die Viskosität mit zunehmender Anzahl an Extrusionen tendenziell abnimmt, wobei die Materialien V1 und V2, welche Wasser als Waschmedium hatten, nach der ersten Extrusion einen leichten Anstieg verzeichnen. Im Fall von V1 deckt sich dies mit der Abnahme der MFR nach der ersten Extrusion. Es ist davon auszugehen, dass dies mit der stärkeren Inhomogenität ohne Verarbeitung der Flakes (0er Stufe) zusammenhängt. Anschließend nimmt auch die Viskosität dieser Materialien mit zunehmender Anzahl an Verarbeitungen ab. Besonders ausgeprägt sind die Unterschiede im niedrigen Frequenzbereich. Außerdem wird deutlich, dass die beiden Materialien V1 und V2 mit der Wasserwäsche durchschnittlich höhere Viskositätswerte über die gemessenen Kreisfrequenzen und Verarbeitungsstufen aufweisen. Die größeren relativen Veränderungen der Viskosität, bedingt durch die Mehrfachverarbeitung, sind bei den Materialien V3 und V4, mit Natronlauge als Waschmedium, zu beobachten, was vermutlich auf stärkere Degradation des Materials durch eine intensivere Waschbehandlung zurückzuführen ist. Die niedrigsten Werte der komplexen Viskosität verzeichnet das Referenzmaterial über alle Verarbeitungsstufen, was sich mit den Erkenntnissen der MFR Messungen deckt und auf einen stärkeren Abbau des Materials hindeutet, was in Zusammenhang mit einer höheren Beanspruchung in der industriellen Aufbereitung stehen kann. Die generelle Tendenz zur Abnahme der Viskosität ist durch die thermische und mechanische Scherbeanspruchung und einer damit verbundenen Materialdegradation während der Verarbeitung zu erwarten. Durch die Verarbeitung kann eine Reduktion der Molmasse auftreten, was sich besonders bei niedrigen Kreisfrequenzen zeigt, da hier die Veränderung der Kettenlänge eine größere Rolle spielt. Zusammenfassend deuten die Ergebnisse darauf hin, dass eine Wäsche mit Natronlauge und höheren Temperaturen zu einer stärkeren Beeinflussung der Viskositäten führen.





**Abbildung 48:** Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität - PP tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen und industriell hergestellten Rezyklat Becher (Fa. Greiner)



**Abbildung 49:** Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität - PP tiefgezogen - Gegenüberstellung der 1x extrudierten Serien der verschiedenen Waschbehandlungen und industriell hergestellten Rezyklat Becher (Fa. Greiner)

### Speicher- und Verlustmodul:

Die Verläufe von Speicher- und Verlustmodul sind in Abbildung 50 ersichtlich, ebenso wie die vorhandenen Schnittpunkte (COPs), wobei die genauen Werte der COPs in Tabelle 25 zusammengefasst sind.

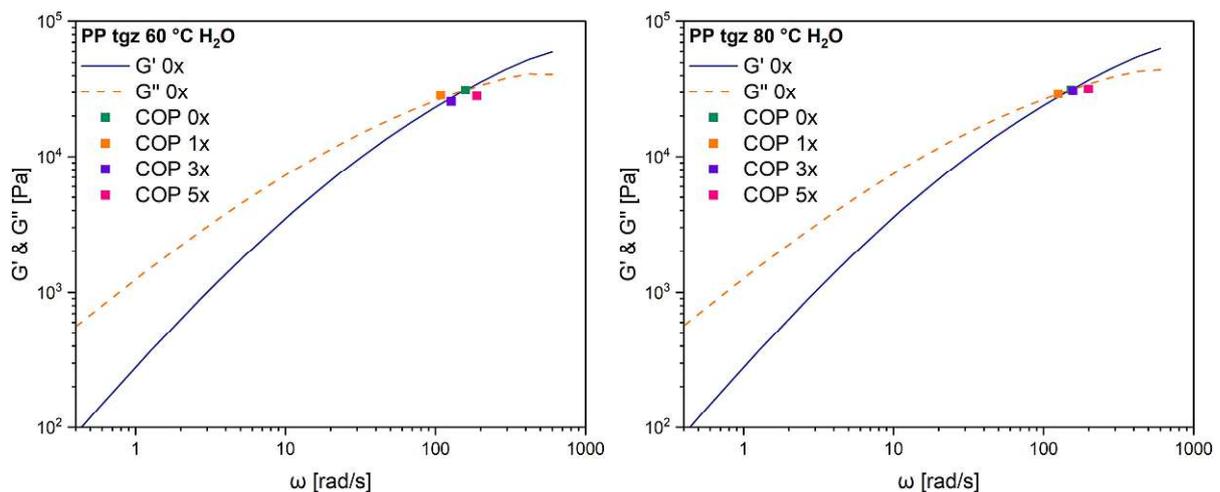
Es ist zu erkennen, dass sich der COP mit zunehmender Anzahl an Extrusionen tendenziell zu höheren Frequenzwerten verlagert, was auf eine Reduktion der Molmasse und eine Kettenverkürzung hindeutet. [23] Im Fall der Materialien mit Wasserwäsche ist allerdings nach der ersten Verarbeitung eine Verlagerung zu niedrigeren Frequenzen zu beobachten, was eine höhere Molmasse nach der ersten Verarbeitung indiziert. In weiterer Folge nimmt mit zunehmender Anzahl an Extrusionen auch die Molmasse dieser Materialien ab.

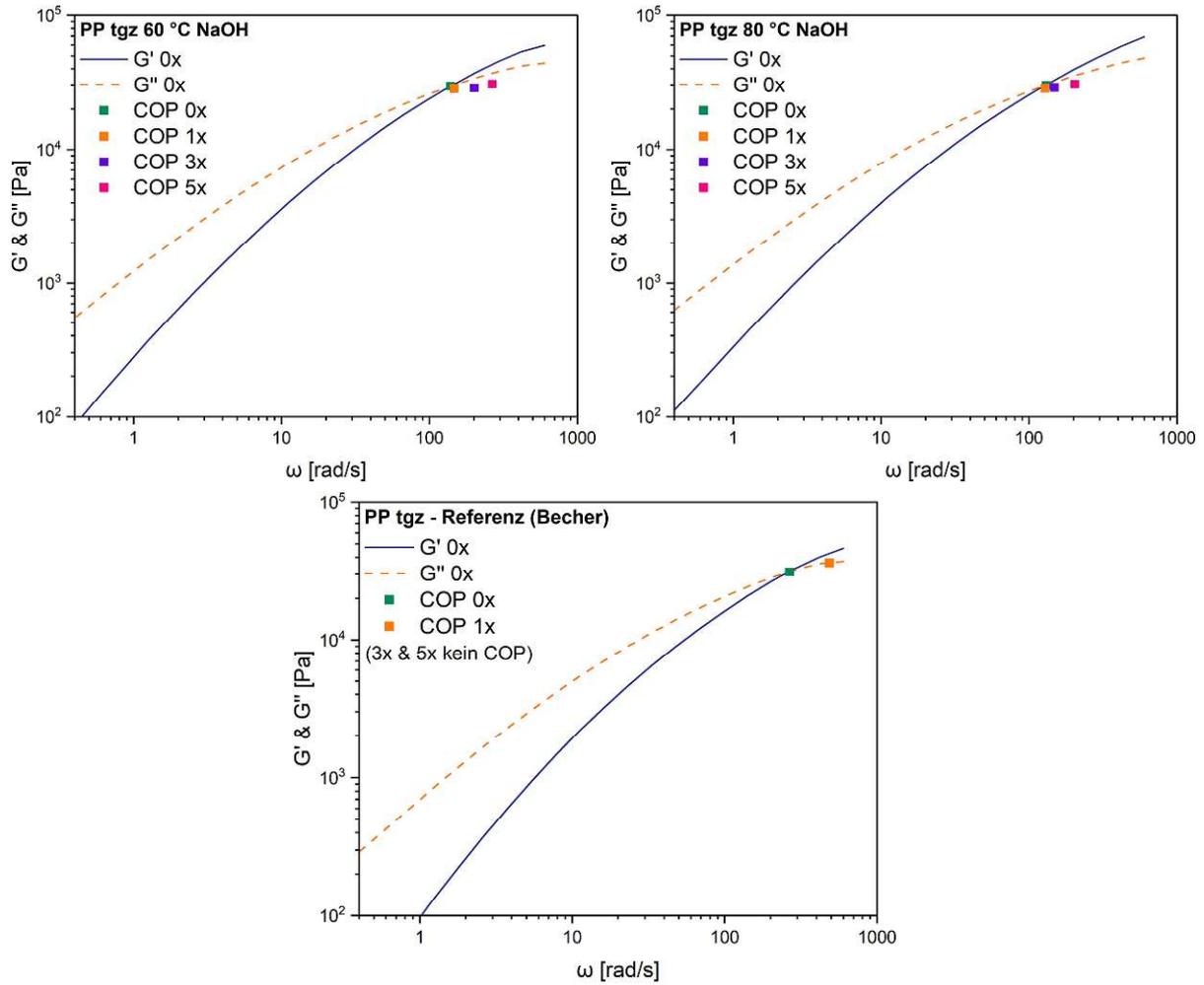
Das Verhalten der Materialien mit Natronlauge als Waschmedium ist konstant mit einer sukzessiven Verlagerung des COP zu höheren Frequenzen.

Die COPs des Referenzmaterials sind bei den höchsten Kreisfrequenzen zu finden, was bereits im Ausgangszustand auf eine vergleichsweise niedrige Molmasse hindeutet, welche sich mit zunehmender Verarbeitung weiter reduziert. Nach der dritten Extrusion ist im untersuchten Frequenzbereich kein COP mehr vorhanden. In den ersten beiden Verarbeitungsstufen ist auch ein Anstieg von  $G_{COP}$  zu erkennen, was auf eine engere Molmassenverteilung zurückzuführen ist.

Im Fall der Materialien mit Wasserwäsche könnte die anfängliche Verlagerung des COP zu niedrigeren Frequenzen den Hintergrund haben, dass durch die erste Extrusion eine Homogenisierung des Materials stattfindet und flüchtige Stoffe teilweise entfernt werden, sowie unterschiedlich stark kontaminiertes Material verteilt und somit vereinheitlicht wird.

Die Ergebnisse des Referenzmaterials bestätigten, wie bereits die Ergebnisse der MFR Versuche, sowie der Ergebnisse der komplexen Viskosität nahelegten, dass das Referenzmaterial bereits in der Ausgangsbasis die höchste Schädigung erfahren hat, und deshalb die geringste Molmasse aufweist. Die Vermutung des starken Abbaus wird von den Messergebnissen bei höheren Verarbeitungsstufen bekräftigt.





**Abbildung 50:** Speicher- und Verlustmodul - PP tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen und industriell hergestellten Rezyklat Becher (Fa. Greiner)

**Tabelle 25:** Cross-Over-Point PP tiefgezogen

Extrusionen	60 °C H2O		80 °C H2O		60 °C NaOH		80 °C NaOH		Referenz (Greiner)	
	$\omega$ [rad/s]	$G_{COP}$ [kPa]	$\omega$ [rad/s]	$G_{COP}$ [kPa]						
<b>0x</b>	159	31,3	153	31,5	139	29,7	130	30	267	31,2
<b>1x</b>	108	28,6	125	29,4	147	28,4	128	28,6	486	36,3
<b>3x</b>	127	25,6	157	30,9	201	28,9	148	29	kein COP	
<b>5x</b>	188	28,2	199	31,9	266	30,8	204	30,7	kein COP	

## PP Flakes spritzgegossen

Behandelte Materialien in diesem Abschnitt:

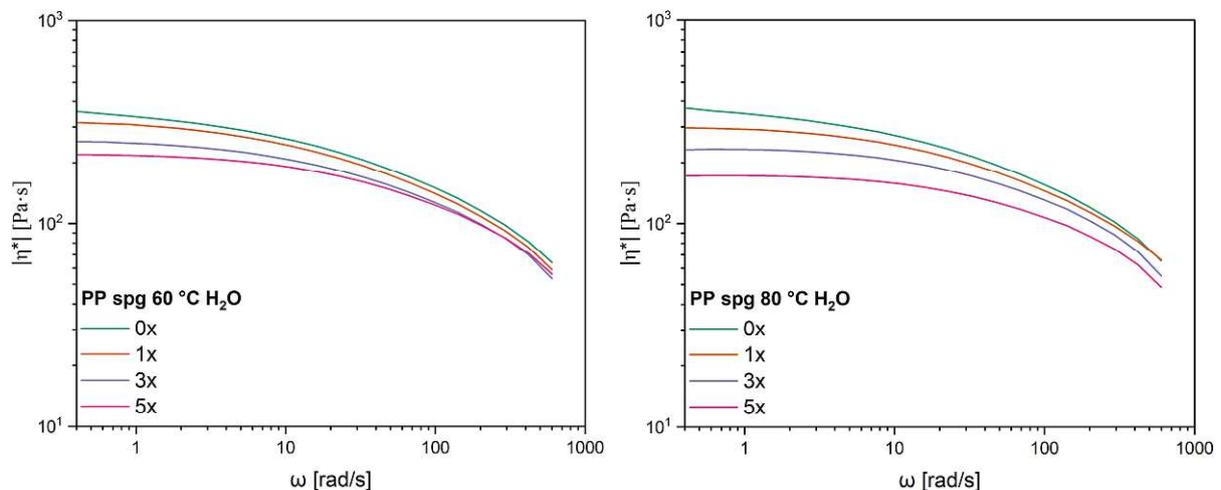
Material	Kurzform für Beschreibung
PP spg 60 °C H <sub>2</sub> O	V1
PP spg 80 °C H <sub>2</sub> O	V2
PP spg 60 °C NaOH	V3
PP spg 80 °C NaOH	V4

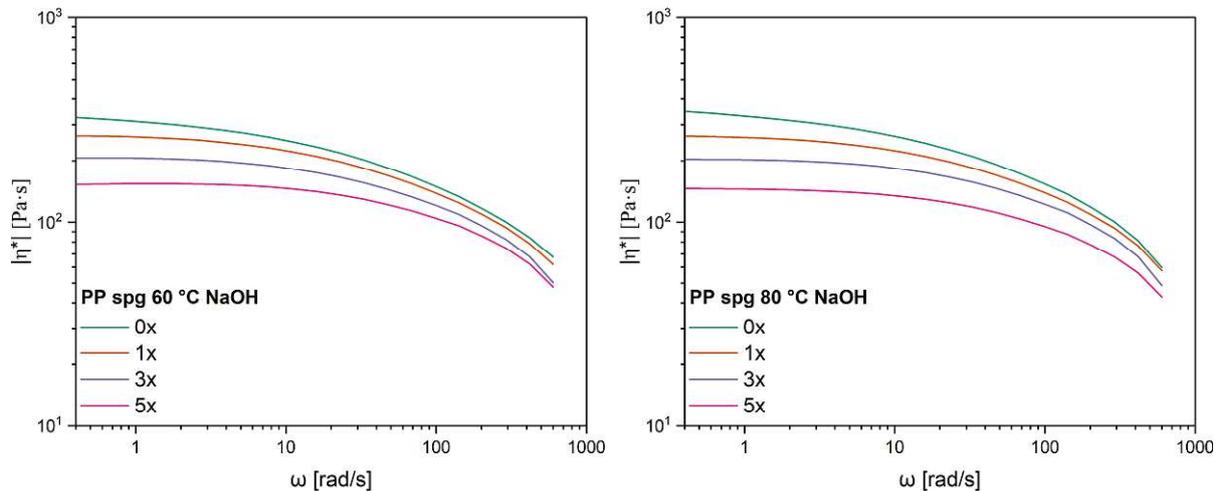
### Viskosität:

Abbildung 51 gibt die Verläufe der komplexen Viskositäten der einzelnen Materialien wieder. Weiters sind zum besseren Vergleich der Viskositäten der verschiedenen Waschbehandlungen zueinander die ersten Verarbeitungsstufen der vier Materialien in Abbildung 52 dargestellt. Auch hier wurde zum Vergleich das einmal extrudierte Material herangezogen, da durch die Verarbeitung eine gewisse Homogenisierung erzeugt wurde, während die Auswirkungen der Mehrfachverarbeitung jedoch noch nicht so stark zum Tragen kommen.

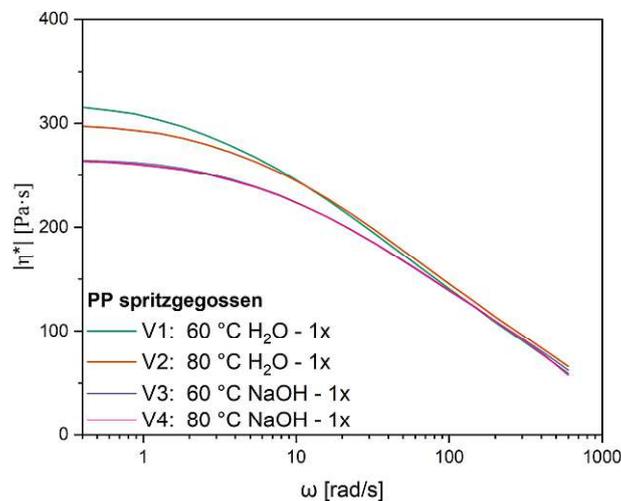
Es ist zu erkennen, dass die Viskosität aller vier Materialien mit zunehmender Anzahl an Extrusionen abnimmt, was mit den Ergebnissen der MFR Messungen korreliert. Die Werte der Viskosität jener Materialien, welche mit Wasser gewaschen wurden, liegen tendenziell auf einem höheren Niveau als die Materialien der Natronlauge Wäsche (siehe Abbildung 52), was sich mit den Ergebnissen des tiefgezogenen PP deckt. Die Materialien eines Waschmediums, V1 und V2 sowie V3 und V4, weisen jeweils ein vergleichbaren Viskositätsniveau auf. Nach fünf Extrusionen zeigen die Viskositätswerte der beiden Materialien mit der 80 °C Waschbehandlung (V2 und V4) die stärkeren relativen Veränderungen.

Die höheren Viskositätswerte der Materialien der Wasserwäsche deuten darauf hin, dass die NaOH Waschbehandlung einen stärkeren Einfluss auf die Viskosität nimmt, ebenso wie die höheren Temperaturen. Das spritzgegossene PP mit der 60 °C H<sub>2</sub>O Waschbehandlung hat damit die höchsten Viskositätswerte in allen Verarbeitungsstufen.





**Abbildung 51:** Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität - PP spritzgegossen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen

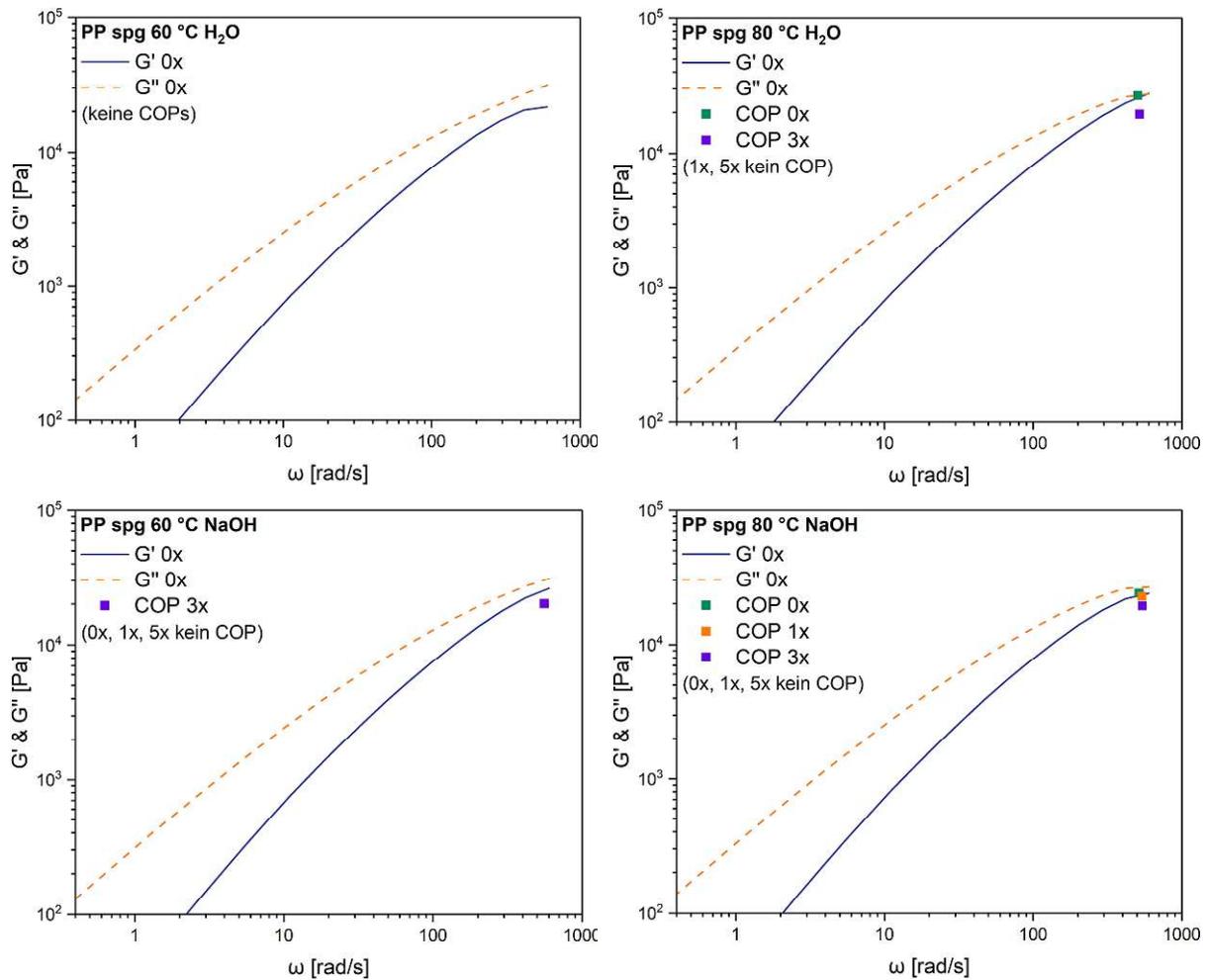


**Abbildung 52:** Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität - PP spritzgegossen - Gegenüberstellung der 1x extrudierten Serien der verschiedenen Waschbehandlungen

### Speicher- und Verlustmodul:

Die Verläufe von Speicher- und Verlustmodul sind in Abbildung 53 ersichtlich, ebenso wie die vorhandenen Schnittpunkte (COPs), wobei die genauen Werte der COPs in Tabelle 26 zusammengefasst sind.

Die Verläufe von Speicher- und Verlustmodul weisen im eingestellten Messbereich nur mehr sehr vereinzelt COPs auf. In diesen Fällen dominiert viskoses Verhalten auch bei hohen Kreisfrequenzen, was ein Anzeichen für eine verhältnismäßig niedrige molare Masse ist. [23] Es geht hervor, dass für die beiden Materialien mit der 80 °C Wäsche bei mehr Messungen COPs ermittelt werden konnten. Das Material V2 (80 °C H<sub>2</sub>O) hat in der Ausgangsbasis noch einen Schnittpunkt und V4 (80 °C NaOH) weist noch bis zur dritten Verarbeitung Schnittpunkte auf. Die im Fall von V4 vorhandenen Schnittpunkte wandern geringfügig zu höheren Kreisfrequenzen und niedrigeren Modulen, was auf eine Reduktion der Molmasse und eine weitere Molmassenverteilung hindeutet.



**Abbildung 53:** Speicher- und Verlustmodul - PP spritzgegossen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen

**Tabelle 26:** Cross-Over-Point PP spritzgegossen

Extrusionen	60 °C H <sub>2</sub> O		80 °C H <sub>2</sub> O		60 °C NaOH		80 °C NaOH	
	ω [rad/s]	G <sub>COP</sub> [kPa]	ω [rad/s]	G <sub>COP</sub> [kPa]	ω [rad/s]	G <sub>COP</sub> [kPa]	ω [rad/s]	G <sub>COP</sub> [kPa]
<b>0x</b>	kein COP		506	26,8	kein COP		516	24
<b>1x</b>	kein COP		kein COP		kein COP		540	22,6
<b>3x</b>	kein COP		(519)	(19,5)	(558)	(20,2)	544	19,3
<b>5x</b>	kein COP		kein COP		kein COP		kein COP	

*Die Werte in den Klammern wurden aus lediglich einem oder zwei Werten „gemittelt“, da Schnittpunkte außerhalb des eingestellten Messbereichs gelegen haben*

## PS Flakes tiefgezogen & PS Flakes und Regranulat tiefgezogen (Fa. Viscotec)

Behandelte Materialien in diesem Abschnitt:

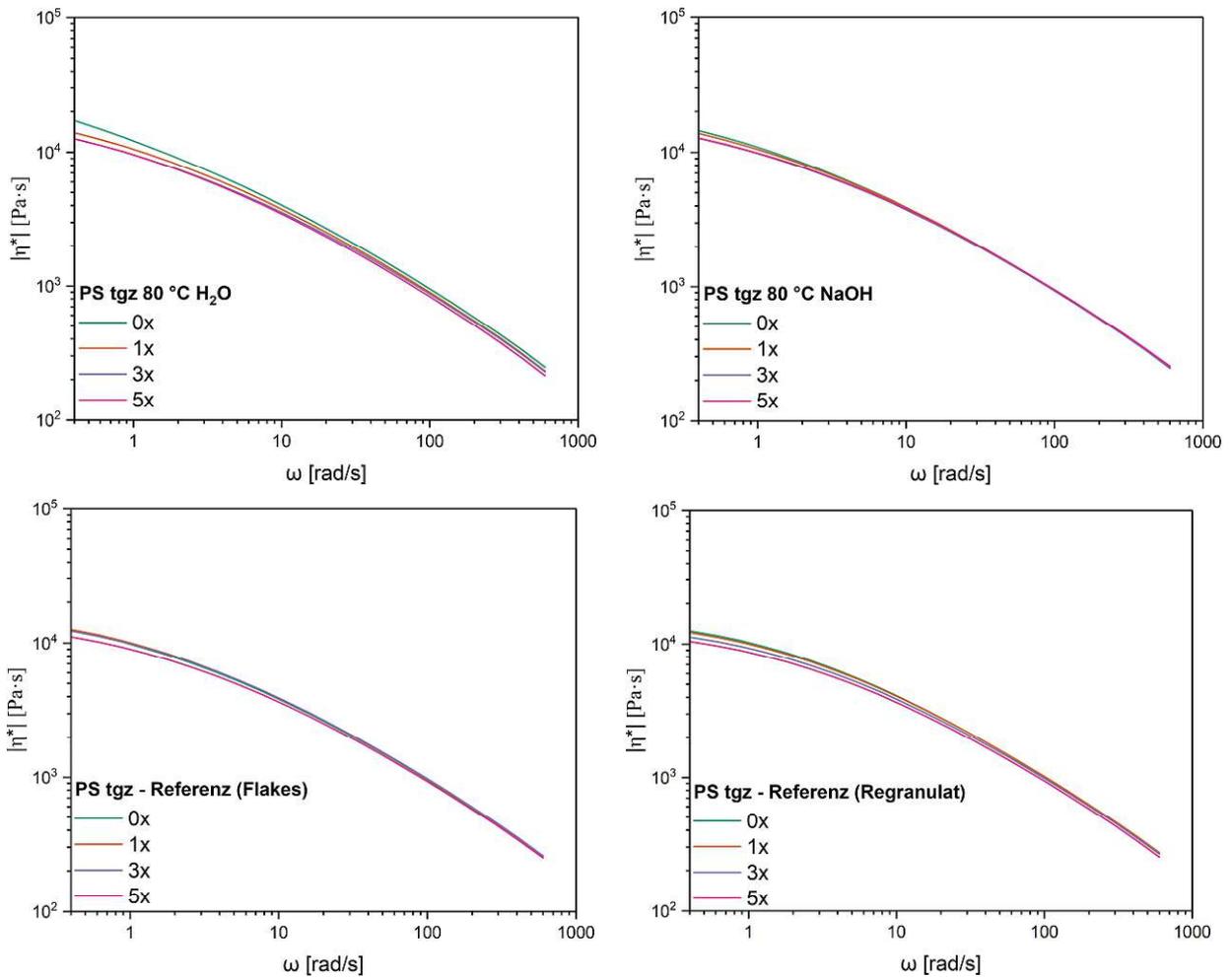
<b>Material</b>	<b>Kurzform für Beschreibung</b>
PS tgz 80 °C H <sub>2</sub> O	V2
PS tgz 80 °C NaOH	V4
Referenz Industrie: PS tgz (Viscotec)	RI2
Referenz Industrie: PS tgz Regranulat (Viscotec)	RI3

### Viskosität:

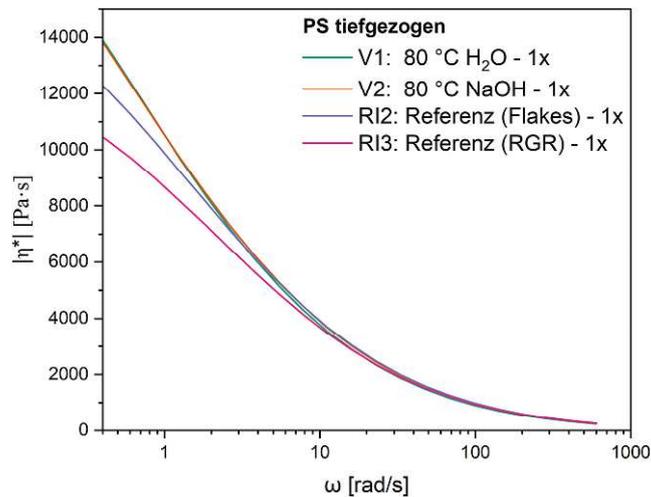
Abbildung 54 gibt die Verläufe der komplexen Viskositäten der einzelnen Materialien wieder. Weiters sind zum besseren Vergleich der Viskositäten der verschiedenen Waschbehandlungen und der Referenzmaterialien zueinander die ersten Verarbeitungsstufen der vier Materialien in Abbildung 55 dargestellt. Auch hier wurde zum Vergleich das einmal extrudierte Material herangezogen, da durch die Verarbeitung eine gewisse Homogenisierung erzeugt wurde, während die Auswirkungen der Mehrfachverarbeitung jedoch noch nicht so stark zum Tragen kommen.

Es ist zu erkennen, dass die Viskosität mit zunehmender Anzahl an Extrusionen tendenziell abnimmt, was sich durch thermischen Abbau begründen lässt, und auch schon in vergleichbaren Studien beobachtet wurde. [36] Die deutlichste Abnahme hat das mit Wasser gewaschene Material. Beim Vergleich der komplexen Viskosität der beiden Materialien des Waschversuchs zeigt sich, dass das Material V2 (Wasserwäsche) in der Ausgangssituation die höhere Viskosität aufweist. Dies dreht sich mit zunehmender Verarbeitungsanzahl um. V2 zeigt im untersuchten Frequenzbereich von allen vier Materialien die größte Reduktion der Viskositätswerte. Nach der fünften Verarbeitung liegen alle Materialien auf einem ähnlichen Niveau. Die stärkere Abnahme der Viskosität könnte auf verstärkte Abbauprozesse durch das Extrudieren infolge höherer Verunreinigungen zurückzuführen sein. Nach der fünften Extrusion liegen die Werte jedoch auf ähnlichem Niveau, was darauf hindeutet, dass die Anfangsunterschiede durch Verunreinigungen verursacht wurden und nicht durch den stärkeren Abbau zu erklären sind.

Die Werte von RI3 liegen auf einem etwas höheren Niveau als jene von RI2, erfahren aber mit zunehmender Anzahl an Extrusionen eine stärkere Abnahme. Dies weist auf einen stärkeren Materialabbau hin, möglicherweise verursacht durch höhere Belastungen während der Materialaufbereitung, wie etwa durch die Vakuumbehandlung. Das Material V4 besitzt das stabilste Verhalten in Bezug auf die Viskositätsveränderung. Nach der fünften Extrusion liegen die Werte im hohen Frequenzbereich über denen des Ausgangszustandes. Der anhand des stärkeren MFR-Anstiegs vermutete Abbau infolge der Waschbehandlung mit Natronlauge kann im Hinblick auf die Ergebnisse der Viskositätswerte für das Material V4 nicht bestätigt werden.



**Abbildung 54:** Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität - PS tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen sowie industriell aufbereitete Flakes und Regranulat (RGR) (Fa. Viscotec)



**Abbildung 55:** Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität - PS tiefgezogen - Gegenüberstellung der 1x extrudierten Serien mit verschiedenen Waschbehandlungen sowie industriell aufbereitete Flakes und Regranulat (RGR) (Fa. Viscotec)

### Speicher- und Verlustmodul:

Die Verläufe von Speicher- und Verlustmodul sind in Abbildung 56 ersichtlich, ebenso wie die vorhandenen Schnittpunkte (COPs), wobei die genauen Werte der COPs in Tabelle 27 zusammengefasst sind.

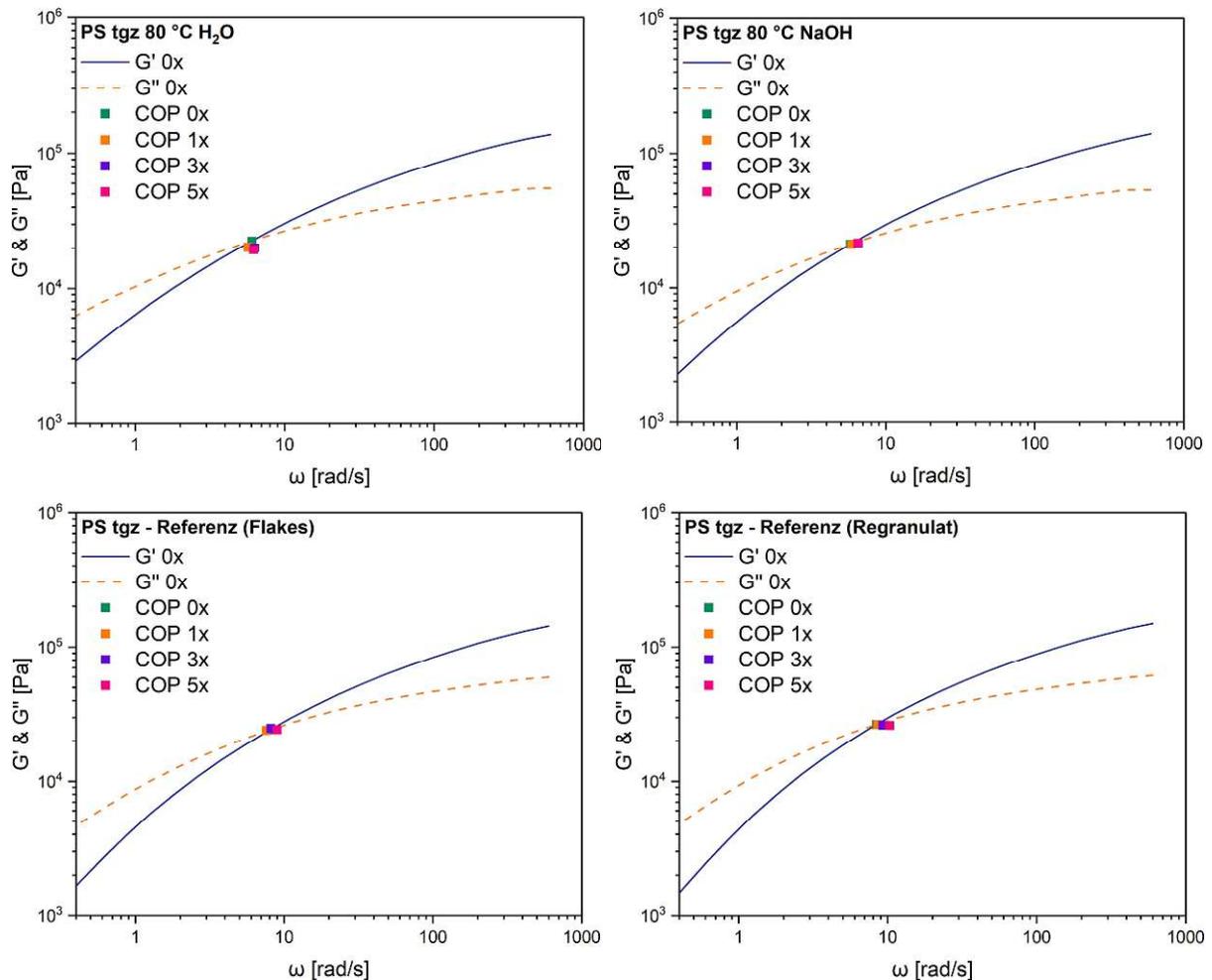
Die Positionen der COPs der Materialien weisen keine ausgeprägte Veränderung auf. Die Frequenz der Schnittpunkte aller Materialien bleibt nahezu unverändert. Lediglich der COP des Referenzmaterials RI3 aus industrieller Aufbereitung hat einen etwas größeren Anstieg der Frequenz von 8,4 rad/s in der Ausgangsbasis auf 10,3 rad/s nach der fünften Extrusion. Dies ist der stärkste Anstieg der untersuchten Materialien und deutet auf die größte Reduktion der mittleren Molmasse hin.

Verglichen mit den beiden Materialien der Waschversuche liegen die COPs der beiden Referenzmaterialien in allen Verarbeitungsstufen bei höheren Frequenzen, wie auch bei höheren  $G_{COP}$  Werten. Die höheren  $G_{COP}$  Werte sprechen für eine engere Molmassenverteilung, was auf eine homogenere Molmassenverteilung des Materials hindeutet.

Beim Vergleich der beiden Materialien der Waschversuche (V2 und V4) wird bei dem Material mit Natronlauge Wäsche ein geringfügig stärkerer Anstieg der Kreisfrequenz des COP ersichtlich.

Die größte Änderung von  $G_{COP}$  hat das Material V2. Diese verlagert sich von 22,55 kPa zu 19,42 kPa, was für eine Weitung der mittleren Molmassenverteilung spricht. Alle anderen Materialien haben Schnittpunkte, die sich nahezu gänzlich innerhalb der Schwankungsbreite bewegen. Die Ergebnisse der beiden Referenzmaterialien deuten darauf hin, dass der Prozess der industriellen Aufbereitung zu einem Abbau des Material geführt hat, wobei der stärkere Abbau beim Material mit Vakuumbehandlung zu beobachten ist. Der COP von RI3 liegt bereits in der Ausgangsbasis bei 8,4 rad/s gegenüber RI2 mit 8,1 rad/s. Mit zunehmender Verarbeitung zeigt das Material mit Vakuumbehandlung zusätzlich einen stärker abbauenden Effekt durch die größere relative Veränderung der Kreisfrequenz. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen der MFR Versuche.

Die Kreisfrequenz von V2 verlagert sich nach der ersten Extrusion zu einer niedrigeren Kreisfrequenz, und deutet somit auf eine höhere mittlere Molmasse an. Der Effekt könnte jedoch auch durch Verunreinigungen zustande kommen, welche durch die Verarbeitung zunehmend entfernt werden und zu einer Verfälschung der Ausgangsbasis beitragen, wie auch die relativ starke Veränderung der komplexen Viskosität nach der ersten Verarbeitung von V2 signalisieren könnte.



**Abbildung 56:** Speicher- und Verlustmodul - PS tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen sowie industriell aufbereitete Flakes und Regranulat (RGR) (Fa. Viscotec)

**Tabelle 27:** Cross-Over-Point PS tiefgezogen

Extrusionen	80 °C H2O		80 °C NaOH		Referenz Flakes		Referenz RGR	
	$\omega$ [rad/s]	$G_{COP}$ [kPa]						
<b>0x</b>	6,1	22,6	5,8	21,2	8,1	24,4	8,4	26,7
<b>1x</b>	5,7	20,2	5,9	21,1	7,6	24	8,6	26,6
<b>3x</b>	6,3	20	6,5	21,4	8,1	24,9	9,3	26,3
<b>5x</b>	6,2	19,4	6,5	21,7	9,0	24,4	10,3	26,2

### 3.3.2 Duschgelflasche

#### 3.3.2.1 MFR

Die Ergebnisse der MFR Messungen sind in Tabelle 28 zusammengefasst. Daraus ist ersichtlich, dass der durchschnittliche MFR-Wert von HDPE nach der ersten Verarbeitung um etwa 17 % auf 1,9 g/10 min sinkt, wobei sich die Werte innerhalb der Standardabweichung bewegen. Jener von PP steigt um 18 % auf knapp 40 g/10 min an, was auf eine

Kettenverkürzung durch die Extrusion hindeutet. [37] Der MFR-Wert der Materialmischung liegt mit 8 g/10 min zwischen jenen der reinen Materialien. Bei rechnerischer Ermittlung des MFR Wertes durch anteilige Mittelwertbildung, basierend auf den Massenanteilen der Materialmischung (HDPE/PP ~75/25; genaue Massenanteile siehe Tabelle 7), und den Werten der reinen Materialien nach einer Verarbeitung, ergibt sich ein theoretischer Wert von 11,3 g/10 min. Der experimentell bestimmte Wert liegt etwas darunter, was indiziert, dass der Einfluss des PP-Anteils bei diesem Mischungsverhältnis nicht proportional zur Masse ist und der HDPE-Anteil überwiegt.

Wird alternativ die Mischungsregel von Arrhenius [16] angewendet, ergibt sich ein deutlich niedriger theoretischer Wert von 4,03 g/10 min. Dieser Unterschied ergibt sich, da der natürliche Logarithmus des MFR von HDPE vergleichsweise gering ist und dieser Wert bei einem Massenanteil von etwa 75 % entsprechend stark in die Berechnung eingeht.

Beide Berechnungsansätze verdeutlichen, dass sich der MFR-Wert dieser Materialmischung rechnerisch nur unzureichend vorhersagen lässt. Dies ist insofern ungünstig, als eine verlässliche Abschätzung ohne experimentelle Ermittlung nicht möglich ist.

$$\ln MFR = \sum_i x_i \ln MFR_i$$

**Formel 6:** Arrhenius Mischungsregel [16]

Dabei ist:

$x_i$ .....Massenanteil Material i

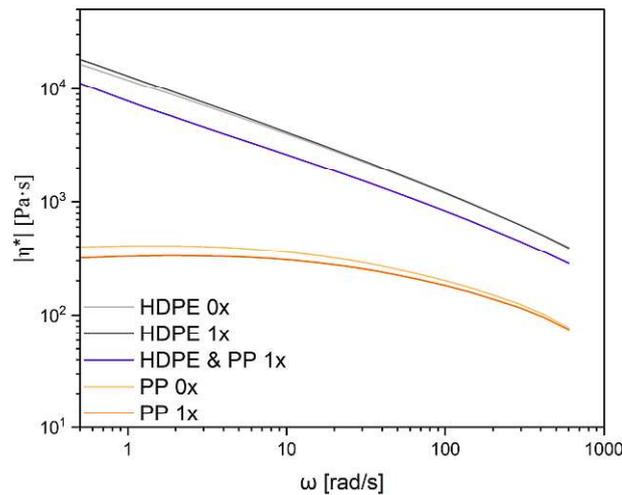
$MFR_i$ ...MFR Material i in g/10 min

**Tabelle 28:** Messergebnisse MFR - Komponenten der Duschgelflasche

Material	Extrusionen	MFR [g/10 min]
Body HDPE	0x	2,3 ± 0,2
Body HDPE	1x	1,9 ± 0,3
Cap PP	0x	33,8 ± 1,2
Cap PP	1x	39,9 ± 1,4
Blend (HDPE+PP)	1x	8,0 ± 0,9

### 3.3.2.2 Frequency-Sweep

Abbildung 57 gibt die Verläufe der komplexen Viskositäten der Komponenten der Duschgelflasche wieder. Es ist evident, dass die Viskosität des HDPE Hohlkörpers deutlich über der Viskosität des Verschlusses aus PP liegt. PP zeigt nach einer Extrusion eine leichte Abnahme. HDPE behält das Niveau hingegen weitestgehend bei. Der Verlauf der Viskosität der Materialmischung ähnelt dem von HDPE, befindet sich jedoch auf einem sichtlich niedrigeren Niveau als das reine HDPE. Die Beimischung von PP zu HDPE bewirkt somit eine merkliche Abnahme der Viskosität.



**Abbildung 57:** Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität – Komponenten der Duschgelflasche: PP (Verschluss), HDPE (Hohlkörper) und Blend (Flasche komplett)

In Tabelle 29 sind die COPs der drei Materialien dargelegt. Im Fall von HDPE verlagert sich der COP nach einer Extrusion zu einer niedrigeren Kreisfrequenz, was auf eine Zunahme der Molmasse hindeutet. Der Modul des Schnittpunktes nimmt ab, was für eine weitere Molmassenverteilung spricht. Der COP von PP liegt nach einer Extrusion bei einer deutlich höheren Kreisfrequenz, was eine Abnahme der Molmasse andeutet.  $G_{COP}$  bleibt auf einem ähnlichen Niveau.

Wie auch schon bei den Ergebnissen der komplexen Viskosität, liegen die Werte der Materialmischung zwischen jenen der Einzelmaterialien, jedoch deutlich näher an den Werten des reinen HDPE, dessen Massenanteil auch entsprechend überwiegt.

**Tabelle 29: Cross-Over-Points**

Material	Extrusionen	$\omega$ [rad/s]	$G_{COP}$ [kPa]
Body HDPE	0x	12	31,4
Body HDPE	1x	7,8	25,8
Cap PP	0x	333	28,2
Cap PP	1x	537	30,5
Blend (HDPE+PP)	1x	30	32,5

### 3.4 Ergebnisse mechanische Prüfung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Zugversuche und der Schlagzugversuche beschrieben, wobei im ersten Abschnitt die Ergebnisse der Becherserie und im zweiten Abschnitt die Ergebnisse der Duschgelflasche erläutert werden. Die Gliederung erfolgt wie im vorangegangenen Kapitel nach Material und Verarbeitungsprozess.

### 3.4.1 Becher

#### 3.4.1.1 Zugversuch

##### PP Flakes (tiefgezogen) & PP Becher (tiefgezogen) (Fa. Greiner)

Behandelte Materialien in diesem Abschnitt:

Material	Kurzform für Beschreibung
PP tgz 60 °C H <sub>2</sub> O	V1
PP tgz 80 °C H <sub>2</sub> O	V2
PP tgz 60 °C NaOH	V3
PP tgz 80 °C NaOH	V4
Referenz Industrie: PP tgz Becher (Greiner)	RI1

Abbildung 58 zeigt den Verlauf von E-Modul, Zugfestigkeit und der Bruchdehnung der tiefgezogenen PP Flakes mit den vier Varianten der Waschparameter V1 bis V4 und des industriellen Referenzmaterials RI1 in Abhängigkeit der durchgeführten Extrusionen.

**Der E-Modul** wird durch die Mehrfachverarbeitung nicht wesentlich beeinflusst. Die Materialien V1 bis V4 verzeichnen insgesamt höhere E-Module verglichen mit RI1. Sie liegen im Durchschnitt über alle Verarbeitungsstufen bei 1520 MPa gegenüber dem E-Modul von RI1 mit 1361 MPa. In [29] wurde im Zugversuch mit recyceltem tiefgezogenem PP ein E-Modul von 1560 MPa ermittelt, was mit den festgestellten Werten in dieser Arbeit gut übereinstimmt. Die Standardabweichung liegt mit 4 % relativer Abweichung auf einem niedrigen Niveau. Bei genauer Betrachtung zeigt sich bei den Materialien V1 bis V3 tendenziell eine Abnahme des E-Moduls mit zunehmender Extrusionsanzahl. V4 startet mit dem höchsten Wert im Ausgangszustand und steigert sich nach einer Extrusion um 8 % auf 1731 MPa gegenüber dem Ausgangszustand mit 1604 MPa. Nach der dritten und fünften Extrusion erfährt der E-Modul ebenfalls eine Abnahme, bleibt aber weiterhin auf einem hohen Niveau. Der E-Modul von RI1 bleibt konstant, ohne wesentliche Veränderungen durch die Extrusionen. Die Schwankungen sind gering, und es zeigt sich keine erkennbare Tendenz zur Abnahme oder Zunahme des E-Moduls.

**Die Zugfestigkeit** aller Materialien signalisiert mit zunehmender Extrusionsanzahl einen leicht abnehmenden Trend. Die Materialien der Waschversuche V1 bis V4 liegen im Durchschnitt über alle Verarbeitungsstufen bei 34 MPa gegenüber RI1 mit 32 MPa. V1 hat über alle Verarbeitungsstufen die höchste Zugfestigkeit. Sie startet mit 37 MPa im Ausgangszustand und reduziert sich um 8 % bis zur fünften Extrusion. Die Zugfestigkeit von V3 zeigt den größten Abfall von 12 % auf 31 MPa nach der fünften Extrusion, mit einer Ausgangsbasis von 35 MPa. Die Materialien V2 und V4, welche mit 80 °C gewaschen wurden, weisen insgesamt ein stabileres Verhalten im Vergleich zu V1 und V3 auf. Die Standardabweichung liegt bei V2 und V4 im Durchschnitt bei 1,03 MPa, verglichen zu 2,61 MPa bei den Materialien V1 und V3. RI1 zeigt ein gleichmäßiges Verhalten über die Extrusionszyklen, mit einer kontinuierlichen Abnahme der Zugfestigkeit. Diese sinkt von 33 MPa auf 31 MPa nach fünf Extrusionen, was einer Abnahme um 6 % entspricht. Damit ist der Rückgang geringer als jener von V3 (12 %)

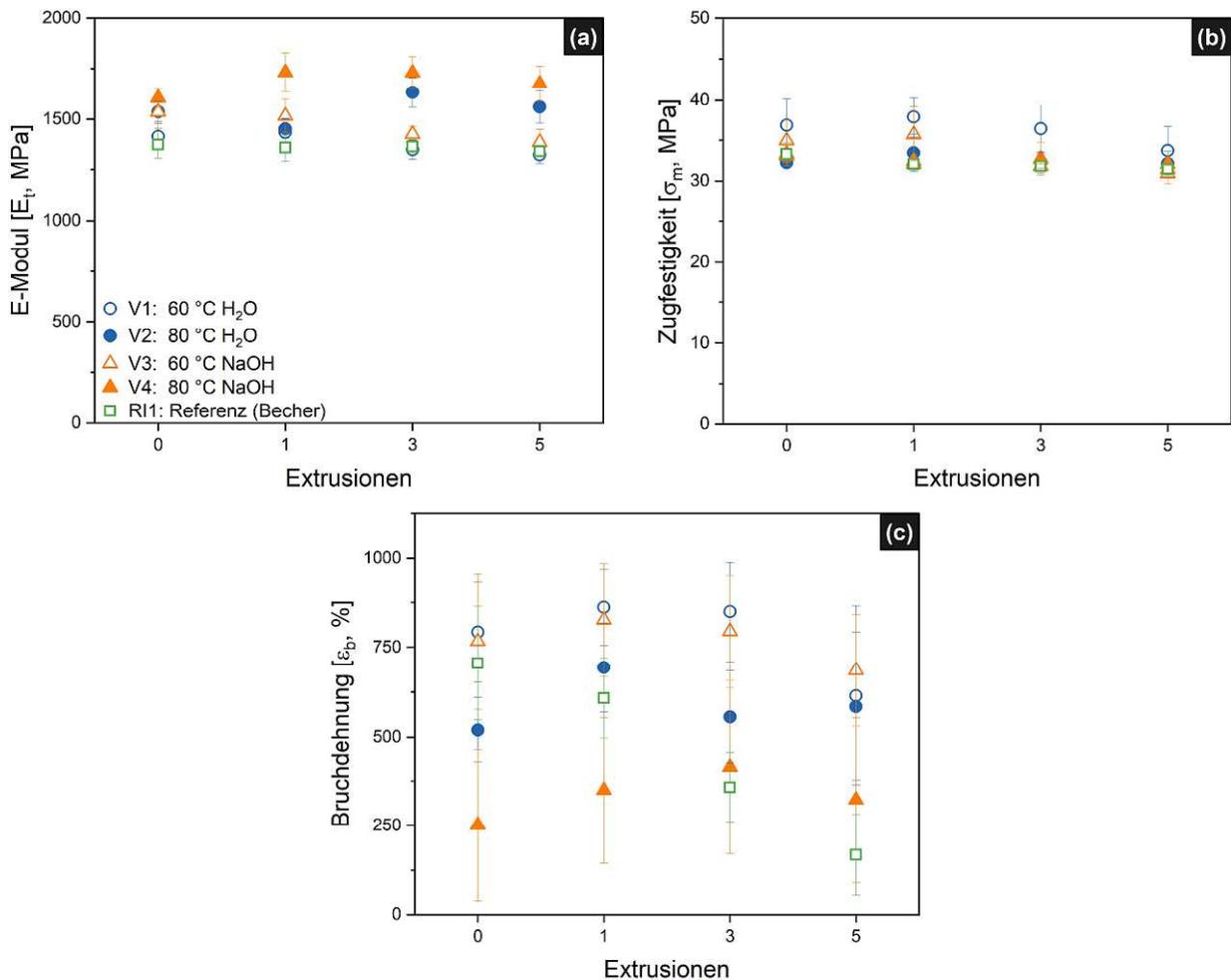
und V1 (8 %), aber höher als jener von V2, welcher nach der fünften Extrusion nahezu ident mit dem Anfangswert ist. Die Abnahme der Zugfestigkeit von V4 beträgt lediglich 3 %.

**Die Bruchdehnung** aller Materialien zeichnet sich in den verschiedenen Verarbeitungsstufen durch eine große Streuung aus. Die Standardabweichung liegt durchschnittlich bei 34 % und ist für das Material V4 mit durchschnittlich 68 % am größten. Die Bruchdehnungen aller Materialien folgen keinem einheitlichen Trend, wobei sich das Referenzmaterial im Verhalten von den Materialien V1 bis V4 absetzt.

Die Bruchdehnungen der Materialien V1 bis V4 verzeichnen nach der ersten Extrusion einen Anstieg. Dieser fällt für die Materialien mit der Waschbehandlungen mit höheren Temperaturen (V2 und V4) stärker aus. Deren Bruchdehnung steigert sich um 33 % respektive 39 %. Die Veränderung von V1 und V3 liegt im Vergleich dazu bei nur 9 % respektive 8 %. Nach der dritten und der fünften Extrusion variiert das Verhalten der Materialien.

Der Verlauf der Bruchdehnung von RI1 (Referenzmaterial) zeigt das gleichmäßigste Verhalten der untersuchten Materialien in diesem Abschnitt, was durch die erfolgte industrielle Aufbereitung zu erwarten ist und den Vorteil einer besseren Homogenisierung unterstreicht. Die Bruchdehnung zeigt eine kontinuierliche Abnahme mit zunehmender Anzahl an Extrusionen, wobei sie mit einem vergleichsweise hohen Wert von 706 % startet. Nach der fünften Extrusion beträgt die Bruchdehnung nur noch 168 %, dem niedrigsten Wert aller Materialien. Die beiden Materialien V1 und V3 (60 °C Wäsche) liegen in allen Stufen dicht aneinander und weisen die höchste Bruchdehnung auf. Den absolut höchsten Wert hat die Bruchdehnung von V1 nach der ersten Extrusion mit 861 %. V4 erreicht von den Materialien mit Variation der Waschparameter den mit Abstand niedrigsten Wert über alle Verarbeitungsstufen. Der durchschnittliche Wert der Bruchdehnung von V4 liegt bei 335 %. Jene von den Materialien V1 bis V3 liegen im Durchschnitt bei 712 %.

Mit zunehmender Extrusionsanzahl ist kein eindeutiger Einfluss der Waschbehandlung auf die untersuchten Kennwerte zu erkennen. Das Material V4 (80 °C NaOH Wäsche) fällt mit einem höheren E-Modul und einer niedrigeren Bruchdehnung auf, was ein spröderes Verhalten indiziert. Die Materialien mit 80 °C Waschbehandlung besitzen eine geringere Schwankungsbreite der Zugfestigkeit, weisen aber auch eine geringere Bruchdehnung auf. Das Referenzmaterial weicht von den Materialien der Waschversuche etwas ab, indem es niedrigere E-Module und Zugfestigkeiten zeigt, jedoch sehr konstant bleibt. Die Bruchdehnung nimmt dagegen mit zunehmender Anzahl an Extrusionen kontinuierlich stark ab.



**Abbildung 58:** Zugversuch PP tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen und industriell hergestellten Rezyklat Becher (Fa. Greiner); (a) E-Modul [MPa], (b) Zugfestigkeit [MPa], (c) Bruchdehnung [%]

### PP Flakes spritzgegossen

Behandelte Materialien in diesem Abschnitt:

Material	Kurzform für Beschreibung
PP spg 60 °C H <sub>2</sub> O	V1
PP spg 80 °C H <sub>2</sub> O	V2
PP spg 60 °C NaOH	V3
PP spg 80 °C NaOH	V4

Abbildung 59 zeigt den Verlauf von E-Modul, Zugfestigkeit und der Bruchdehnung der spritzgegossenen PP Flakes mit den vier Varianten der Waschparameter V1 bis V4 in Abhängigkeit der durchgeführten Extrusionen.

**Die E-Module** der Materialien mit 60 °C Waschbehandlung (V1 und V3) zeigen mit einer 5 % und 8 % Abnahme des E-Moduls ein ähnliches Verhalten. Der E-Modul von V2 verhält sich sehr stabil. Nach einer Abnahme nach einer Extrusion nimmt dieser wieder zu und erreicht nach der fünften Extrusion den Wert des Ausgangszustandes. V4 zeigt ein abweichendes Verhalten

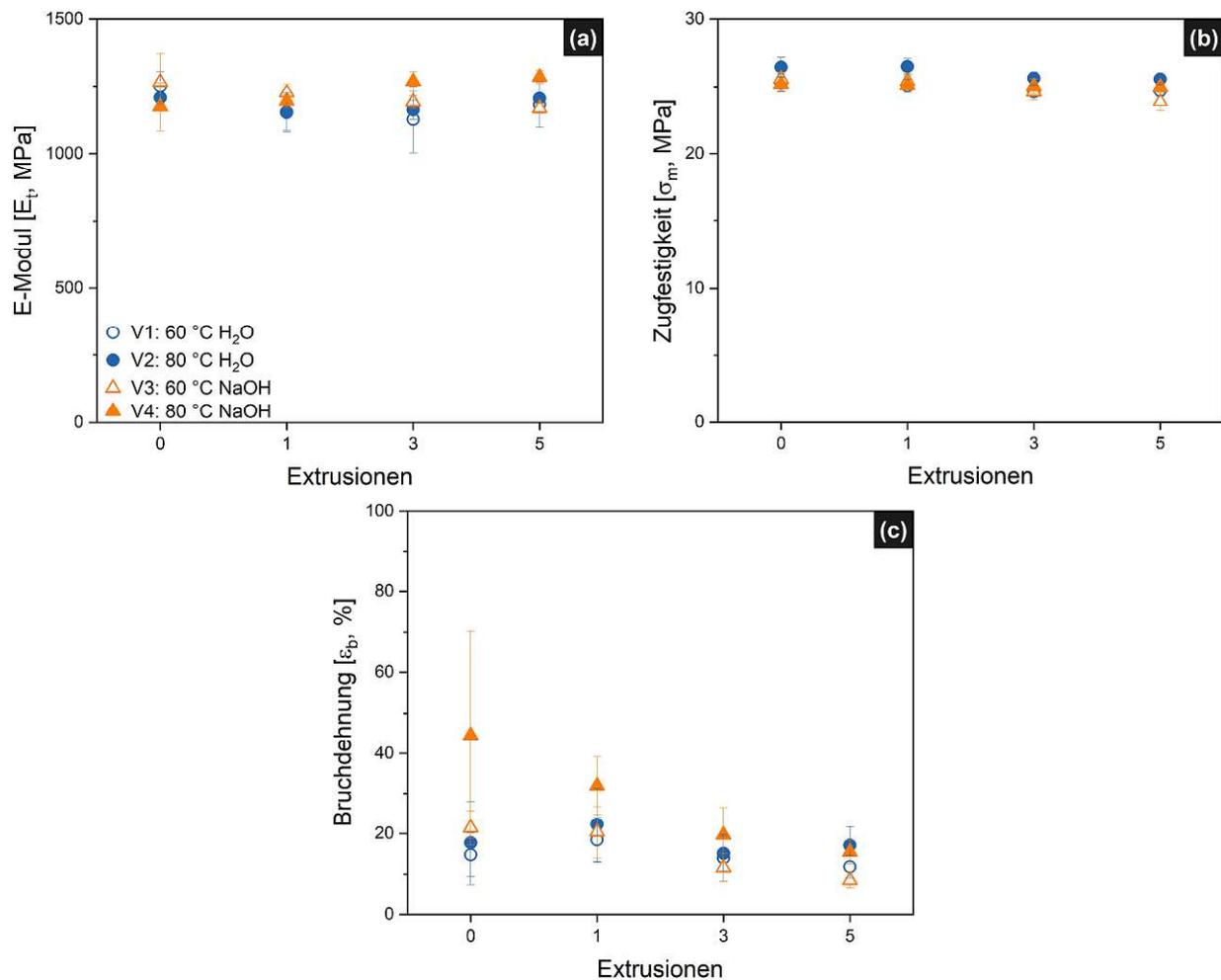
und erfährt eine stetige Zunahme des E-Moduls mit zunehmender Anzahl an Extrusionen. Der E-Modul landet 9 % über dem Ausgangswert. Im Durchschnitt liegt der E-Modul über alle Verarbeitungsstufen bei 1200 MPa. In [29] wurde im Zugversuch mit recyceltem spritzgegossenes PP ein E-Modul von 1310 MPa ermittelt, was zu den bestimmten Werten in dieser Arbeit passt.

**Die Zugfestigkeit** aller Materialien zeigt mit zunehmender Extrusionsanzahl einen leicht abnehmenden Trend. Den höchsten Ausgangswert verzeichnet das Material V2 mit 26 MPa. Mit einer Abnahme von 3 % liegt es im Mittelfeld, wobei jedoch der absolute Wert nach fünf Extrusionen nach wie vor der höchste der Serie ist. Den niedrigsten Ausgangswert hat das Material V4 mit 25 MPa. Mit einem Verlust von 1 % des Ausgangswertes zeigt das Material aber den niedrigsten Rückgang und hat nach der fünften Extrusion den zweithöchsten Wert. Die Materialien V1 und V3 (60 °C Wäsche) zeigen nach der fünften Extrusion die niedrigsten Werte. V3 hat weiters den größten Abfall mit 7 % auf 24 MPa.

**Die Bruchdehnung** aller vier Materialien weist besonders in den ersten beiden Verarbeitungsstufen eine große Standardabweichung auf, welche mit zunehmender Extrusionsanzahl abnimmt. Die Bruchdehnungen der beiden Materialien mit Wasserwäsche erfahren nach einer Extrusion eine Steigerung um jeweils 25 %. Anschließend verzeichnen beide Materialien mit zunehmender Extrusionsanzahl eine Abnahme der Bruchdehnung, wobei das Material V1 mit 60 °C Wäsche nach der fünften Extrusion 20 % unter dem Ausgangswert liegt. V2 liegt dazu im Vergleich nur 3 % unter dem Ausgangswert.

Die beiden Materialien mit Natronlauge Waschbehandlung verzeichnen nach der ersten Extrusion einen Rückgang der Bruchdehnung, welcher sich mit zunehmender Anzahl fortsetzt. Sie weichen in der Intensität des Rückgangs jedoch stark voneinander ab. V3 verliert nach der ersten Extrusion 5 %. Nach der fünften Extrusion liegt der Wert noch bei 40 % des Ausgangswertes. Im Fall von V4 (80 °C NaOH) ist auffällig, dass die Bruchdehnung besonders in der Ausgangsbasis sehr hoch ist, und auch noch nach drei Extrusionen über allen anderen Materialien liegt. Das ist nicht erklärbar, da die genaue Zusammensetzung des Ausgangsmaterials nicht bekannt ist. Nach der ersten Verarbeitung reduziert sich die Bruchdehnung von V4 um 28 %, und landet nach fünf Extrusionen bei nur mehr 35 % des Anfangswertes. Damit hebt sich das Verhalten von V4 gegenüber den anderen Materialien am stärksten ab, was auch bei Betrachtung der graphischen Darstellung unterhalb offenkundig ist.

Insgesamt liegen die Kennwerte aller Materialien nahe zusammen und bleiben sehr konstant, wobei die Materialien mit der NaOH Waschbehandlung eine Tendenz zur Versprödung andeuten. Wie schon beim tiefgezogenen PP ist durch die 80 °C NaOH Waschbehandlung eine etwas stärkere Tendenz zur Versprödung zu erkennen, was sich durch eine leichte Zunahme des E-Moduls und kontinuierliche Abnahme der Bruchdehnung äußert. Im Ausgangszustand weist die Bruchdehnung von V4 eine ausgesprochen hohe Standardabweichung von 58 % auf, die sich mit zunehmender Anzahl an Extrusionen sukzessive auf 19 % reduziert. Man kann davon ausgehen, dass der enthaltene Folienanteil zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Bruchdehnung und damit auch zu einer Erhöhung der Standardabweichung geführt hat.



**Abbildung 59:** Zugversuch PP spritzgegossen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen; (a) E-Modul [MPa], (b) Zugfestigkeit [MPa], (c) Bruchdehnung [%]

### PS Flakes tiefgezogen & PS Flakes und Regranulat tiefgezogen (Fa. Viscotec)

Behandelte Materialien in diesem Abschnitt:

Material	Kurzform für Beschreibung
PS tgz 80 °C H <sub>2</sub> O	V2
PS tgz 80 °C NaOH	V4
Referenz Industrie: PS tgz (Viscotec)	RI2
Referenz Industrie: PS tgz Regranulat (Viscotec)	RI3

Abbildung 60 zeigt den Verlauf von E-Modul, Zugfestigkeit und der Bruchdehnung der tiefgezogenen PS Flakes mit zwei Varianten der Waschbehandlung und zwei industriell aufbereiteten Referenzmaterialien RI2 und RI3 in Abhängigkeit der durchgeführten Extrusionen.

**Der E-Modul** des Materials V2 hat eine Ausgangsbasis von 2405 MPa und zeigt über fünf Extrusionen kaum eine Veränderung. V4 startet mit einem E-Modul von 2466 MPa, einem höheren Wert, sinkt aber nach drei Extrusionen um 12 % auf 2172 MPa ab.

Die beiden Referenzmaterialien zeigen ein stabiles Verhalten. Die Flakes RI2 starten mit einem Ausgangswert von 2380 MPa unter allen anderen Materialien. Der Wert nimmt mit zunehmender Extrusionsanzahl jedoch zu, sodass RI2 mit 2551 MPa nach fünf Extrusionen den höchsten E-Modul von allen Materialien hat.

Das Referenzmaterial (Regranulat) RI3 hat bereits eine relativ hohe Ausgangsbasis mit 2424 MPa und behält diesen Wert ähnlich zu V3 nahezu bei.

**Die Zugfestigkeit** des Materials V2 startet mit einem Ausgangswert von 35 MPa im Mittelfeld der Ausgangswerte der vier Materialien. Der Wert verhält sich mit zunehmender Anzahl an Extrusionen stabil und zeigt nach fünf Extrusionen eine Zunahme um 4 %. V4 hat zu Beginn eine Zugfestigkeit von 34 MPa und zeigt keine klare Entwicklung. Der Endwert von 35 MPa entspricht nahezu dem Ausgangszustand.

Das Referenzmaterial RI2 beginnt in der Ausgangsbasis mit 34 MPa, was dem niedrigsten Wert entspricht. Mit steigender Anzahl an Extrusionen zeigt sich keine wesentliche Veränderung der Zugfestigkeit. Nach der fünften Extrusion entspricht die Zugfestigkeit jener des Ausgangszustandes. RI3 hat mit 37 MPa die höchste Ausgangsbasis, verliert nach der ersten Extrusion 4 %, bleibt aber in weiterer Folge konstant.

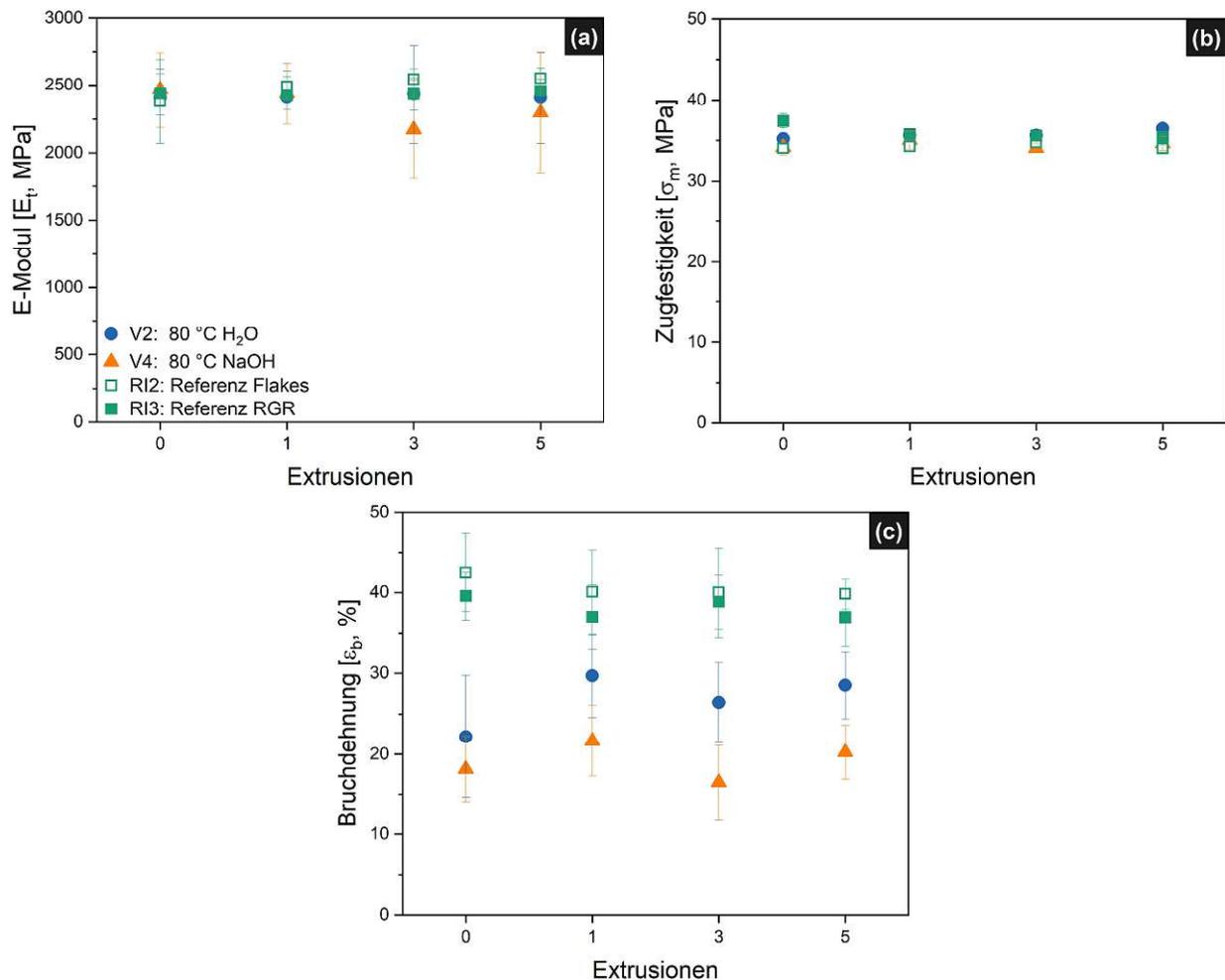
Die Standardabweichungen sind für alle vier Materialien relativ gleichmäßig bei etwa 2 % mit einer Tendenz zur Abnahme mit zunehmender Anzahl an Extrusionen, was auf eine Homogenisierung des Materials durch die Verarbeitung hindeutet.

**Die Bruchdehnungen** der Materialien V2 und V4 bleiben über die vier Verarbeitungsstufen auf einem ähnlichen relativ konstanten Niveau, mit einem leichten Anstieg, wobei die Bruchdehnung von V2 in jeder Verarbeitungsstufe über jener von V4 liegt. Nach der fünften Extrusion liegt V2 mit 29 % Bruchdehnung 28 % über dem Ausgangswert. V4 liegt mit 20 % 12 % über dem Ausgangswert.

Die Bruchdehnung der beiden Referenzmaterialien liegen auf einem höheren Niveau als die Materialien des Waschversuchs. Durchschnittlich liegt die Bruchdehnung der beiden Referenzmaterialien mit 39 % 72 % über dem Durchschnittswert der Materialien V2 und V4. Wie bereits bei den MFR Ergebnissen, zeigt sich dadurch eine bedingte Vergleichbarkeit der Materialien des Waschversuchs und der beiden Referenzmaterialien.

RI2 weist die höchsten Anfangs- und Endwerte auf. Zu Beginn liegt die Bruchdehnung bei 43 % und sinkt nach der fünften Extrusion um 6 % auf 40 %. RI3 verhält sich ähnlich wie RI2, jedoch mit niedrigeren Werten.

Durch die Mehrfachverarbeitung sind keine wesentlichen Veränderungen auf die mechanischen Eigenschaften zu erkennen. Auch die verschiedenen Waschbehandlungen zeigen keine klare Auswirkung auf die Kennwerte, da die Werte weitestgehend innerhalb der Standardabweichungen liegen. Lediglich die Bruchdehnung des Materials mit Wasserwäsche fällt mit etwas höheren Werten in den verschiedenen Verarbeitungsstufen auf.



**Abbildung 60:** Zugversuch PS tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen sowie industriell aufbereitete Flakes und Regranulat (RGR) (Fa. Viscotec); (a) E-Modul [MPa], (b) Zugfestigkeit [MPa], (c) Bruchdehnung [%]

### 3.4.1.2 Schlagzugversuch

#### PP Flakes tiefgezogen & PP Becher tiefgezogen (Fa. Greiner)

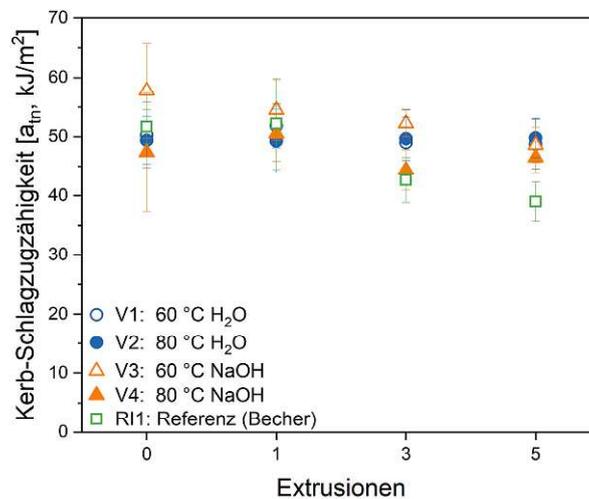
Behandelte Materialien in diesem Abschnitt:

Material	Kurzform für Beschreibung
PP tgz 60 °C H <sub>2</sub> O	V1
PP tgz 80 °C H <sub>2</sub> O	V2
PP tgz 60 °C NaOH	V3
PP tgz 80 °C NaOH	V4
Referenz Industrie: PP tgz Becher (Greiner)	RI1

Die Schlagzugzähigkeit der untersuchten Materialien nimmt mit zunehmender Anzahl an Extrusionen sukzessive leicht ab. Nur V4 weist einen leichten Anstieg nach der ersten Extrusion auf, welcher unter Berücksichtigung der hohen Standardabweichung von 21 % im Ausgangszustand vernachlässigbar ist. Die Standardabweichungen aller Materialien des Waschversuchs (V1 bis V4) sind besonders im Ausgangszustand hoch, nehmen aber nach einer

bzw. drei Extrusionen ab, was sich mit einer Homogenisierung durch die Mehrfachverarbeitung erklären lässt. V2 ist über die Anzahl der Extrusionen am stabilsten und hat nach der fünften Extrusion nahezu den Wert der Ausgangsbasis beibehalten. V3 hat in der Ausgangsbasis mit  $58 \text{ kJ/m}^2$  die höchste Schlagzugzähigkeit, zeigt jedoch eine kontinuierliche Abnahme. Nach der fünften Verarbeitung hat V3 16 % des Ausgangswertes verloren. Stärker ist nur der Abfall der Schlagzugzähigkeit von RI1. Diese reduziert sich nach der fünften Verarbeitung um 25 % auf  $39 \text{ kJ/m}^2$ , dem niedrigsten Messergebnis aller fünf Materialien in den vier verschiedenen Verarbeitungsstufen, was konsistent mit der Entwicklung der Bruchdehnung von RI1 ist. Die stetige Abnahme der Schlagzugzähigkeit ist ein zu erwartendes Ergebnis. [38]

Ein signifikanter Einfluss der Waschparameter auf die Entwicklung der Schlagzugzähigkeit ist anhand der Ergebnisse nicht festzustellen. Die Materialien der Wasserwäsche besitzen jedoch etwas stabilere Werte.



**Abbildung 61:** Schlagzugversuch PP tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen und industriell hergestellten Rezyklat Becher (Fa. Greiner)

## PP Flakes spritzgegossen

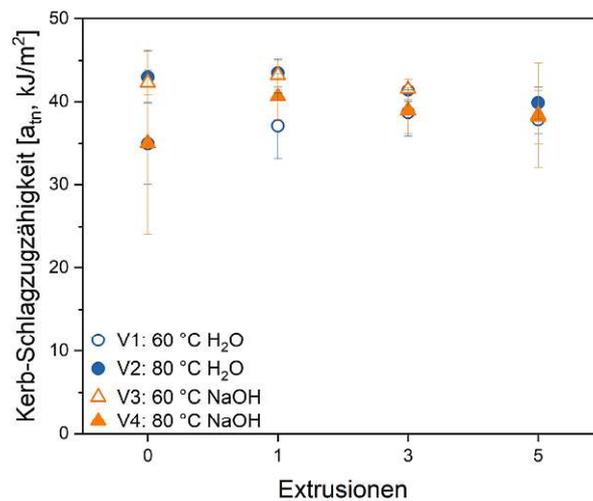
Behandelte Materialien in diesem Abschnitt:

Material	Kurzform für Beschreibung
PP spg 60 °C H <sub>2</sub> O	V1
PP spg 80 °C H <sub>2</sub> O	V2
PP spg 60 °C NaOH	V3
PP spg 80 °C NaOH	V4

Die Schlagzugzähigkeit der untersuchten Materialien bleibt mit zunehmender Anzahl an Extrusionen auf einem ähnlichen Niveau. Die Standardabweichungen sind jedoch besonders im Ausgangszustand hoch und nehmen mit zunehmender Anzahl an Extrusionen tendenziell ab. Die Schlagzugzähigkeit von V1 steigt nach der ersten Extrusion um 6 % auf  $37 \text{ kJ/m}^2$  und bleibt dann stabil. V2 steigert sich nach der ersten Extrusion ebenfalls geringfügig, fällt in weiterer Folge jedoch um 7 % gegenüber dem Ausgangswert auf  $40 \text{ kJ/m}^2$  ab, liegt damit aber noch über der Schlagzugzähigkeit von V1. Die Waschbehandlung mit der höheren Temperatur deutet anhand der Ergebnisse der Materialien V1 und V2 eine Verbesserung der Schlagzugzähigkeit

an, jedoch nimmt der Wert von V2 stärker ab. Bei der Betrachtung der Ergebnisse von V3 und V4 wird dieser Zusammenhang jedoch nicht bestätigt. Der Ausgangswert von V3 mit 60 °C Natronlauge Waschbehandlung beträgt 42 kJ/m<sup>2</sup> und liegt damit deutlich über dem Ausgangswert von V4 mit 35 kJ/m<sup>2</sup>. Der Unterschied wird jedoch von der hohen Standardabweichung von V4 mit 31 % relativiert. Die Schlagzugzähigkeit von V3 bleibt bis zur dritten Extrusion relativ stabil und sinkt nach der fünften Extrusion etwas stärker ab. Nach fünf Extrusionen verliert V3 am stärksten der vier Materialien mit einer relativen Reduktion der Schlagzugzähigkeit um 9 % gegenüber der Ausgangsbasis. Im Gegensatz zu V3 verzeichnet V4 nach der ersten Extrusion einen deutlichen Anstieg von 16 %. Der Wert nach der fünften Extrusion liegt noch 9 % über der Ausgangsbasis.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die verschiedenen Waschparameter unterschiedliche Auswirkungen auf die anfängliche Schlagzugzähigkeit haben, was jedoch auch auf eine stärkere Inhomogenität im Ausgangszustand hindeuten könnte. Nach mehreren Verarbeitungsschritten nähern sich die Messerergebnisse, insbesondere jene mit Natronlauge Waschbehandlung, an. Unter Berücksichtigung der hohen Standardabweichungen lässt sich eine tendenzielle Abnahme der Schlagzugzähigkeit erkennen, was sich mit dem erwarteten Verhalten deckt. [38]



**Abbildung 62:** Schlagzugversuch PP spritzgegossen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen

### PS Flakes tiefgezogen & PS Flakes und Regranulat tiefgezogen (Fa. Viscotec)

Behandelte Materialien in diesem Abschnitt:

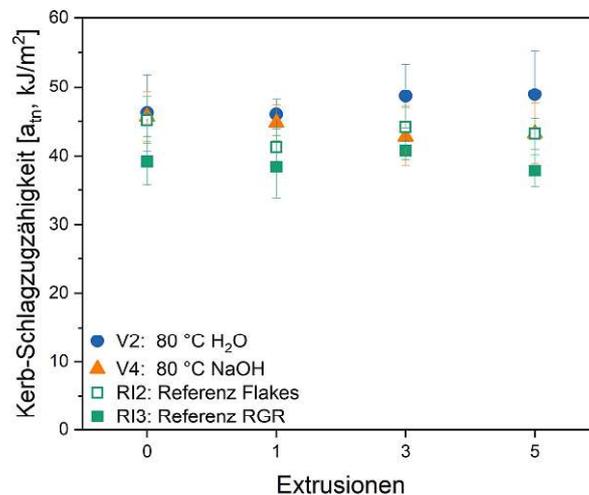
Material	Kurzform für Beschreibung
PS tgz 80 °C H <sub>2</sub> O	V2
PS tgz 80 °C NaOH	V4
Referenz Industrie: PS tgz (Viscotec)	RI2
Referenz Industrie: PS tgz Regranulat (Viscotec)	RI3

Die Schlagzugzähigkeit der Materialien V2, V4 und RI2 liegen in der Ausgangsbasis sehr dicht aneinander. V2 startet mit einem Wert von 46 kJ/m<sup>2</sup>, welcher sich mit zunehmender Anzahl an

Extrusionen tendenziell steigert. Nach der fünften Extrusion liegt dieser 6 % über dem Ausgangswert. Die Schlagzugzähigkeit von V4 sinkt nach fünf Extrusionen hingegen um 5 % auf  $43 \text{ kJ/m}^2$  ab. Damit liegen die Werte von V4 stets unter denen von V2.

Der Verlauf und die Werte der Schlagzugzähigkeit von RI2 ähneln jenen von V2 und V4. Das Material weist jedoch geringere Schwankungen über die Verarbeitungsstufen auf. Nach der fünften Extrusion liegt der Wert mit  $43 \text{ kJ/m}^2$  4 % unter dem Ausgangszustand.

Die niedrigste Schlagzugzähigkeit über alle Stufen hat das Material RI3. Sie beträgt in der Ausgangsbasis  $39 \text{ kJ/m}^2$  und sinkt bis zur fünften Extrusion kontinuierlich um 4 % auf  $38 \text{ kJ/m}^2$ . Insgesamt bleiben die Werte der Schlagzugzähigkeit über alle Verarbeitungsstufen hinweg weitgehend konstant und liegen nahezu gänzlich im Bereich der Standardabweichungen.



**Abbildung 63:** Schlagzugversuch PS tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen sowie industriell aufbereitete Flakes und Regranulat (RGR) (Fa. Viscotec)

### 3.4.2 Duschgelflasche

Tabelle 30 fasst die Ergebnisse der Zug- und der Schlagzugversuche der Materialien der Duschgelflasche zusammen. Die Beschreibung der Ergebnisse folgt in den anschließenden Kapiteln, unterteilt nach Versuchsmethode.

**Tabelle 30:** Messergebnisse Zug- und Schlagzugversuch - Komponenten der Duschgelflasche

Material	Extrusionen	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{IN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
Body HDPE	0x	$1036,4 \pm 14,6$	$26,9 \pm 0,4$	$880,8 \pm 151,1$	$64,6 \pm 1,6$
Body HDPE	1x	$1040,1 \pm 33,6$	$27,2 \pm 0,4$	$806,9 \pm 161,4$	$65,1 \pm 6,1$
Cap PP	0x	$1032,4 \pm 39,4$	$36,1 \pm 1$	$1043,8 \pm 21,6$	$56,9 \pm 13,1$
Cap PP	1x	$1032 \pm 28,8$	$34,9 \pm 1,5$	$1097,8 \pm 16$	$32,4 \pm 10,9$
Blend (HDPE+PP)	1x	$1019,4 \pm 59,7$	$26 \pm 0,5$	$8,7 \pm 1,3$	$23,6 \pm 3,5$

### 3.4.2.1 Zugversuch

**Der E-Modul** bleibt nach einer Extrusion für beide Einzelmaterialien weitgehend gleich, wobei die geringe Differenz innerhalb der Standardabweichung liegt. Die Standardabweichung steigt nach der Extrusion bei HDPE an, während sie bei PP etwas abnimmt.

Die Mischung der beiden Materialien HDPE und PP hat einen leicht reduzierten E-Modul von 1019 MPa gegenüber 1040 MPa und 1032 MPa und eine höhere Standardabweichung im Vergleich zu den Einzelmaterialien nach einer Extrusion.

**Die Zugfestigkeit** von HDPE zeigt eine leichte Erhöhung nach einer Extrusion, PP hingegen eine leichte Abnahme. Die Standardabweichung von HDPE zeigt keine Veränderung, jene von PP steigt an. Die Zugfestigkeit der Materialmischung liegt mit 26 MPa unterhalb jener der Einzelmaterialien nach einer Verarbeitung, knapp unterhalb jener von reinem HDPE nach einer Verarbeitung. Die Standardabweichung liegt geringfügig oberhalb von HDPE und deutlich unter jener von reinem PP.

**Die Bruchdehnung** von HDPE verzeichnet einen Rückgang um 8,4 % auf 807 %. Die Standardabweichung bleibt nach der Extrusion hoch mit einem Wert von 161 %, was einer Schwankung von 20 % entspricht. Im Gegensatz zu der Bruchdehnung von HDPE steigt jene von PP nach einer Extrusion um 5 %. Die Standardabweichung ist vergleichsweise gering und liegt im Durchschnitt bei 19 %. PP zeigt mit 1044 % und 1098 % höhere Bruchdehnungen. Die Mischung der beiden Materialien resultiert in einem extrem spröden Verhalten im Vergleich zu den reinen Materialien. Die Bruchdehnung der Mischung liegt nach einer Verarbeitung nur mehr bei 8,7 %.

### 3.4.2.2 Schlagzugversuch

Die Schlagzähigkeit von HDPE bleibt nach einer Extrusion nahezu unverändert. Dieser steigt lediglich um 0,7 % auf 65 kJ/m<sup>2</sup>. Die Standardabweichung nimmt von 1,6 auf 6,1 kJ/m<sup>2</sup> vergleichsweise stark zu. Die Schlagzähigkeit von PP nimmt stark ab. Sie reduziert sich um 43 %, auf 32 kJ/m<sup>2</sup>. Die Standardabweichung bleibt hoch und liegt in beiden Verarbeitungsstufen über jener von HDPE. Die Materialmischung weist mit 24 kJ/m<sup>2</sup> den mit Abstand niedrigsten Wert der Schlagzugzähigkeit auf.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Einfluss verschiedener Waschparameter sowie makromolekularer Kontaminationen auf die mechanischen und rheologischen Eigenschaften von Post-Consumer-Verpackungskunststoffen untersucht. Im Fokus standen die Kunststoffe Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS). Als Ausgangsmaterial dienten verschiedene tiefgezogene und spritzgegossene PP Becher sowie tiefgezogene PS Becher, die gesammelt, sortiert und mittels unterschiedlicher Waschverfahren aufbereitet wurden. Dabei erfolgt eine Variation der Temperatur (60 °C/80 °C) und das Waschmedium (Wasser/Natronlauge). Ein Schwimm-Sink-Verfahren diente der Abtrennung störender Bestandteile, wie Aluminium und anderer Kunststoffe. Zusätzlich fand eine Untersuchung von Referenzmaterialien aus industrieller Aufbereitung (ganze Becher, Flakes und vakuumbehandeltes Regranulat) statt. Zur Simulation des Recyclingprozesses wurden die Materialien fünfmal extrudiert und zwischen jeder Extrusion mit einer Mühle zerkleinert. Zudem wurde die Bedeutung sortenreiner Trennung am Beispiel einer Duschgelflasche evaluiert, wobei sich das Mischungsverhältnis aus den Massenanteilen des Hohlkörpers der Flasche aus HDPE (~75 %) und der Verschlusskappe mit Scharnierfunktion aus PP (~25 %), an der ganzen Duschgelflasche, ergab.

Nach dem Schwimm-Sink-Verfahren erfolgte eine manuelle Sortierung der Materialien zur Bestimmung der Materialzusammensetzung auf Basis der optischen Erscheinung (siehe Abbildung 41 und Abbildung 43). Von den PP Flakes wurde von jeder Materialserie, die den verschiedenen Waschbehandlungen unterzogen wurden, eine Stichprobe von etwa 10 % des weiter verarbeiteten Materials sortiert. Daher sind die Ergebnisse lediglich als Indikation der tatsächlichen Zusammensetzung zu verstehen. Die PS Flakes wurden dagegen vollständig sortiert, da diese der Sinkfraktion angehörten. Es zeigte sich bei den tiefgezogenen PP Flakes, dass die Verwendung von Natronlauge und höheren Temperaturen zu einer effektiveren Entfernung von Etiketten und Druckfarben führt. Auch bei den spritzgegossenen PP Flakes stellte sich heraus, dass Natronlauge in Kombination mit einer höheren Temperatur die Druckfarben auf „in-mold Labels“ wirksamer entfernte als die anderen angewandten Waschbehandlungen (siehe Abbildung 42). Die Bedeutung der Entfernung von Druckfarben für das Recycling von Kunststoffen ist bereits in Studien belegt, da verbleibende Farbbrückstände, insbesondere solche auf Basis von Nitrocellulose, die mechanischen Eigenschaften, die Farbqualität und die Geruchsneutralität von recyceltem Kunststoff deutlich verschlechtern können. [39] Obwohl NaOH primär zur Fettentfernung eingesetzt wird, unterstützt es auch die Deinking-Wirkung, insbesondere in Kombination mit geeigneten Tensiden [40], wobei diese in dieser Arbeit nicht Gegenstand der Untersuchungen waren. Bei den PS Flakes hatte die NaOH Wäsche einen deutlich geringeren Aluminiumanteil zur Folge, was auf die aluminiumlösende Wirkung von Natronlauge zurückzuführen ist [31] (siehe Abbildung 43). Weiters zeigte sich Natronlauge bei der Entfernung von Druckfarbe überlegen. Nach der Mehrfachverarbeitung war bei den Probekörpern aus spritzgegossenem PP eine stärkere Dunkelfärbung zu erkennen (siehe Abbildung 73 bis Abbildung 76), als bei jenen aus tiefgezogenem PP (siehe Abbildung 69 bis Abbildung 72). Dies deutet auf eine thermo-mechanische Degradation hin. Als mögliche Ursache werden denkbare Unterschiede in der Farbgebung zwischen „in-mold“ bedruckten und direkt bedruckten tiefgezogenen Bechern

vermutet. Der Einfluss unterschiedlicher Farbstoffe auf das Materialverhalten während der Mehrfachverarbeitung bedarf weiterer systematischer Untersuchungen.

Während der Sortierung wurde in den PP Flakes Folienanteile festgestellt, welche nach dem Schwimm-Sink-Verfahren der Schwimmfraktionen angehörten. Diese Anteile wurden zur Weiterverarbeitung in den Flakes belassen, um einerseits die wahre Zusammensetzung der Stichproben abzubilden, und andererseits da keine Windsichtung zur Verfügung stand, um Folien aus dem gesamten Material, welches zu Proben verarbeitet wurde, zu entfernen. Dies bestätigte sich bei den DSC-Analysen der PP Fraktion, durch geringfügige Wärmtönungen, deren Schmelztemperaturen auf Verunreinigungen mit PE-LLD hindeuten. Im Fall der PS Fraktion deuten die DSC-Analysen auf keine Fremdmaterialien hin, was darauf schließen lässt, dass Polyolefine durch das Schwimm-Sink-Verfahren weitestgehend abgetrennt werden konnten.

Bei den Messergebnissen der rheologischen und mechanischen Untersuchungen zeigten sich in den 0er-Serien (nicht extrudierte Flakes) tendenziell große Schwankungen, da ohne Extrusion kaum eine Homogenisierung des Materials stattfinden konnte.

Die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen des tiefgezogenen PP waren im Vergleich zum spritzgegossenen PP unauffällig, wobei eine Tendenz erkennbar war, dass die Verwendung von Natronlauge als Waschmedium einen stärkeren Abbau zur Folge hatte. Dies zeigte sich durch einen stärkeren Anstieg der MFR und eine geringere, sowie stärker abnehmende, Viskosität infolge der Mehrfachverarbeitungen. Die mechanischen Ergebnisse zeigten, dass die Parameter 80 °C NaOH Anzeichen einer Versprödung des tiefgezogenen PP zur Folge hatten, erkennbar an einem erhöhten E-Modul bei gleichzeitig reduzierter Bruchdehnung (siehe Abbildung 58). Dieses Verhalten lässt sich sowohl bei tiefgezogenen als auch spritzgegossenen PP Proben in ähnlicher Form beobachten. Die Kennwerte des tiefgezogenen PP Referenzmaterials (Becher der Fa. Greiner) deuten auf eine stärkere Degradation bei Mehrfachverarbeitung hin, wobei sich dies besonders anhand der rheologischen Kennwerte bemerkbar machte (siehe Abbildung 45 und Abbildung 49), sowie dem Abfall der Bruchdehnung mit zunehmender Anzahl an Extrusionen.

Auch die Ergebnisse des spritzgegossenen PP zeigten die stärkste Degradation des Materials mit der 80 °C NaOH Waschbehandlung, durch einen stärkeren Anstieg der MFR, der niedrigsten Viskosität und dem deutlichsten Viskositätsabfall mit zunehmender Verarbeitungsanzahl, während die Materialien der Wasserwäsche vergleichsweise höhere Viskositätswerte erreichten. Bei den mechanischen Kennwerten war auffällig, dass die Bruchdehnung des spritzgegossenen PP, mit der 80 °C NaOH Waschbehandlung, besonders in der Ausgangsbasis sehr hoch war, und auch noch nach drei Extrusionen über allen anderen Materialien lag (siehe Abbildung 59). Dafür liegt keine Erklärung vor.

Die Ergebnisse der PS Proben zeigten, dass PS aufgrund seiner Eigenschaften besser für Recyclingprozesse geeignet ist als PP, welches stärker unter thermo-mechanischer Degradation leidet. Die Waschparameter (Temperatur, Medium) zeigten im Fall von PS kaum Auswirkungen auf die mechanischen und rheologischen Eigenschaften. Insbesondere anhand der rheologischen Eigenschaften waren keine Auswirkungen feststellbar. Aus den Kennwerten der tiefgezogenen PS Referenzmaterialien (Flakes und Regranulat der Fa. Viscotec) ging hervor, dass diese aufgrund anderer MFR Werte und Bruchdehnungen in der Ausgangsbasis, nur bedingt mit den Materialien des Waschversuchs vergleichbar waren. Die Ergebnisse der mechanischen Prüfungen der PS Referenzmaterialien zeigten sehr stabile Werte und geringe

Auswirkungen der Mehrfachverarbeitung, wobei das Regranulat mit Vakuumbehandlung einen stärkeren Abbau aufwies. Dies zeigte sich durch eine stärker ansteigende MFR und eine stärker abfallende Viskosität mit zunehmender Verarbeitung.

Die Untersuchungen der Materialien der Duschgefäßflasche zeigten die möglichen negativen Auswirkungen durch Kontamination mit einem anderen Kunststoff auf, die zu erheblichen Eigenschaftsverlusten führen können. Die untersuchte HDPE/PP-Mischung führte zu einer deutlichen Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften, insbesondere bei Bruchdehnung und Schlagzähigkeit. Die Ergebnisse verdeutlichen die Relevanz von sortenreiner Trennung, sowie der Berücksichtigung von „Design for Recycling“ Grundsätzen. [16]

## Fazit

Zusammenfassend zeigt sich, dass sich durch Verwendung von Natronlauge und höheren Temperaturen bessere Reinigungseffekte erzielen lassen, was jedoch mit einer tendenziellen Beeinträchtigung von rheologischen und mechanischen Eigenschaften einhergeht.

Die Auswirkungen waren im Fall von PP anhand der Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen etwas deutlicher ausgeprägt. Im Fall von PS, waren anhand der Ergebnisse der rheologischen und mechanischen Untersuchungen kaum Unterschiede festzustellen.

Weiters geht hervor, dass der Abbau mit zunehmender Verarbeitungsanzahl bei spritzgegossenem PP ausgeprägter war, was daran liegt, dass sich weitere Kettenspaltungen bei Materialien mit niedrigerer Molmasse gravierender auswirken, da die bereits verkürzten Makromoleküle eine höhere Empfindlichkeit gegenüber zusätzlichem Abbau aufweisen. [41] Zu beachten ist, dass im Rahmen der Mehrfachverarbeitung auf den Einsatz von Stabilisatoren verzichtet wurde, was von der üblichen Vorgehensweise im Recycling abweicht.

Die im Zuge der manuellen Sortierung nachgewiesenen Folienverunreinigungen sprechen für den Einsatz einer Windsichtung zur Effizienzsteigerung der Materialtrennung und Verbesserung der Qualität des Rezyklats.

Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse die unterschiedlichen Eigenschaften von tiefgezogenen und spritzgegossenem PP auf, welche bei einer erneuten Verarbeitung Einfluss auf den Verarbeitungsprozess haben. [29] Die Auswirkungen der Mischung von PP mit verschiedenen initialen Verarbeitungsverfahren (Spritzguss und Tiefziehen) auf das Recycling wurde durch Studien wie [16] und [29] dokumentiert. Sie unterstreichen die Bedeutung angepasster Sortier- und Aufbereitungsverfahren, um die Materialqualität recycelter Kunststoffe langfristig zu erhalten.

## 5 Anhang

### 5.1 Messergebnisse Bechermaterialien

Ergebnisse der Sortierung zur Bestimmung der Zusammensetzung:

**Tabelle 31:** Ergebnisse Sortierung PP Flakes (tiefgezogen)

Fraktionen [%]	60 °C H <sub>2</sub> O	80 °C H <sub>2</sub> O	60 °C NaOH	80 °C NaOH
transparent	33,7%	35,5%	31,7%	26,5%
weiß	32,5%	29,5%	38,5%	51,9%
bedruckt	17,2%	13,0%	14,3%	7,2%
etikettiert	8,8%	16,7%	10,2%	7,1%
bunt (vollständig eingefärbt)	5,4%	3,5%	3,2%	5,6%
Folien	2,4%	1,8%	2,1%	1,7%
Aluminium	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
nicht identifiziert	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

**Tabelle 32:** Ergebnisse Sortierung PP Flakes (spritzgegossen)

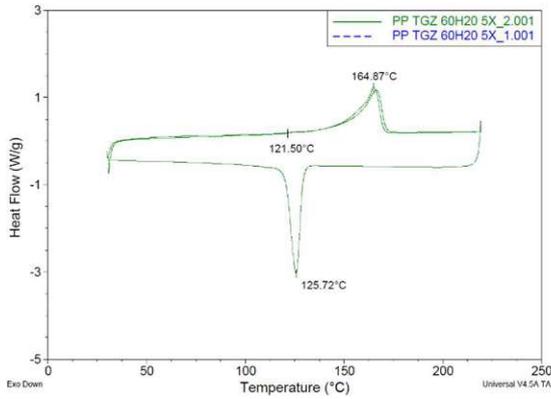
Fraktionen [%]	60 °C H <sub>2</sub> O	80 °C H <sub>2</sub> O	60 °C NaOH	80 °C NaOH
transparent	6,9%	12,6%	11,8%	9,9%
weiß	22,1%	18,5%	20,2%	17,6%
bedruckt	9,4%	16,3%	11,4%	10,6%
etikettiert	39,3%	33,3%	38,8%	29,5%
bunt (vollständig eingefärbt)	21,4%	15,4%	16,9%	31,4%
Folien	0,9%	3,9%	1,0%	0,9%
Aluminium	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
nicht identifiziert	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%

**Tabelle 33:** Ergebnisse Sortierung PS Flakes (tiefgezogen)

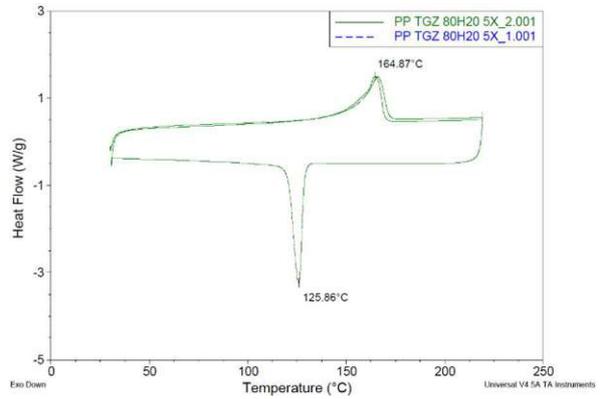
Fraktionen [%]	80 °C H <sub>2</sub> O	80 °C NaOH
transparent	5,6%	6,8%
weiß	44,4%	86,0%
etikettiert	0,5%	2,8%
bunt (bedruckt & vollständig eingefärbt)	47,0%	3,7%
Folien	0,3%	0,5%
Aluminium	2,1%	0,2%
nicht identifiziert	0,1%	0,1%

**Ergebnisse DSC-Versuche:**

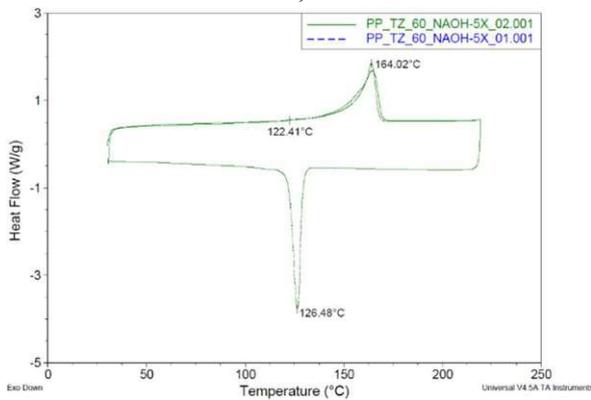
**PP tiefgezogen:**



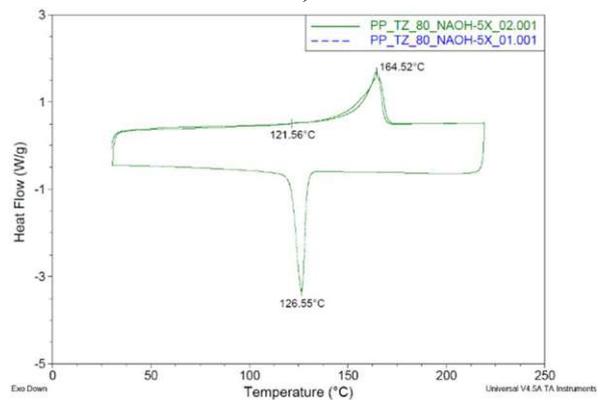
a)



b)



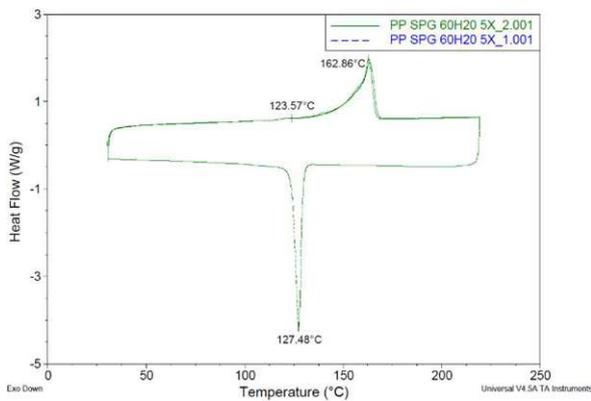
c)



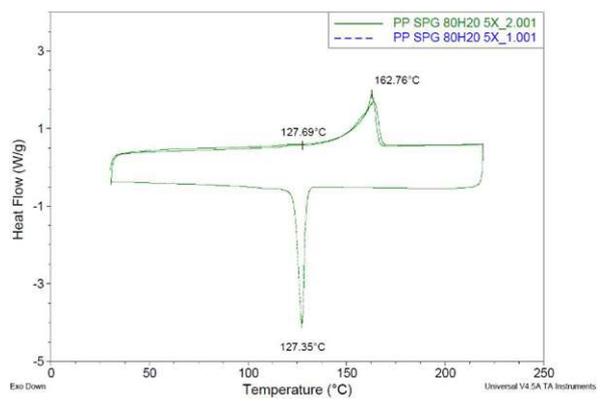
d)

**Abbildung 64: DSC - PP Flakes tiefgezogen**

**PP spritzgegossen:**



a)



b)

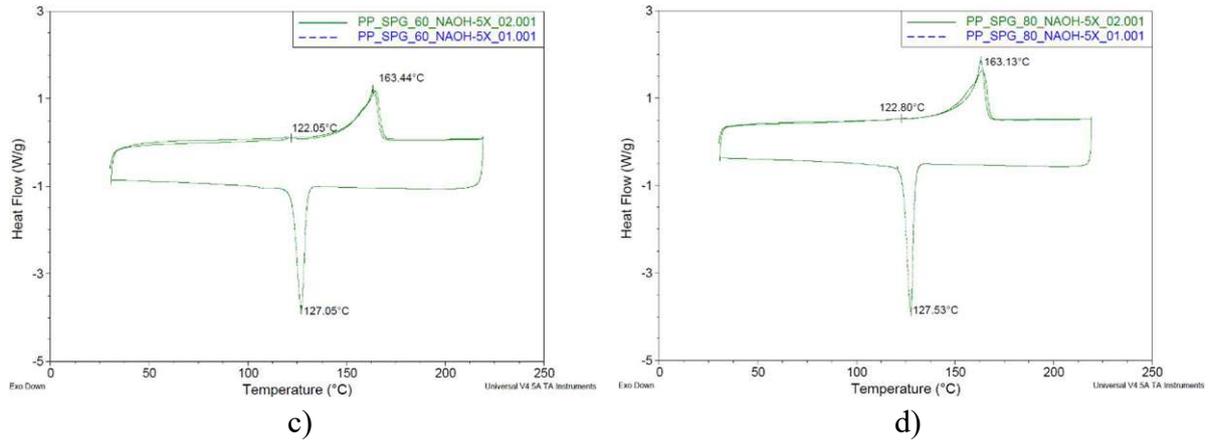


Abbildung 65: DSC - PP Flakes spritzgegossen: a) 60 °C H<sub>2</sub>O, b) 60 °C NaOH, c) 80 °C H<sub>2</sub>O, d) 80 °C NaOH

PS tiefgezogen:

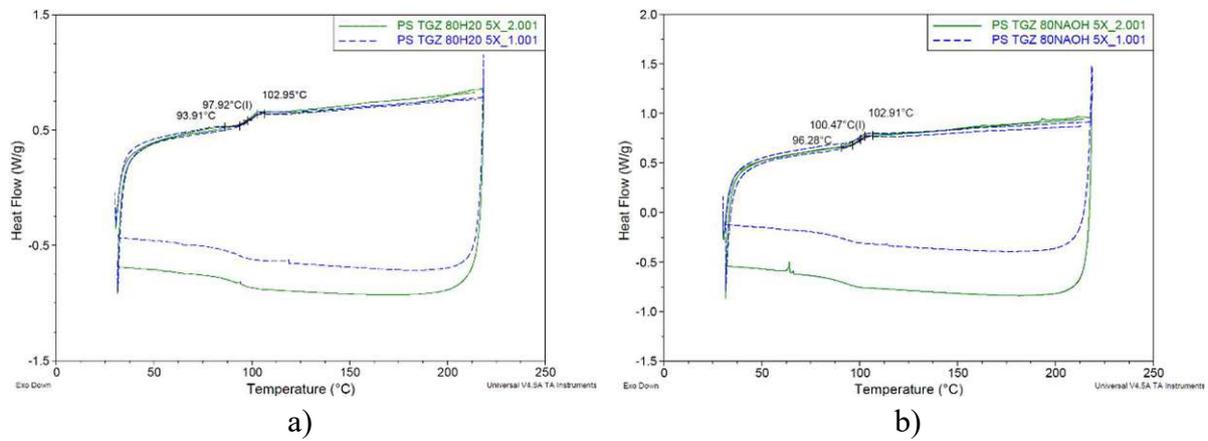


Abbildung 66: DSC - PS Flakes tiefgezogen: a) 80 °C H<sub>2</sub>O, b) 80 °C NaOH

Ergebnisse der Zugversuche, Schlagzugversuch und MFR Versuche:

PP tiefgezogen:

Tabelle 34: Messergebnisse PP Flakes (tiefgezogen) 60 °C H<sub>2</sub>O

Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
0x	17,8 ± 2,8	1415,7 ± 63,4	36,8 ± 3,3	792,7 ± 140,1	50,3 ± 5,5
1x	11,5 ± 0,9	1436 ± 65,8	37,8 ± 2,4	861,1 ± 106,7	51,8 ± 3,7
3x	13,5 ± 1,5	1351,5 ± 48	36,4 ± 2,9	849 ± 139	49 ± 5,5
5x	16,7 ± 0,3	1326,4 ± 44,3	33,7 ± 3	614,7 ± 250,7	48,7 ± 4,2

**Tabelle 35:** Messergebnisse PP Flakes (tiefgezogen) 80 °C H<sub>2</sub>O

Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
0x	13,9 ± 1,3	1536,6 ± 50,0	32,3 ± 0,5	520,0 ± 90,9	49,4 ± 4
1x	16,5 ± 0,5	1452,5 ± 47,0	33,4 ± 2,3	693,9 ± 123,6	49,3 ± 5,3
3x	14,3 ± 0,1	1631,8 ± 72,2	32,3 ± 1,3	555,8 ± 129,7	49,7 ± 3,6
5x	15,3 ± 0,3	1560,5 ± 80,2	32,1 ± 1,5	585,1 ± 207	49,8 ± 3,3

**Tabelle 36:** Messergebnisse PP Flakes (tiefgezogen) 60 °C NaOH

Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
0x	18,1 ± 1,7	1535,3 ± 81,3	34,9 ± 2,6	766,4 ± 189,5	57,7 ± 8
1x	13,8 ± 0,9	1516,3 ± 82,2	35,7 ± 3,4	825,9 ± 158,3	54,5 ± 5,1
3x	18,2 ± 0,3	1426,4 ± 35,8	32,7 ± 2,0	794,6 ± 156,4	52,2 ± 2,2
5x	24,1 ± 1,1	1387,7 ± 63,3	30,9 ± 1,3	685,6 ± 154,4	48,6 ± 3

**Tabelle 37:** Messergebnisse PP Flakes (tiefgezogen) 80 °C NaOH

Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
0x	13,6 ± 0,7	1604,1 ± 45,9	33,1 ± 0,9	251,0 ± 211,6	47,4 ± 10
1x	13,6 ± 1,6	1730,9 ± 95,6	32,4 ± 0,7	349,4 ± 204,8	50,5 ± 4,7
3x	13,6 ± 0,4	1729,4 ± 78,4	32,7 ± 0,6	413,9 ± 243,1	44,3 ± 3,4
5x	16,7 ± 0,6	1674,5 ± 86,8	32,0 ± 0,5	322,5 ± 231,8	46,5 ± 2,7

**Tabelle 38:** Messergebnisse PP Becher (tiefgezogen) 100 % Rezyklatanteil (von Fa. Greiner industriell aufbereitet)

Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
0x	24,4 ± 0,4	1374,8 ± 66,0	33,3 ± 1,4	705,7 ± 157,6	51,7 ± 2,9
1x	27,9 ± 0,4	1360,3 ± 66,6	32,1 ± 0,4	607,7 ± 111	52,2 ± 7,7
3x	40,8 ± 1,4	1366,1 ± 31,3	31,8 ± 0,3	357 ± 97,4	42,6 ± 3,8
5x	51,7 ± 0,4	1342,8 ± 27,8	31,4 ± 0,4	167,8 ± 111,9	39 ± 3,3

**PP spritzgegossen:****Tabelle 39:** Messergebnisse PP Flakes (spritzgegossen) 60 °C H<sub>2</sub>O

Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
0x	52,0 ± 1,5	1248,2 ± 57,1	25,3 ± 0,6	14,8 ± 5,3	35,0 ± 4,9
1x	56,8 ± 1,9	1151,6 ± 70,7	25,1 ± 0,5	18,5 ± 5,5	37,1 ± 3,9
3x	67,9 ± 2,7	1126,4 ± 123	24,7 ± 0,4	14 ± 5,8	38,7 ± 2,8
5x	89,1 ± 3,4	1180,7 ± 85	24,7 ± 0,4	11,9 ± 2,7	37,8 ± 1,7

**Tabelle 40:** Messergebnisse PP Flakes (spritzgegossen) 80 °C H<sub>2</sub>O

Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
0x	34,8 ± 8,1	1205,8 ± 22	26,5 ± 0,7	17,7 ± 10,2	43 ± 3,2
1x	53,6 ± 1,6	1153,7 ± 68,8	26,5 ± 0,6	22,2 ± 9,1	43,5 ± 1,6
3x	60,3 ± 1,4	1161,4 ± 35,7	25,6 ± 0,4	15,1 ± 4,3	41,4 ± 1,4
5x	73,5 ± 2,1	1203,3 ± 16,3	25,6 ± 0,3	17,1 ± 4,6	39,9 ± 2

**Tabelle 41:** Messergebnisse PP Flakes (spritzgegossen) 60 °C NaOH

Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
0x	55,0 ± 2,3	1265,7 ± 105,5	25,6 ± 0,5	21,4 ± 4,3	42,3 ± 1,5
1x	59,1 ± 2,3	1224,3 ± 33,2	25,4 ± 0,4	20,4 ± 6,3	43,3 ± 1,7
3x	73,7 ± 3,0	1189,6 ± 23,0	24,6 ± 0,6	11,6 ± 3,4	41,5 ± 1,3
5x	85,7 ± 6,8	1166,8 ± 18,6	23,9 ± 0,7	8,6 ± 1,9	38,4 ± 6,3

**Tabelle 42:** Messergebnisse PP Flakes (spritzgegossen) 80 °C NaOH

Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
0x	49,7 ± 3,5	1172,8 ± 88,5	25,2 ± 0,5	44,6 ± 25,7	35,1 ± 11
1x	63 ± 0,8	1193,5 ± 24,3	25,1 ± 0,4	32 ± 7,2	40,7 ± 2,8
3x	77 ± 2,2	1267,6 ± 38,2	25 ± 0,5	19,6 ± 6,8	39 ± 2,8
5x	94,9 ± 6,1	1283,7 ± 24,8	25 ± 0,3	15,5 ± 2,9	38,2 ± 3,3

**PS tiefgezogen:****Tabelle 43:** Messergebnisse PS Flakes (tiefgezogen) 80 °C H<sub>2</sub>O

Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
0x	3,1 ± 0,8	2404,5 ± 214,5	35,2 ± 0,7	22,2 ± 7,6	46,2 ± 5,6
1x	3,9 ± 0,1	2409 ± 197,3	35,6 ± 0,7	29,7 ± 5,2	46,0 ± 2,1
3x	4,5 ± 0,1	2432 ± 361,4	35,6 ± 0,7	26,4 ± 4,9	48,7 ± 4,6
5x	4,2 ± 0,1	2406,2 ± 336,1	36,5 ± 0,5	28,5 ± 4,2	48,9 ± 6,3

**Tabelle 44:** Messergebnisse PS Flakes (tiefgezogen) 80 °C NaOH

Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
0x	3 ± 1,4	2466 ± 276,0	34,1 ± 0,9	18,1 ± 4,1	45,6 ± 3,5
1x	4 ± 0,1	2437,8 ± 225,1	35 ± 1,1	21,7 ± 4,4	44,8 ± 2,5
3x	4,2 ± 0,1	2171,7 ± 363,3	34 ± 0,6	16,5 ± 4,7	42,8 ± 4,2
5x	4,8 ± 0,1	2295,8 ± 451	34,6 ± 0,9	20,2 ± 3,4	43,3 ± 4,3

**Tabelle 45:** Messergebnisse PS Flakes (tiefgezogen) (von Fa. Viscotec industriell aufbereitet)

Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
0x	5,3 ± 0,1	2380,5 ± 310,7	34 ± 0,6	42,5 ± 4,9	45,1 ± 3,4
1x	4,3 ± 0,1	2489,4 ± 76,8	34,2 ± 0,6	40,1 ± 5,3	41,3 ± 2,9
3x	3,5 ± 0,1	2543,3 ± 81	34,7 ± 0,7	40 ± 5,6	44,2 ± 3
5x	5,7 ± 0,3	2551,1 ± 76,3	34 ± 0,4	39,8 ± 1,9	43,2 ± 2,3

**Tabelle 46:** Messergebnisse PS Regranulat (tiefgezogen) (von Fa. Viscotec industriell aufbereitet)

Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
0x	4,9 ± 0,2	2434,3 ± 154,2	37,4 ± 0,9	39,6 ± 3	39,2 ± 3,5
1x	6,5 ± 0,1	2421,8 ± 103,4	35,8 ± 0,3	37 ± 4	38,4 ± 4,6
3x	5,9 ± 0,1	2433,3 ± 119,3	35,6 ± 0,6	38,9 ± 3,4	40,8 ± 1,3
5x	6,4 ± 0,2	2457,7 ± 86,7	35,4 ± 0,5	36,9 ± 3,6	37,8 ± 2,4

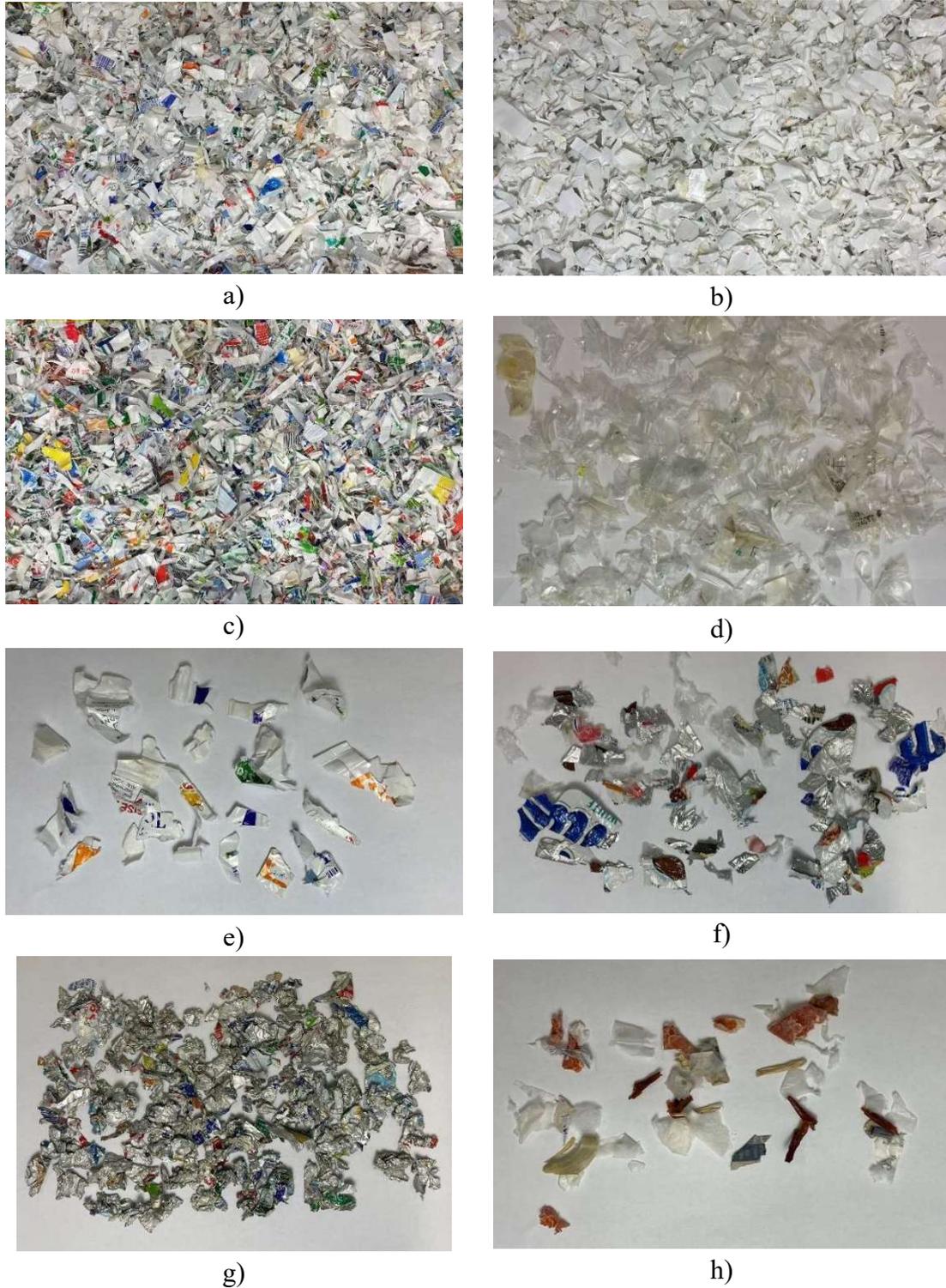
## 5.2 Messergebnisse Duschgeflosche

**Tabelle 47:** Messergebnisse Komponenten der Duschgeflosche

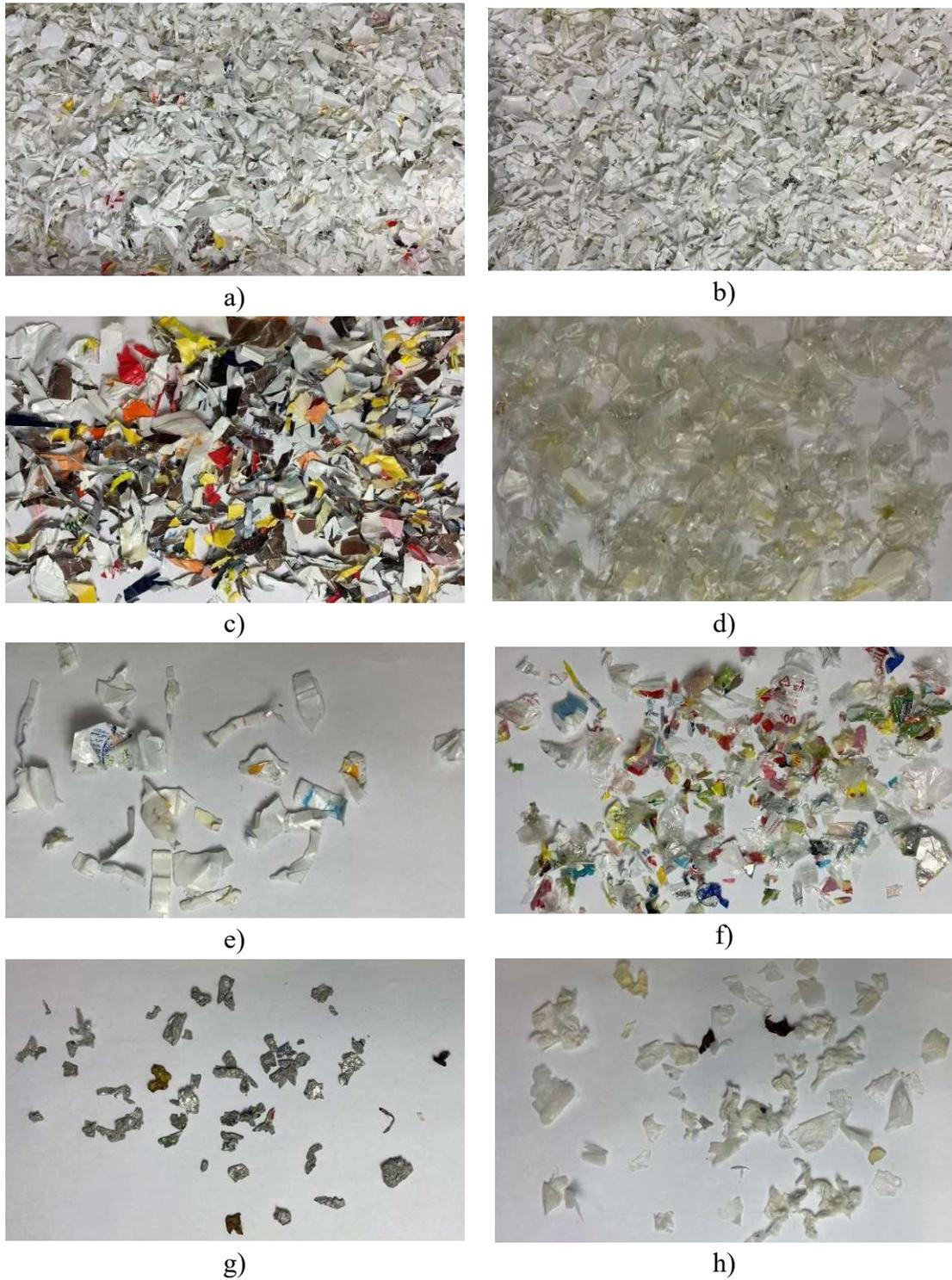
Material	Extrusionen	MFR [g/10 min]	E-Modul [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_b$ [%]	$a_{tN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
Body HDPE	0x	2,3 ± 0,2	1036,4 ± 14,6	26,9 ± 0,4	880,8 ± 151,1	64,6 ± 1,6
Body HDPE	1x	1,9 ± 0,3	1040,1 ± 33,6	27,2 ± 0,4	806,9 ± 161,4	65,1 ± 6,1
Cap PP	0x	33,8 ± 1,2	1032,4 ± 39,4	36,1 ± 1	1043,8 ± 21,6	56,9 ± 13,1
Cap PP	1x	39,9 ± 1,4	1032 ± 28,8	34,9 ± 1,5	1097,8 ± 16	32,4 ± 10,9
Blend (HDPE+PP)	1x	8 ± 0,9	1019,4 ± 59,7	26 ± 0,5	8,7 ± 1,3	23,6 ± 3,5

### 5.3 Fotos

PS Flakes tiefgezogen (80 °C H<sub>2</sub>O Waschbehandlung):

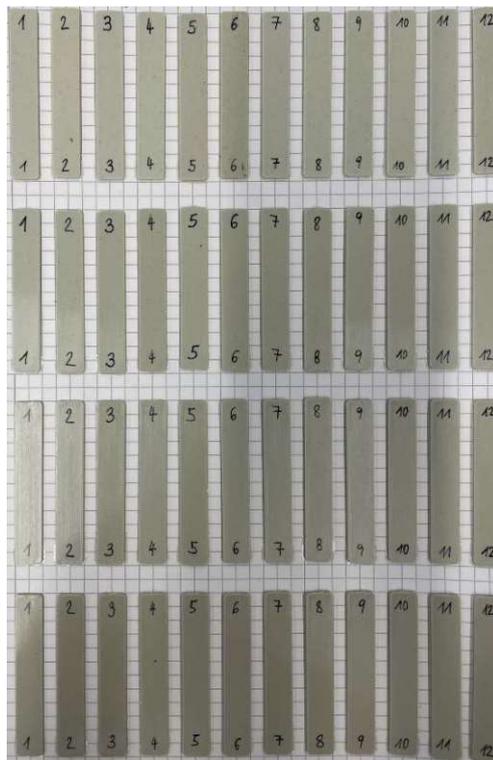


**Abbildung 67:** Fraktionen der PS Flakes mit 80 °C H<sub>2</sub>O Waschbehandlung: a) Flakes vor Sortierung, b) weiß, c) bunt, d) transparent, e) etikettiert, f) Folien, g) Aluminium, h) nicht identifiziertes Material

**PS Flakes tiefgezogen (80 °C NaOH Waschbehandlung):**

**Abbildung 68:** Fraktionen der PS Flakes mit 80 °C NaOH Waschbehandlung: a) Flakes vor Sortierung, b) weiß, c) bunt, d) transparent, e) etikettiert, f) Folien, g) Aluminium, h) nicht identifiziertes Material

**Probekörper Waschversuche (PP Flakes tiefgezogen):**



**Abbildung 69:** Probekörper Schlagzugversuch PP tiefgezogen 60 °C H<sub>2</sub>O; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert



**Abbildung 70:** Zugstäbe PP tiefgezogen 80 °C H<sub>2</sub>O; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert



**Abbildung 71:** Zugstäbe PP tiefgezogen 60 °C NaOH; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert



**Abbildung 72:** Zugstäbe PP tiefgezogen 80 °C NaOH; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert

**Zugstäbe Waschversuche (PP Flakes spritzgegossen):**

**Abbildung 73:** Zugstäbe PP spritzgegossen 60 °C H<sub>2</sub>O; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert



**Abbildung 74:** Zugstäbe PP spritzgegossen 80 °C H<sub>2</sub>O; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert



**Abbildung 75:** Zugstäbe PP spritzgegossen 60 °C NaOH; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert



**Abbildung 76:** Zugstäbe PP spritzgegossen 80 °C NaOH; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert

**Zugstäbe Waschversuche (PS Flakes tiefgezogen):**

**Abbildung 77:** Zugstäbe PS tiefgezogen 80 °C H<sub>2</sub>O; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert

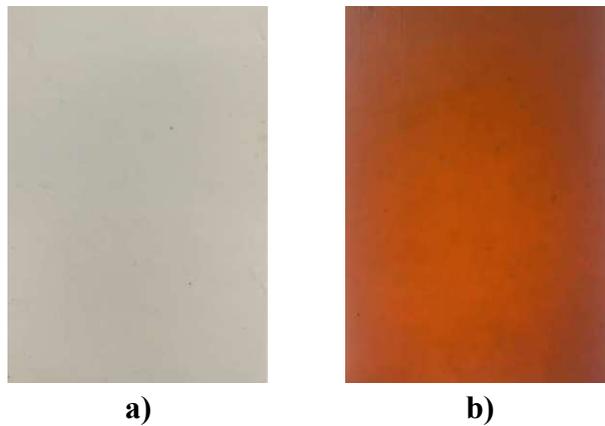


**Abbildung 78:** Zugstäbe PS tiefgezogen 80 °C NaOH; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert

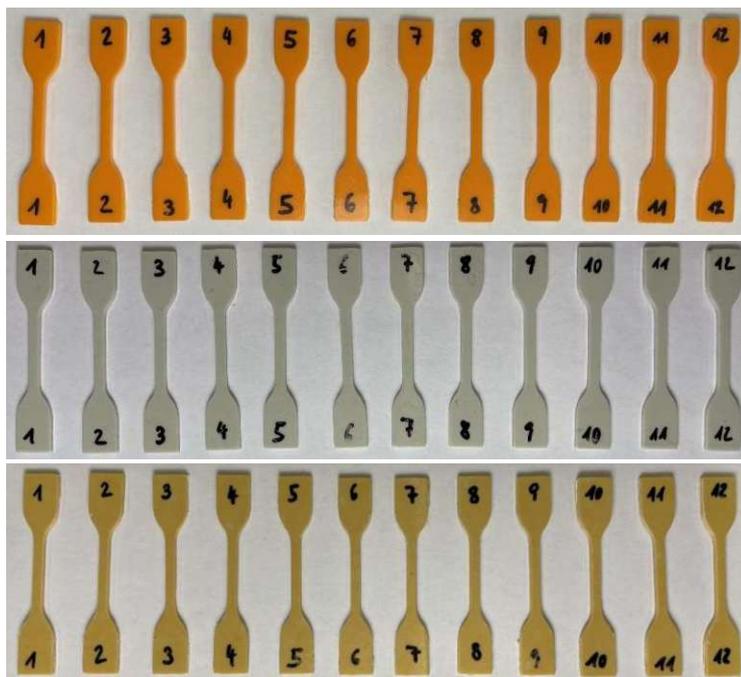
**Duschgelflasche**



**Abbildung 79:** a) Ausgangsmaterial (komplette Post-Consumer Duschgelflasche), b) Prozess der Aufbereitung des Ausgangsmaterials



**Abbildung 80:** gepresste Platten aus: a) 1x extrudiertem HDPE (ohne Durchlicht), b) 1x extrudierter Mischung (HDPE+PP) (mit Durchlicht)



**Abbildung 81:** Zugstäbe von oben nach unten aus PP, HDPE und Mischung HDPE+PP (1x extrudiert, vor Prüfung)



**Abbildung 82:** Zugstäbe PP, HDPE und Mischung HDPE+PP (1x extrudiert, nach Prüfung)

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, „Incentives for Recycling and Reuse of Plastics - A Summary Report“, U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Chicago, Illinois, 1973.
- [2] J. Rösler, H. Harders, und M. Bäker, *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. doi: 10.1007/978-3-658-26802-2.
- [3] OECD, „Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options“, OECD Publishing, Paris, 2022. doi: 10.1787/de747aef-en.
- [4] *Verordnung (EU) 2025/40 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Dezember 2024 über Verpackungen und Verpackungsabfälle, zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020 und der Richtlinie (EU) 2019/904 sowie zur Aufhebung der Richtlinie 94/62/EG*.
- [5] W. Weißbach, M. Dahms, und C. Jaroschek, *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. doi: 10.1007/978-3-658-03919-6.
- [6] H. Domininghaus, *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. doi: 10.1007/978-3-642-16173-5.
- [7] E. Baur, G. Harsch, und M. Moneke, *Werkstoff-Führer Kunststoffe: Eigenschaften - Prüfungen - Kennwerte*, 11. Aufl. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2019. doi: 10.3139/9783446460676.
- [8] P. Eyerer, T. Hirth, und P. Elsner, *Polymer Engineering - Technologie und Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. doi: 10.1007/978-3-540-72419-3.
- [9] S. Koltzenburg, M. Maskos, und O. Nuyken, *Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024. doi: 10.1007/978-3-662-64601-4.
- [10] K. Birkholz, „HDPE, LDPE, PP, PVC, EPS, PUR – eine Materialkunde der Kunststoffe“. [Online]. Verfügbar unter: <https://blog.ratioform.de/hdpe-ldpe-pp-pvc-eps-pur-eine-materialkunde-der-kunststoffe/>
- [11] Plastics Europe, „The Circular Economy for Plastics - A European Analysis“, Plastics Europe, Brüssel, März 2024.
- [12] K. Ragaert, L. Delva, und K. Van Geem, „Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste“, *Waste Management*, Bd. 69, S. 24–58, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.
- [13] M. Roosen u. a., „Deodorization of post-consumer plastic waste fractions: A comparison of different washing media“, *Science of The Total Environment*, Bd. 812, S. 152467, März 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152467.
- [14] Plastic Recyclers Europe, „Plastics Recycling Industry Figures 2023 - Mapping of installed capacities“, Brüssel, 2023.
- [15] „PlasticsEurope“. [Online]. Verfügbar unter: <https://plasticseurope.org/de/nachhaltigkeit/kreislaufwirtschaft/recycling/>
- [16] J. Schlossnikl, L. Gritsch, T. Koch, und V.-M. Archodoulaki, „Design and manufacturing diversity undermine circularity: The case of a simple yogurt cup“, *Resources*,

- Conservation and Recycling*, Bd. 212, S. 107944, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.resconrec.2024.107944.
- [17] M. Bauer u. a., „Bestandsaufnahme und mögliche Perspektiven der nass-mechanischen Aufbereitung von Altkunststoffen für das rohstoffliche Recycling“, *Österr Wasser- und Abfallw*, Bd. 69, Nr. 11–12, S. 446–459, Dez. 2017, doi: 10.1007/s00506-017-0420-1.
- [18] Thermo Fisher Scientific, „Product Specifications - Thermo Scientific HAAKE MiniJet II - Sample Specimen Preparation“. 2008.
- [19] W. Grellmann und V. Altstädt, Hrsg., *Kunststoffprüfung*, 2. Aufl. München: Hanser, 2011.
- [20] D. S. Achilias, „Thermal Analysis in Polymer Recycling“, in *Thermal Analysis of Polymeric Materials*, 1. Aufl., K. Pieliowski und K. Pieliowska, Hrsg., Wiley, 2022, S. 485–508. doi: 10.1002/9783527828692.ch14.
- [21] *Kunststoffe - Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) - Teil 6: Bestimmung der Oxidations-Induktionszeit (isothermische OIT) und Oxidations-Induktionstemperatur (dynamische OIT) (ISO 11357-6:2018)*. doi: 10.31030/3427674.
- [22] P. Eyerer, H. Schüle, und P. Elsner, Hrsg., *Polymer Engineering 3: Werkstoff- und Bauteilprüfung, Recycling, Entwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. doi: 10.1007/978-3-662-59839-9.
- [23] T. Schröder, *Rheologie der Kunststoffe: Theorie und Praxis*, 2., Aktualisierte und Erweiterte Auflage. München: Hanser, 2020.
- [24] *Rheologie - Teil 1: Begriffe und Formelzeichen für die Rotations- und Oszillationsrheometrie (ISO 3219-1:2021); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 3219-1:2021*, 1. August 2021. doi: 10.31030/3189706.
- [25] *Kunststoffe - Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten - Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren (ISO 1133-1:2022); Deutsche Fassung EN ISO 1133-1:2022*, 1. Oktober 2022.
- [26] *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2019*, 1. Dezember 2019.
- [27] *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO 527-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-2:2012*, 1. Juni 2012. doi: 10.31030/1860304.
- [28] *Kunststoffe - Bestimmung der Schlagzugzähigkeit (ISO 8256:2023); Deutsche Fassung EN ISO 8256:2023*, 1. März 2024.
- [29] I. Traxler, S. Laske, und J. Fischer, „Closed-loop recycling of polypropylene: A case study on mechanical recycling of separately collected yogurt cups in Austria“, *Resources, Conservation and Recycling*, Bd. 205, S. 107537, Juni 2024, doi: 10.1016/j.resconrec.2024.107537.
- [30] C. A. Baah und J. I. Baah, „Polypropylene degradation in NaOH environments“, *Materials & Design*, Bd. 23, Nr. 3, S. 341–343, Mai 2002, doi: 10.1016/S0261-3069(01)00091-7.
- [31] M. A. Streicher, „The Dissolution of Aluminum in Sodium Hydroxide Solutions. II“, *J. Electrochem. Soc.*, Bd. 96, Nr. 3, S. 170, 1949, doi: 10.1149/1.2776781.
- [32] A. D. Gotsis, B. L. F. Zeevenhoven, und A. H. Hogt, „The effect of long chain branching on the processability of polypropylene in thermoforming“, *Polymer Engineering & Sci*, Bd. 44, Nr. 5, S. 973–982, Mai 2004, doi: 10.1002/pen.20089.

- [33] M. H. Akhras und J. Fischer, „Sampling Scheme Conception for Pretreated Polyolefin Waste Based on a Review of the Available Standard Procedures“, *Polymers*, Bd. 14, Nr. 17, S. 3450, Aug. 2022, doi: 10.3390/polym14173450.
- [34] V. A. González-González, G. Neira-Velázquez, und J. L. Angulo-Sánchez, „Polypropylene chain scissions and molecular weight changes in multiple extrusion“, *Polymer Degradation and Stability*, Bd. 60, Nr. 1, S. 33–42, Apr. 1998, doi: 10.1016/S0141-3910(96)00233-9.
- [35] „<https://plasticker.de/index.php>“, plasticker the home of plastics. Zugegriffen: 18. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://plasticker.de/recybase/showdata.php?id=391569&returnto=%2Frecybase%2Fpms2.php%3Fkat%3DRegranulat%26mat%3DPS%26aog%3DA>
- [36] C. Remili, M. Kaci, A. Benhamida, S. Bruzard, und Y. Grohens, „The effects of reprocessing cycles on the structure and properties of polystyrene/Cloisite15A nanocomposites“, *Polymer Degradation and Stability*, Bd. 96, Nr. 8, S. 1489–1496, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.05.005.
- [37] Z. O. G. Schyns und M. P. Shaver, „Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review“, *Macromol. Rapid Commun.*, Bd. 42, Nr. 3, S. 2000415, Feb. 2021, doi: 10.1002/marc.202000415.
- [38] A. Ladhari, E. Kucukpinar, H. Stoll, und S. Sänglerlaub, „Comparison of Properties with Relevance for the Automotive Sector in Mechanically Recycled and Virgin Polypropylene“, *Recycling*, Bd. 6, Nr. 4, S. 76, Nov. 2021, doi: 10.3390/recycling6040076.
- [39] M. Lisiecki u. a., „Mechanical recycling of printed flexible plastic packaging: The role of binders and pigments“, *Journal of Hazardous Materials*, Bd. 472, S. 134375, Juli 2024, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.134375.
- [40] S. Ügdüler u. a., „Understanding the complexity of deinking plastic waste: An assessment of the efficiency of different treatments to remove ink resins from printed plastic film“, *Journal of Hazardous Materials*, Bd. 452, S. 131239, Juni 2023, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131239.
- [41] S. Qian, T. Igarashi, und K. Nitta, „Thermal degradation behavior of polypropylene in the melt state: molecular weight distribution changes and chain scission mechanism“, *Polym. Bull.*, Bd. 67, Nr. 8, S. 1661–1670, Nov. 2011, doi: 10.1007/s00289-011-0560-6.

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung der weltweiten Kunststoffproduktion [in Megatonnen (Mt)] [3]	1
Abbildung 2:	Sortierung der Kunststoffe in Familien und Arten [5]	3
Abbildung 3:	Schematische Darstellung der Vernetzung unterschiedlicher Polymere: a) Thermoplast: die Molekülketten sind unvernetzt, b) Elastomer: Zwischen den Molekülketten existieren wenige Vernetzungsstellen, c) Duromer: Die Molekülketten sind an vielen Stellen vernetzt [2]	4
Abbildung 4:	Übersicht wichtiger amorpher und teilkristalliner Kunststoffe entsprechend des Temperatureinsatzes [5]	5
Abbildung 5:	Schematische Darstellung des Spritzgießverfahrens [7]	6
Abbildung 6:	Schnittbild eines Einschneckenextruders [7]	7
Abbildung 7:	Schematische Darstellung Extrusionsblasformen [7]	7
Abbildung 8:	Schematische Darstellung der Verfahrensschritte einer Negativ-Druckluftformung [8]	8
Abbildung 9:	Strukturformel Polyethylen [2]	8
Abbildung 10:	Polymerisation von Ethen zu Polyethylen [10]	9
Abbildung 11:	Schematische Darstellung der unterschiedlichen Strukturen und Verzweigungen bei Polyethylen [6]	9
Abbildung 12:	Strukturformel Polypropylen [2]	10
Abbildung 13:	Polymerisation von Propen zu Polypropylen [10]	10
Abbildung 14:	Taktizität von Polypropylen: a) alle CH <sub>3</sub> -Gruppen sind auf derselben Seite angeordnet, b) die CH <sub>3</sub> -Gruppen sind regellos angeordnet, c) die CH <sub>3</sub> -Gruppen befinden sich abwechselnd auf verschiedenen Seiten der Kohlenstoffkette [8]	11
Abbildung 15:	Strukturformel Polystyrol [2]	11
Abbildung 16:	Polymerisation von Styrol zu Polystyrol [10]	12
Abbildung 17:	Zusammensetzung der Kunststoffproduktion innerhalb der EU (2022) [11]	12
Abbildung 18:	Flakes: a) PP spritzgegossen, b) PP tiefgezogen, c) PS tiefgezogen	16
Abbildung 19:	PP Becher aus 100% Rezyklat	17
Abbildung 20:	PS (Viscotec): a) PS Flakes, b) PS Regranulat	18
Abbildung 21:	Komponenten Duschgelflasche: a) Cap PP, b) Body HDPE, c) Blend HDPE+PP	19
Abbildung 22:	Übersicht Verarbeitung und Untersuchung PP & PS Flakes & PP ganze Becher	21
Abbildung 23:	Übersicht Verarbeitung und Untersuchung PS Flakes & Granulat (Viscotec)	21
Abbildung 24:	Übersicht Verarbeitung und Untersuchung Duschgel PP Verschlusskappe	22
Abbildung 25:	Übersicht Verarbeitung und Untersuchung Duschgel HDPE Hohlkörper / Mischung HDPE & PP	22
Abbildung 26:	Dichtebereiche häufig vorkommender Materialtypen in Siedlungsabfällen [17]	24
Abbildung 27:	Flakes im Wasserbad: a) Draufsicht zwei verschiedener Serien (beides PP); b) Seitenansicht einer PP Serie	25

Abbildung 28:	EXTRON EX 18-26-1.5 .....	26
Abbildung 29:	Typische DSC-Kurve [22] .....	30
Abbildung 30:	Schematische Darstellung einer DSC-Messzelle [22] .....	31
Abbildung 31:	Fließverhalten Newton'scher, strukturviskoser und dilatanter Flüssigkeiten bzw. Schmelzen [6] .....	32
Abbildung 32:	Position des Cross-Over-Point von Speicher- und Verlustmodul in Abhängigkeit von der Molmasse und der Molmassenverteilung [23] .....	33
Abbildung 33:	Verlauf von Speicher- und Verlustmodul sowie der komplexen Viskosität eines Kunststoffes [23] .....	33
Abbildung 34:	Schematischer Aufbau eines Platte-Platte Rheometers [23] .....	34
Abbildung 35:	Schematischer Aufbau eines Schmelzindex-Prüfgerätes [23] .....	35
Abbildung 36:	Verwendetes Schmelzindex-Prüfgerät .....	35
Abbildung 37:	Typische Spannungs-/Dehnungskurven [26] .....	36
Abbildung 38:	Probekörpertyp 5A [27] .....	38
Abbildung 39:	Schematische Prüfanordnung Schlagzugversuche (Verfahren A) [7] .....	40
Abbildung 40:	Prüfkörpertyp für Schlagzugversuche [28] .....	40
Abbildung 41:	Zusammensetzung PP Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen anhand manueller Sortierung: a) PP tiefgezogen, b) PP spritzgegossen .....	44
Abbildung 42:	PP Flakes spritzgegossen nach Schwimm-Sink: a) 80 °C H <sub>2</sub> O, b) 80 °C NaOH .....	45
Abbildung 43:	Zusammensetzung PS Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen anhand manueller Sortierung .....	46
Abbildung 44:	PS Flakes im Wasserbad (Schwimm-Sink-Verfahren): a) 80 °C H <sub>2</sub> O, b) 80 °C NaOH .....	46
Abbildung 45:	MFR PP tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen und industriell hergestellten Rezyklat Becher (Fa. Greiner) .....	49
Abbildung 46:	MFR PP spritzgegossen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen .....	50
Abbildung 47:	MFR PS tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen sowie industriell aufbereitete Flakes und Regranulat (RGR) (Fa. Viscotec) .....	51
Abbildung 48:	Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität - PP tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen und industriell hergestellten Rezyklat Becher (Fa. Greiner) .....	53
Abbildung 49:	Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität - PP tiefgezogen - Gegenüberstellung der 1x extrudierten Serien der verschiedenen Waschbehandlungen und industriell hergestellten Rezyklat Becher (Fa. Greiner) .....	53
Abbildung 50:	Speicher- und Verlustmodul - PP tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen und industriell hergestellten Rezyklat Becher (Fa. Greiner) .....	55
Abbildung 51:	Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität - PP spritzgegossen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen .....	57

Abbildung 52: Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität - PP spritzgegossen - Gegenüberstellung der 1x extrudierten Serien der verschiedenen Waschbehandlungen .....	57
Abbildung 53: Speicher- und Verlustmodul - PP spritzgegossen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen.....	58
Abbildung 54: Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität - PS tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen sowie industriell aufbereitete Flakes und Regranulat (RGR) (Fa. Viscotec).....	60
Abbildung 55: Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität - PS tiefgezogen - Gegenüberstellung der 1x extrudierten Serien mit verschiedenen Waschbehandlungen sowie industriell aufbereitete Flakes und Regranulat (RGR) (Fa. Viscotec).....	60
Abbildung 56: Speicher- und Verlustmodul - PS tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen sowie industriell aufbereitete Flakes und Regranulat (RGR) (Fa. Viscotec) .....	62
Abbildung 57: Frequency Sweep - Betrag der komplexen Viskosität – Komponenten der Duschgelflasche: PP (Verschluss), HDPE (Hohlkörper) und Blend (Flasche komplett).....	64
Abbildung 58: Zugversuch PP tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen und industriell hergestellten Rezyklat Becher (Fa. Greiner); (a) E-Modul [MPa], (b) Zugfestigkeit [MPa], (c) Bruchdehnung [%] .....	67
Abbildung 59: Zugversuch PP spritzgegossen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen; (a) E-Modul [MPa], (b) Zugfestigkeit [MPa], (c) Bruchdehnung [%].....	69
Abbildung 60: Zugversuch PS tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen sowie industriell aufbereitete Flakes und Regranulat (RGR) (Fa. Viscotec); (a) E-Modul [MPa], (b) Zugfestigkeit [MPa], (c) Bruchdehnung [%].....	71
Abbildung 61: Schlagzugversuch PP tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen und industriell hergestellten Rezyklat Becher (Fa. Greiner) .....	72
Abbildung 62: Schlagzugversuch PP spritzgegossen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen .....	73
Abbildung 63: Schlagzugversuch PS tiefgezogen - Gegenüberstellung Flakes mit verschiedenen Waschbehandlungen sowie industriell aufbereitete Flakes und Regranulat (RGR) (Fa. Viscotec) .....	74
Abbildung 64: DSC - PP Flakes tiefgezogen.....	80
Abbildung 65: DSC - PP Flakes spritzgegossen: a) 60 °C H <sub>2</sub> O, b) 60 °C NaOH, c) 80 °C H <sub>2</sub> O, d) 80 °C NaOH.....	81
Abbildung 66: DSC - PS Flakes tiefgezogen: a) 80 °C H <sub>2</sub> O, b) 80 °C NaOH .....	81
Abbildung 67: Fraktionen der PS Flakes mit 80 °C H <sub>2</sub> O Waschbehandlung: a) Flakes vor Sortierung, b) weiß, c) bunt, d) transparent, e) etikettiert, f) Folien, g) Aluminium, h) nicht identifiziertes Material .....	85

Abbildung 68:	Fraktionen der PS Flakes mit 80 °C NaOH Waschbehandlung: a) Flakes vor Sortierung, b) weiß, c) bunt, d) transparent, e) etikettiert, f) Folien, g) Aluminium, h) nicht identifiziertes Material .....	86
Abbildung 69:	Probekörper Schlagzugversuch PP tiefgezogen 60 °C H <sub>2</sub> O; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert .....	87
Abbildung 70:	Zugstäbe PP tiefgezogen 80 °C H <sub>2</sub> O; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert .....	87
Abbildung 71:	Zugstäbe PP tiefgezogen 60 °C NaOH; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert .....	88
Abbildung 72:	Zugstäbe PP tiefgezogen 80 °C NaOH; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert .....	88
Abbildung 73:	Zugstäbe PP spritzgegossen 60 °C H <sub>2</sub> O; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert .....	89
Abbildung 74:	Zugstäbe PP spritzgegossen 80 °C H <sub>2</sub> O; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert .....	89
Abbildung 75:	Zugstäbe PP spritzgegossen 60 °C NaOH; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert .....	90
Abbildung 76:	Zugstäbe PP spritzgegossen 80 °C NaOH; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert .....	90
Abbildung 77:	Zugstäbe PS tiefgezogen 80 °C H <sub>2</sub> O; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert .....	91
Abbildung 78:	Zugstäbe PS tiefgezogen 80 °C NaOH; von oben nach unten 0x, 1x, 3x und 5x extrudiert .....	91
Abbildung 79:	a) Ausgangsmaterial (komplette Post-Consumer Duschgelflasche), b) Prozess der Aufbereitung des Ausgangsmaterials .....	92
Abbildung 80:	gepresste Platten aus: a) 1x extrudiertem HDPE (ohne Durchlicht), b) 1x extrudierter Mischung (HDPE+PP) (mit Durchlicht) .....	92
Abbildung 81:	Zugstäbe von oben nach unten aus PP, HDPE und Mischung HDPE+PP (1x extrudiert, vor Prüfung) .....	92
Abbildung 82:	Zugstäbe PP, HDPE und Mischung HDPE+PP (1x extrudiert, nach Prüfung) .....	93

## 8 Formelverzeichnis

Formel 1:	Elastizitätsmodul [26] .....	37
Formel 2:	Spannungswerte [26] .....	37
Formel 3:	Dehnungswerte [26].....	38
Formel 4:	Korrigierte Schlagarbeit [28] .....	39
Formel 5:	Kerb-Schlagzugzähigkeit [28] .....	39
Formel 6:	Arrhenius Mischungsregel [16] .....	63

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der untersuchten Post-Consumer Bechermaterialien .....	15
Tabelle 2:	Verwendete Varianten der Waschparameter für PP und PS Flakes .....	16
Tabelle 3:	Übersicht der untersuchten Flakes .....	16
Tabelle 4:	Materialien PP und PS Flakes.....	17
Tabelle 5:	PP Referenzmaterial .....	18
Tabelle 6:	PS Referenzmaterialien.....	19
Tabelle 7:	Komponenten der Duschgeflosche .....	20
Tabelle 8:	Mittels Mühle verarbeitete Materialien .....	26
Tabelle 9:	Prozessparameter Extruder .....	26
Tabelle 10:	Mittels Extruder verarbeitete Materialien.....	27
Tabelle 11:	Parameter Extruder und Spritzguss.....	28
Tabelle 12:	Materialien für Probekörper die mittels Spritzguss hergestellt wurden .....	28
Tabelle 13:	Pressprogramm (Rheologieplättchen) PP .....	28
Tabelle 14:	Pressprogramm (Rheologieplättchen) PS .....	29
Tabelle 15:	Pressprogramm (Rheologieplättchen) HDPE .....	29
Tabelle 16:	Pressprogramm (Platten) HDPE und HDPE+PP (Blend).....	29
Tabelle 17:	Mittels Stanzen hergestellte Probekörper .....	29
Tabelle 18:	DSC-Temperaturprogramme .....	31
Tabelle 19:	Prüftemperaturen Rheometer .....	34
Tabelle 20:	Prüfparameter MFR .....	35
Tabelle 21:	Kennwerte Zugversuch [26] .....	37
Tabelle 22:	Kurzformen der untersuchten Materialien.....	41
Tabelle 23:	Output Schwimm-Sink-Verfahren.....	42
Tabelle 24:	Auswertung der Abkühl- und zweiten Aufheizkurve von PP- und PS Flakes .....	47
Tabelle 25:	Cross-Over-Point PP tiefgezogen .....	55
Tabelle 26:	Cross-Over-Point PP spritzgegossen .....	58
Tabelle 27:	Cross-Over-Point PS tiefgezogen .....	62
Tabelle 28:	Messergebnisse MFR - Komponenten der Duschgeflosche .....	63
Tabelle 29:	Cross-Over-Points.....	64
Tabelle 30:	Messergebnisse Zug- und Schlagzugversuch - Komponenten der Duschgeflosche .....	74
Tabelle 31:	Ergebnisse Sortierung PP Flakes (tiefgezogen).....	79
Tabelle 32:	Ergebnisse Sortierung PP Flakes (spritzgegossen).....	79
Tabelle 33:	Ergebnisse Sortierung PS Flakes (tiefgezogen).....	79
Tabelle 34:	Messergebnisse PP Flakes (tiefgezogen) 60 °C H <sub>2</sub> O .....	81
Tabelle 35:	Messergebnisse PP Flakes (tiefgezogen) 80 °C H <sub>2</sub> O .....	82
Tabelle 36:	Messergebnisse PP Flakes (tiefgezogen) 60 °C NaOH .....	82
Tabelle 37:	Messergebnisse PP Flakes (tiefgezogen) 80 °C NaOH .....	82
Tabelle 38:	Messergebnisse PP Becher (tiefgezogen) 100 % Rezyklatanteil (von Fa. Greiner industriell aufbereitet).....	82
Tabelle 39:	Messergebnisse PP Flakes (spritzgegossen) 60 °C H <sub>2</sub> O.....	82

Tabelle 40:	Messergebnisse PP Flakes (spritzgegossen) 80 °C H <sub>2</sub> O.....	83
Tabelle 41:	Messergebnisse PP Flakes (spritzgegossen) 60 °C NaOH .....	83
Tabelle 42:	Messergebnisse PP Flakes (spritzgegossen) 80 °C NaOH .....	83
Tabelle 43:	Messergebnisse PS Flakes (tiefgezogen) 80 °C H <sub>2</sub> O .....	83
Tabelle 44:	Messergebnisse PS Flakes (tiefgezogen) 80 °C NaOH .....	83
Tabelle 45:	Messergebnisse PS Flakes (tiefgezogen) (von Fa. Viscotec industriell aufbereitet) .....	84
Tabelle 46:	Messergebnisse PS Regranulat (tiefgezogen) (von Fa. Viscotec industriell aufbereitet) .....	84
Tabelle 47:	Messergebnisse Komponenten der Duschgelflasche .....	84