



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Institut für Werkstoffwissenschaft
und Werkstofftechnologie

17. September 2024

Diplomarbeit

Werkstoffliche Untersuchung von Polyolefin- und Polystyrol-Rezyklaten: Alterungseinflüsse und Auswirkungen von Waschprozessen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing. oder DI) unter der Leitung von

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

(Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie)

sowie unter der Betreuung von

Projektass. Dipl.-Ing. Lorenz Pinkas Bichler, BSc
(Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

Valentin Buchner, BSc

Matrikelnummer: 01527124

(Studienkennzahl: 066 445)

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

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, September 2024

Valentin Buchner BSc

Abstract

Packaging materials represent the largest field of application for plastics in terms of volume. The global demand for plastics continues to grow, leading to increasing amounts of waste. Considering the limited resources, mechanical recycling serves as a crucial tool for achieving a sustainable circular economy. The use of recycled materials depends on the quality and consistency of material properties, which are influenced by various factors.

The aim of this study was to analyze the impact of several factors on the recycling process of packaging plastics. Polypropylene (PP) and polystyrene (PS) yogurt cups were examined. The influencing factors included variations in the recycled content of the yogurt cups, washing trials of pre- and post-consumer yogurt cups, storage experiments of recycled material in apple cider vinegar and rapeseed oil, as well as the multiple extrusion of the recycled material. Additionally, the impact of cross-contamination between PP and high-density polyethylene (HDPE) recyclates was investigated. The analysis was conducted using thermal, mechanical, spectroscopic, and rheological methods.

Up to a 30% recycled content, the properties of the PS and PP yogurt cups were practically identical to those of virgin material. At higher recycled content levels, polyethylene contaminants in the recyclate were identified.

Both washing trials with water and diluted sodium hydroxide solution showed an impact on the complex viscosity (molecular weight) of the yogurt cups.

Aging in the media largely led to a deterioration of the mechanical properties of the recyclates.

Cross-contamination caused significant embrittlement of the HDPE recyclate and an improvement in the mechanical properties of the PP recyclate.

The results highlighted the importance of sorting, washing, and processing procedures, which significantly influence the usability of the recyclate. Further studies on washing trials with adjusted parameters such as temperature, washing time, and mixing speed could contribute to optimizing property control and a more efficient use of detergents.

Kurzfassung

Verpackungsmaterialien sind das mengenmäßig größte Anwendungsgebiet von Kunststoffen. Der globale Kunststoffbedarf steigt dabei weiter und verursacht wachsende Abfallmengen. Mit Blick auf die begrenzten Ressourcen stellt das mechanische Recycling ein wichtiges Werkzeug da, um eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu erreichen. Die Nutzung von Rezyklaten hängt von der Qualität und der Konsistenz der Werkstoffeigenschaften ab, welche durch unterschiedliche Einflüsse geprägt werden.

Das Ziel dieser Arbeit lag in der werkstofflichen Analyse von verschiedenen Einflüssen auf den Recyclingprozess von Verpackungskunststoffen. Untersucht wurden Joghurtbecher aus Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS). Bei den Einflüssen handelte es sich um Variationen von Rezyklatanteilen in den Joghurtbechern, Waschversuche von Pre- und Post-Consumer Joghurtbecher, Auslagerungsversuche von rezykliertem Material in Apfelessig und Rapsöl sowie die Mehrfachextrusion des rezyklierten Materials. Zudem wurde der Einfluss von Kreuzkontaminationen zwischen den Rezyklaten von PP und Polyethylen hoher Dichte (HDPE) untersucht. Die Analyse erfolgte mittels thermischen, mechanischen, spektroskopischen und rheologischen Untersuchungsmethoden.

Bis zu einem 30 %igen Rezyklatanteil waren die Eigenschaften der PS- und PP-Joghurtbecher dem virginen Material praktisch ident. Bei höheren Rezyklatanteilen konnten Polyethylen-Verunreinigungen im Rezyklat identifiziert werden.

Sowohl die Waschversuche mit Wasser als auch mit verdünnter Natronlauge zeigten einen Einfluss auf die komplexe Viskosität (Molmasse) der Joghurtbecher.

Die Auslagerung in den Medien führte weitestgehend zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften der Rezyklate.

Kreuzkontaminationen hatten eine starke Versprödung des HDPE-Rezyklats und eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des PP-Rezyklats zur Folge.

Die Ergebnisse zeigten vor allem die Wichtigkeit der Sortier-, Wasch- und Verarbeitungsprozesse, welche maßgebend die Verwendung des Rezyklats beeinflussen. Weitere Arbeiten bezüglich Waschversuchen mit angepassten Parametern, wie die Temperatur, Waschzeit und Durchmischungsgeschwindigkeit können zu einer Optimierung der Eigenschaftssteuerung und einer effizienteren Deterenziennutzung beitragen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	1
1 Einleitung	2
1.1 Zahlen und Fakten	2
1.2 Kunststoffe	3
1.2.1 Polyethylen PE	4
1.2.2 High Density Polyethylen HDPE	6
1.2.3 Polypropylen PP	7
1.2.4 Polystyrol PS	8
1.3 Strategien des Kunststoffrecyclings	9
1.3.1 Werkstoffliches Recycling	10
1.3.2 Aktuelle Entwicklungen	12
1.3.3 Degradation	13
1.4 Zielsetzung	14
2 Materialien und Methoden	16
2.1 Materialien	17
2.1.1 Polyethylen	17
2.1.2 Polypropylen	19
2.1.3 Polystyrol	20
2.1.4 Materialien der Waschversuche	21
2.1.5 Sonstige Stoffe	23
2.2 Methoden	25
2.2.1 Prüfkörperherstellung	25
2.2.2 Mehrfachextrusion	30
2.2.3 Waschversuche	32
2.2.4 Auslagerungsversuche	33
2.2.5 Zugversuch	35
2.2.6 Schlagzugversuch	37
2.2.7 Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR)	38
2.2.8 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)	42

2.2.9	Thermogravimetrische Analyse (TGA)	44
2.2.10	Schmelze-Massefließrate (MFR)	45
2.2.11	Scherrheologie	46
3	Ergebnisse	49
3.1	Probencharakterisierung	49
3.1.1	Waschversuche	49
3.1.2	Auslagerungsversuche	51
3.2	Ergebnisse der FTIR Spektroskopie	54
3.2.1	Vorversuche zu den HDPE-PP Blends	54
3.2.2	Rezyklierte Joghurtbecher aus PP und PS	55
3.2.3	Mehrfachextrusion von 100 % rPP und rPS	57
3.2.4	Waschversuche	59
3.2.5	Auslagerungsversuche	59
3.3	Ergebnisse der thermischen Untersuchung	62
3.3.1	Vorversuche zu den HDPE-PP Blends	62
3.3.2	Rezyklierte Joghurtbecher aus PP und PS	62
3.4	Ergebnisse der rheologischen Untersuchung	63
3.4.1	Vorversuche zu den HDPE-PP Blends	63
3.4.2	Rezyklierte Joghurtbecher aus PP und PS	65
3.4.3	Mehrfachextrusion von 100 % rPP und rPS	67
3.4.4	Waschversuche	69
3.5	Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen	73
3.5.1	Vorversuche zu den HDPE-PP Blends	73
3.5.2	Rezyklierte Joghurtbecher aus PP und PS	77
3.5.3	Mehrfachextrusion von 100 % rPP und rPS	82
3.5.4	Auslagerungsversuche	86
4	Diskussion	90
4.1	Erkenntnisse in der Versuchsdurchführung	90
4.2	Diskussion der Ergebnisse	91
4.2.1	rHDPE mit PP-Verunreinigungen	91
4.2.2	rPP mit HDPE-Verunreinigungen	92
4.2.3	rPP-Joghurtbecher	92
4.2.4	rPS-Joghurtbecher	93
4.2.5	Waschversuche	94

4.2.6 Auslagerungsversuche	94
--------------------------------------	----

5 Zusammenfassung und Ausblick	96
---------------------------------------	-----------

Abbildungsverzeichnis	98
------------------------------	-----------

Tabellenverzeichnis	102
----------------------------	------------

Literatur	104
------------------	------------

6 Anhang	109
-----------------	------------

Abkürzungsverzeichnis

DLDK	Dynamische Leistungs-Differenzkalorimetrie
DWDK	Dynamische Wärmestrom-Differenzkalorimetrie
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot Spektroskopie
HDPE	High density Polyethylen
LDPE	Low density Polyethylen
MB	Masterbatch
MFR	Schmelze-Massefließrate
m%	Massenprozent
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
TGA	Thermogravimetrische Analyse
ΔL	Längenänderung (mm)
F	wirkende Kraft (N)
ε	Dehnung (%)
L_0	Ausgangslänge (mm)
A_0	Ausgangsquerschnitt (mm^2)
σ	Spannung ($\frac{N}{mm^2}$)
E	Elastizitätsmodul ($\frac{N}{mm^2}$)
ε_B	Bruchdehnung (%)
σ_M	Zugfestigkeit ($\frac{N}{mm^2}$)
σ_B	Bruchspannung ($\frac{N}{mm^2}$)
σ_y	Streckspannung ($\frac{N}{mm^2}$)
ε_B	Bruchdehnung (%)
$\tilde{\nu}$	Wellenzahl (cm^{-1})
λ	Wellenlänge (μm)
a_{tN}	Kerb-Schlagzugzähigkeit ($\frac{kJ}{m^2}$)
Q	Wärmemenge (J)
H	Enthalpie ($\frac{J}{kg}$)
c_p	Wärmekapazität ($\frac{J}{kg \cdot K}$)

1 Einleitung

1.1 Zahlen und Fakten

Kunststoffe sind ins unserem Leben allgegenwärtig. Wir tragen sie an unserem Körper, sehen sie im Einsatz in der Raumfahrt und nutzen sie zur Nahrungsaufnahme. Die gute Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen, das geringe Gewicht sowie die hohe Vielseitigkeit und vor allem die niedrigen Kosten machen Kunststoffe zu einem der wichtigsten Materialgruppen. In unserer heutigen Welt sind Kunststoffe fast nicht mehr wegzudenken. So wurden 2022 weltweit 400 Millionen Tonnen an Kunststoff produziert. Dabei ist das größte Anwendungsgebiet als Verpackungsmaterialien, welche rund 40 % aller Erzeugnisse ausmachen. Dies spiegelt sich auch in den Statistiken der meist produzierten Kunststoffe wieder. So machen die üblichen Verpackungsmaterialien wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyethylenterephthalat (PET) und Polystyrol (PS) mehr als 55 % aller hergestellten Kunststoffe aus [1].

Die sich daraus resultierenden Probleme lassen sich in weiteren Zahlen darstellen. So fielen zwischen 1950 und 2015, 8,3 Milliarden Tonnen an Plastikmüll an, wovon 9 % recycelt und 12 % thermisch verwertet wurden, während der Rest in Deponien oder unsachgemäß in die Umwelt gelangten [2]. Die geringe Nutzungsdauer stellt neben den anwachsenden Abfallmengen ein weiteres Problem dar. So werden rund 40 % der Kunststoffprodukte bereits nach einem Monat zu Abfall. Die daraus folgenden Mengen an Kunststoffabfall stellen eine große Herausforderung in der Abfallverwertung dar und haben bei unsachgemäßer Entsorgung fatale Auswirkungen auf die Umwelt. Dabei sind beispielsweise bisher 86 Millionen Tonnen an Kunststoffabfall in die Meere gelangt. Hinzu kommt, dass 10 – 13 % des globalen CO₂-Ausstoßes auf die Kunststoffproduktion zurückzuführen sind [3]. Im Bereich der Abfallverwertung von Kunststoffverpackungen in Europa wurden im Jahr 2022 44,9 % den anfallenden Mengen thermisch verwertet, 17,3 % landeten in Deponien und lediglich 37,8 % wurden rezykliert [1].

1.2 Kunststoffe

Die kommenden Grundlagen sollen einen Überblick über die Vielfalt der Thematik geben und den Grundbaustein für darauffolgende Themen legen. So sind neben den Metallen und den anorganischen-nichtmetallischen Werkstoffen Polymere die dritte Werkstoffhauptgruppe [4].

Sie können wie folgt definiert werden:

"Kunststoffe sind hoch molekulare organische Verbindungen, die entweder durch Abwandeln hochmolekularer Naturstoffe oder durch chemische Aneinanderlagerungen niedermolekularer Grundbausteine, sog. Monomere, durch verschiedenartige chemische Reaktionen entstehen." [5, S.1]

Kunststoffe lassen sich in drei Hauptgruppen einteilen. Die Thermoplaste, die Elastomere und die Duromere. Der entscheidende Unterschied zwischen diesen Gruppen basiert auf der Vernetzung der Molekülketten und den Vernetzungsgrad. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Gruppe der Thermoplaste da sämtliche, in dieser Arbeit verwendeten Polymere dieser Gruppe zuordenbar sind, demnach werden die anderen Gruppen nicht weiter behandelt. Der Übersicht halber gibt die schematische Darstellung in Abbildung 1 eine bildliche Vorstellung des Polymeraufbaus wieder.

Die weitere Einteilung der Thermoplaste kann in amorph und teilkristallin gemacht werden. Dabei besitzen amorphe Thermoplaste keine Fernordnung, sie sind demnach lediglich statistisch angeordnet. Teilkristalline Thermoplaste hingegen besitzen sowohl geordnete Bereiche als auch ungeordnete. Die parallele Anordnung von linearen Makromolekülen führt zu dieser Kristallinität. Diese Nebervalenzbindungen zwischen den Polymerketten im kristallinen Bereich erschweren das Abgleiten aneinander. So weisen teilkristalline Thermoplaste tendenziell höhere Steifigkeiten, Festigkeiten, Dichten und Gebrauchstemperaturbereiche, als vergleichbare amorphe Thermoplaste [6].

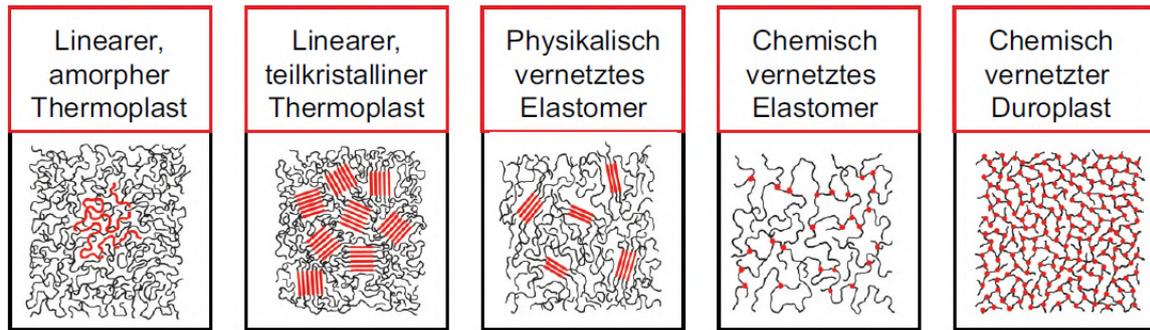


Abbildung 1 Unterteilung der Kunststoffe [7]

Die Grundbausteine, die Monomere, der Kunststoffe sind der Ausgangspunkt für die Herstellung von Kunststoffen. Die chemische Zusammensetzung der Monomere, und demnach auch der Polymere, besteht im wesentlichen aus diversen Kohlenwasserstoffverbindungen. Typische Bindungspartner neben anderen C-Atome sind vor allem Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Chlor. Zudem werden auch Bindungen mit funktionellen Gruppen oder Aromaten eingegangen [4].

Von der Ausgangssituation aus können die Monomere durch unterschiedliche Wege zu Polymeren synthetisiert werden. Dabei sind die Hauptreaktionen die Kettenpolymerisation, die Polyaddition oder die Polykondensation. Für die Verpackungskunststoffe ist die radikalische und koordinative Kettenpolymerisation relevant. Bei der radikalischen Kettenpolymerisation wird ein Radikal durch Einflüsse wie erhöhte Temperatur oder auch UV-Licht dazu gebracht die Mehrfachbindungen der Monomere in einem ersten Schritt aufzuspalten. Danach kommt es vor allem zur Radikalübertragung, was zum weiteren Kettenwachstum führt. Bei der koordinativen Kettenpolymerisation erfolgt die Kettenreaktion durch ein Katalysatorsystem, was zu einem äußerst regelmäßigen Kettenaufbau gleichmäßiger räumlicher Struktur führt [7].

1.2.1 Polyethylen PE

Mit einem rund 26 %igen Anteil an der weltweiten Kunststoffproduktion gehört Polyethylen (PE) zu dem meistgenutzten Kunststoff. PE ist ein teilkristalliner Thermoplast

und gehört zu der Gruppe der Polyolefine. Er ist unpolar und wird über eine katalytische oder radikalische Kettenpolymerisation synthetisiert. Der atomare Aufbau ist in Abbildung 2 erkennbar, [1, 8].

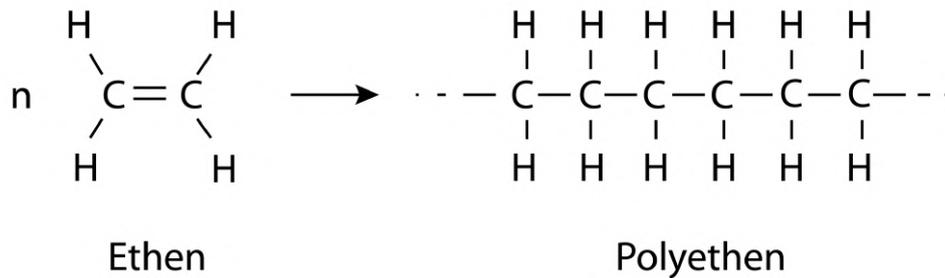


Abbildung 2 Aufbau von Polyethylen [9]

PE kann je nach deren Molekülstruktur weiter eingeteilt werden. Hier ist vor allem die Unterscheidung nach der Anzahl der Seitenverzweigung des PE-Moleküls und deren Länge entscheidend. Der dadurch beeinflusste Kristallisationsgrad und hiermit zusammenhängende Dichteunterschied sind von starker Bedeutung. Die Einteilung wird demnach auch nach deren relativen Dichte zueinander gemacht. So besitzt das stark verzweigte Polyethylen einen geringen Kristallisationsgrad und eine geringe Dichte. Es wird demnach auch als Low Density Polyethylen (LDPE) bezeichnet. Das nicht verzweigte Polyethylen mit einer geringen Anzahl an Seitenketten hat einen hohen Kristallisationsgrad und eine hohe Dichte, weshalb dieses als High Density Polyethylen (HDPE) bezeichnet wird. Zwischen diesen beiden Hauptgruppen sind noch Übergangsformen zu finden, siehe Abbildung 3. In dieser Arbeit wurde lediglich mit HDPE gearbeitet, welches im Kapitel 1.2.2 behandelt wird [5].

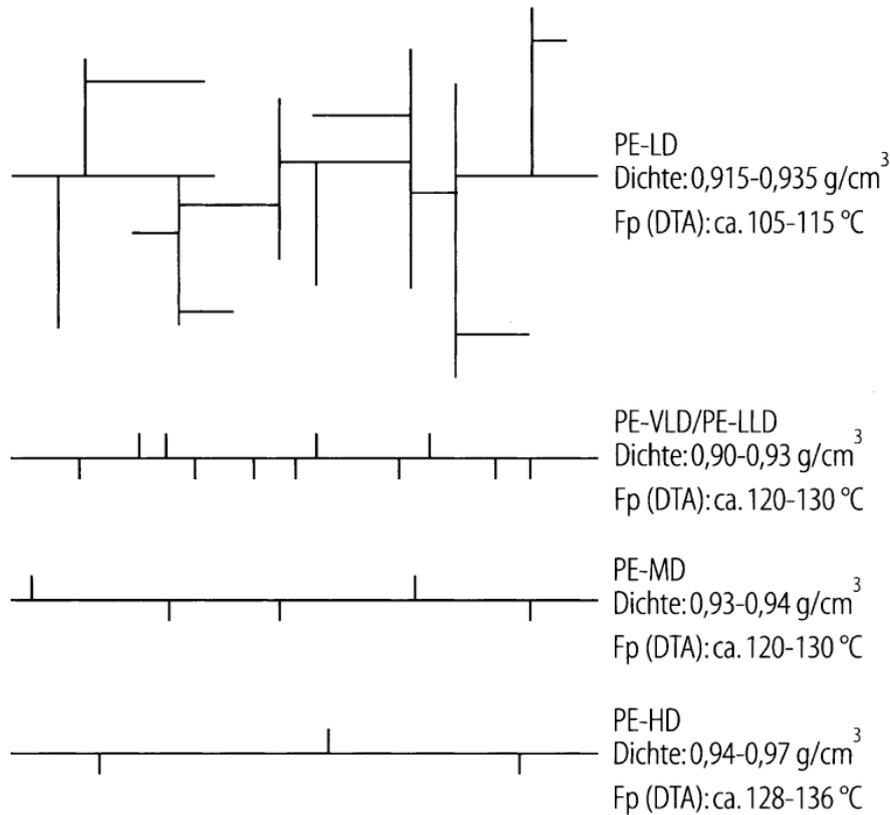


Abbildung 3 Unterscheidung von Polyethylen nach unterschiedlicher Molekülstruktur [5]

Die praktischen Anwendungen unterscheiden sich deutlich. Mit steigenden Kristallisationsgrad erhöht sich Steifigkeit, Abriebfestigkeit, Härte, Chemikalienbeständigkeit und Anwendungstemperatur. Der amorphe Anteil wiederum ist ausschlaggebend für Zähigkeit, Kerbschlagzähigkeit, Spannungsrissbeständigkeit und Festigkeit. Die äußerliche Erscheinung von PE liegt zwischen transparent bis milchig und opak. Dabei hat HDPE eine geringere Transparenz als LDPE. Daher leitet sich auch die häufigste genutzten Anwendung von LDPE, dem Extrudieren von Folien ab [5, 7].

1.2.2 High Density Polyethylen HDPE

Anders als LDPE wird HDPE vor allem mit Hilfe von Extrusionsblasen, Rohrextrusion oder Spritzgießen bearbeitet. Die Hauptanwendungen von HDPE sind Transport- und

Lagerbehälter sowie spritzgegossene Haushaltswaren. Darüber hinaus zählen auch Abwasserrohre und Trinkwasser-Druckrohre zu häufigen Anwendungen [7].

Hergestellt wird HDPE mittel Niedrigdruckverfahren vor allem mit Ziegler-Natter- oder Phillips-Katalysatoren. Wie im vorigen Kapitel bereits angedeutet besitzt HDPE einen höheren Kristallisationsgrad als LDPE, welcher bei 60 bis 80 % liegt. Dabei liegt die Dichte zwischen $0,942$ bis $0,965 \frac{g}{cm^3}$ [5].

1.2.3 Polypropylen PP

Polypropylen (PP), ist ein teilkristalliner Thermoplast und gehört wie PE zur Gruppe der Polyolefine. Bei einem 15 %igen Anteil an der Gesamtproduktion von Kunststoffen gilt PP als zweitwichtigster Kunststoff nach PE. Es wird durch die katalytische Kettenpolymerisation von dem Monomer Propen erzeugt. Abhängig von den Polymerisationsbedingungen lassen sich isotaktische, syndiotaktische oder ataktische Verbindungen erhalten. Bei isotaktischem PP befindet sich die Methylgruppe einseitig an den Kohlenstoffketten, während bei syndiotaktischem PP die Methylgruppen regelmäßig abwechselnd auf unterschiedlichen Seiten angeordnet sind. Beim ataktischen PP wiederum gibt es keine geordnete Verteilung der Methylgruppen. Die Taktizität beeinflusst die physikalischen Eigenschaften eines Polymers. So liegt beispielsweise der Schmelzpunkt von isotaktischem PP bei $165^\circ C$, während er bei ataktischem PP schon bei $128^\circ C$ liegt. Isotaktisches PP wird heutzutage technisch am häufigsten genutzt und lässt sich mithilfe der Ziegler-Natter-Katalyse erzeugen [6, 10].

Reines PP besitzt eine Dichte zwischen $0,834 \frac{g}{cm^3}$ und $0,937 \frac{g}{cm^3}$, abhängig vom Kristallisationsgrad und ist somit der Kunststoff mit der geringsten Dichte. Der relativ hohe E-Modul von 1600 MPa ist auf den hohen Kristallisationsgrad zurückzuführen. Ebenfalls besitzt PP eine hohe maximale Dauergebrauchstemperatur von $100^\circ C$. Der Glasübergang von PP liegt bei $-10^\circ C$, welche es ab dieser Temperatur spröde werden lässt [5, 10, 11].

Weiter besitzt PP eine hohe chemische Beständigkeit, ist leicht be- und verarbeitbar und wird vor allem über Spritzguss oder Extrusion verarbeitet. Es eignet sich damit gut für Verpackungsfolien und Verpackungen im Lebensmittelsektor. Zudem kann PP durch Thermoformen verarbeitet werden, hier kommt PP auch im Automobil- oder Haushaltsbereich vermehrt zum Einsatz [6]. Die folgenden Abbildungen zeigen die Strukturformel von PP in Abbildung 4 sowie die möglichen Taktizitäten in Abbildung 5

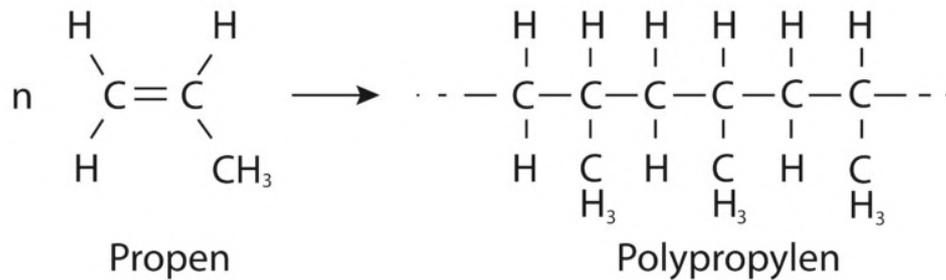


Abbildung 4 Aufbau von Polypropylen[9]

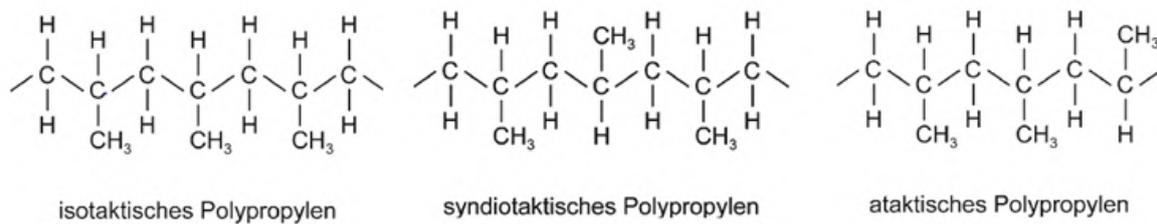


Abbildung 5 Taktizitäten von Polypropylen[10]

1.2.4 Polystyrol PS

Polystyrol PS gehört mit 5,3 % am Gesamtanteil der Kunststoffproduktion zu einem weiteren wichtigen Polymer. Bei PS handelt es sich um einen amorphen Kunststoff welcher mittels radikalischer Kettenpolymerisation, aus dem Monomer Styrol produziert wird. Die wichtigsten Herstellverfahren sind die Suspensionspolymerisation und die kontinuierliche Masspolymerisation. Beim ersteren Verfahren wird Styrol, welches mit Peroxid-Initiatoren versetzt wurde, in Wasser fein verteilt. Die Temperaturen reichen hierbei von 70 bis 120 °C und die Drücke bis 5 bar. Die Reaktion bei der Masspolymerisation wird durch die Zugabe von Initiatoren oder rein thermisch durchgeführt. Die Temperaturen reichen hier von 80 bis 180 °C. Der chemische Aufbau ist in Abbildung 6 zu erkennen. [1, 5, 7]

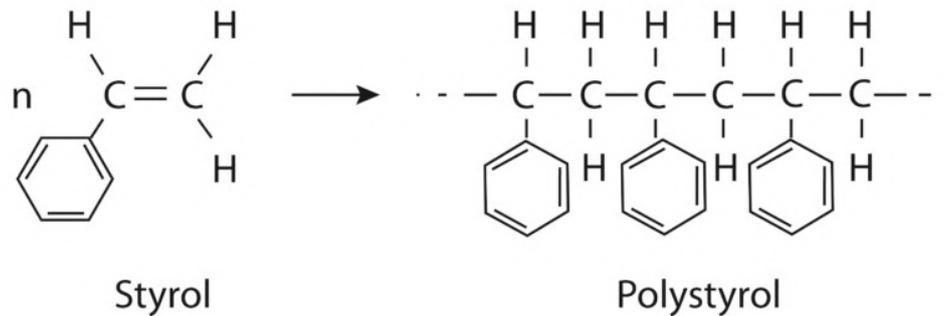


Abbildung 6 Aufbau von Polystyrol[9]

Die Verarbeitung erfolgt vorrangig über Spritzgießen, Thermoformen und Extrudieren. Es weist eine niedrige Dichte, hohen Steifigkeit und mittlere Härte und Festigkeit auf. Optisch ist reines PS transparent. Die Hauptanwendungen sind wie auch schon bei PE und PP dem Verpackungssektor zuzuordnen, vor allem Lebensmittelverpackungen. Darüber hinaus findet PS zum Beispiel auch Anwendung als Gehäuse für Haushalts- und Elektrogeräte [5, 7].

1.3 Strategien des Kunststoffrecyclings

Ziel des Recyclings ist eine nachhaltige Kreislaufschließung von Stoffen und Erzeugnissen, besonders in Bezug auf die Umwelt zu gewährleisten. Grundsätzlich wird versucht Ressourcen und Energie zu sparen und die Umwelt zu schonen. In Anbetracht von Kunststoffen, kann der Werkstoffkreislauf auf unterschiedliche Weisen realisiert werden [12]:

- Wiederverwendung bzw. Produktrecycling
- Werkstoffliches Recycling
- Rohstoffliches Recycling
- Energetische Verwertung

Beim Produktrecycling wird versucht das gleiche Produkt, mit der gleichen Funktion wiederzuverwenden. Ein typisches Beispiel hierfür wäre ein klassisches Pfandflaschensystem. Falls dies nicht mehr möglich ist, wenn beispielsweise die Funktion nicht mehr gewährleistet werden kann, werden andere Methoden verwendet.

So werden beim Werkstofflichen Recycling, Kunststoffabfälle mittels physikalischer Prozesse zu einem Rezyklat mit definierten Eigenschaften aufbereitet und zu neuen Produkten verarbeitet. Falls das Werkstoffliche Recycling nicht möglich ist, können durch chemische Prozesse die Kunststoffabfälle stofflich aufbereitet und in ihre molekularen Grundbausteine zurückgeführt werden. Hier wird dann von Rohstofflichem Recycling gesprochen. Zusätzlich zu diesen Möglichkeiten lassen sich Kunststoffe auch als Brennstoff thermisch verwerten. In Müllverbrennungsanlagen wird die gespeicherte Energie der Kunststoffe zu Wärme und kann weiter zu elektrischer Energie umgewandelt werden [13]. Die vorliegende Arbeit thematisiert das Werkstoffliche Recycling, auf das im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

1.3.1 Werkstoffliches Recycling

Prinzipiell kann das werkstoffliche Recycling, auch mechanisches Recycling genannt, in 5 Teilprozesse eingeteilt werden [13]:

- Sammlung
- Sortierung
- Zerkleinerung
- Säuberung
- Verarbeitung

Die Sammlung des Abfalls stellt einen hohen logistischen Aufwand dar. Oftmals wird dies als ein technisch einfach durchzuführender Aspekt im Recyclingprozess angesehen, jedoch kann bereits hier der Aufwand für die nachfolgenden Schritte wesentlich gesteuert werden. Wird anfangs bereits eine gewisse Einteilung des Abfalls vorgenommen, entfallen hohe wirtschaftliche und energetische Kosten in der Sortierung. Je nach Sammelsystem unterscheiden sich die in der Recyclinganlage angelangten Fraktionen deutlich. Ebenfalls ist auch ein gesellschaftliches Bewusstsein durch den politischen Apparat zu schaffen, um Littering zu vermeiden und ordnungsgemäßes Entsorgen zu fördern. Im Hinblick auf das Kunststoff-Recycling muss gesagt werden, dass die Rezyklierbarkeit stark auf die Art und Reinheit des Kunststoffes ankommt. Die Einteilung sollte wenn möglich, bereits bei der Sammlung vorgenommen werden. Die Kennzeichnung des Kunststofftyps (Recycling-Codes) auf Produkten erleichtert dieses Vorgehen, siehe Abbildung 7 [14].

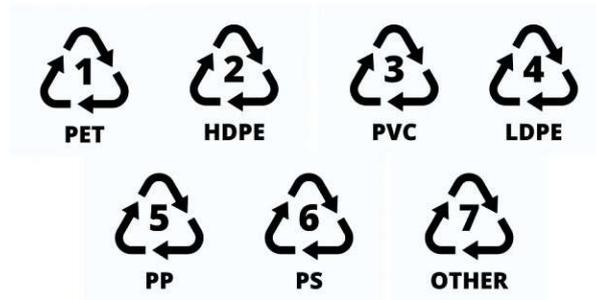


Abbildung 7 Recycling-Codes[15]

Bei der Sortierung wird der Abfall sortenrein in seine unterschiedlichen Bestandteile getrennt, um anschließend weiterverarbeitet zu werden. Meist wird der Abfall nach seiner Größe mit Sieben oder manuell getrennt. Es werden anschließend Fremdkörper aus dem Kunststoffabfall entfernt. So können die magnetischen Eigenschaften von Metallen genutzt werden, um diese mittels magnetischer Abscheider vom restlichen Abfall zu trennen. Ebenfalls wird die unterschiedliche Dichte von den Materialien genutzt, um sie mit Hilfe von Dichteabscheider in einer wässrigen Lösung zu trennen. Für die Sortierung von den Kunststoffen selbst, kann ebenfalls deren Dichteunterschied genutzt werden. Auch können beispielsweise Polyolefine wie PP oder PE mit einer geringeren Dichte als Polyvinylchlorid (PVC) und Polyethylenterephthalat (PET) durch die Dichteabscheidung voneinander getrennt werden. Mittels Elektrostatik kann ein genaueres Sortieren, bei einem geringen Dichteunterschied zwischen den Fraktionen, erzielt werden. Ein Nachteil hier ist die hohe Empfindlichkeit für Kontaminationen, weswegen moderne Anlagen mit spektralphotometrischen Methoden wie Infrarot-Detektoren arbeiten. Auch Farbsortierungen werden für wirtschaftlich besonders interessante Kunststoffe wie PET durchgeführt. Zur Erreichung von Sortenreinheiten, stellen Kunststoffverbunde eine besondere Herausforderung dar [14, 16].

Nach dem Sortier-, und gegebenenfalls Vorwaschprozess werden die getrennten Kunststoffabfallfraktionen zerkleinert. Dies wird dazu genutzt den Abfall leichter handzuhaben und kann ebenfalls in unterschiedlichen Phasen des Recyclings stattfinden. So macht es Sinn am Anfang einer Recyclinganlage, bei inhomogenen Abfallströmen, eine grobe Vorzerkleinerung durchzuführen, um eine folgende Materialtrennung zu erleichtern. Zusätzlich kann vor einer Kunststoffsortierung mittels Nahinfrarot-Verfahren eine Zerkleinerung in kleinere Gebinde wie Flakes von Vorteil sein. Man denke an Getränkeflaschen bei denen Behälter, Etikett und Getränkeverschluss aus unterschiedlichen Kunststoff-

arten bestehen, welche im intakten Zustand miteinander verbunden wären und somit keine reine Fraktion erreichbar wäre. Gleichzeitig bedeuten eine höherer Anzahl and zerkleinerten Partikel eine größere Datenmenge für die Sortieranlagen, was wiederum die Sortiergeschwindigkeit reduziert. Für die folgende Wasch- und Verarbeitungsschritte wird üblicherweise mit zerkleinerten Flakes oder anderweitigen Mahlgut-Partikel gearbeitet [13, 17].

Ein Säuberungsprozess wird während unterschiedlichen Phasen des Recyclingprozesses durchgeführt. So werden Vorwaschgänge für stark verunreinigte Fraktionen herangezogen. Hier kommen zudem kombinierte Wasch- und Sortierprozesse zu Einsatz, um Reinigung und Vorabscheidung zu verbinden. Mineralischen Bestandteile wie Sand sind somit gleich während eines Voreinigungsprozesses von den Kunststoffbestandteilen abscheidbar, eine Anwendung wären hier Waschtrommeln mit eingebauten Sieb.

Neben den Vorwaschverfahren werden die bereits sortierten und zerkleinerten Kunststoffteilchen in Waschvorgängen mit Detergenzien und bei erhöhten Temperaturen behandelt. Somit können Verunreinigungen wie Klebstoffe oder auch oberflächliche Farben und Lackierungen entfernt werden. Ein Trockungsverfahren wird jeweils nach einem Waschverfahren angewendet, um eine Verarbeitbarkeit zu gewährleisten [13, 17].

Nun werden bei der Bearbeitung, die sortierten Kunststoffe je nach Art und Anwendung weiter aufbereitet. Bevor die restfeuchten Kunststofflakes und -granulate einem Extruder zugeführt werden, können die Teilchen in einer Vorbehandlungseinheit weiter getrocknet und die Betriebsbedingungen der Maschine daran angepasst werden. Im Extruder schmilzt das Granulat auf. Eine Entgasungseinheit befreit die Schmelze von flüchtigen Gasen und eine Filtrationseinheit am Ende des Extruders trennt restliche Feststoffe von der Schmelze. Die Regranulierung erfolgt nach dem Extrusionprozess, mittels Heiß- oder Kaltabschlag. Zusätzlich sind Nachbehandlungsverfahren möglich, die beispielsweise Geruchsreduktionen bewerkstelligen. Das rezyklierte Material unterscheidet sich dabei jedoch in der Qualität oftmals zu der virginen Version. Hier sind spielen Degradationsmechanismen eine wichtige Rolle, siehe Kapitel 1.3.3 [13, 14, 17].

1.3.2 Aktuelle Entwicklungen

Zusätzlich zu den technischen Gesichtspunkten, spielen rechtliche und wirtschaftliche Aspekte eine entscheidende Rolle. Hier sind auch die Akzeptanz und die Produzentenhaftung entscheidend. Während das Rezyklat den Anforderungen der Anwendung ent-

sprechen würde, wird aus Sicherheitsgründen dennoch Neuware vorgeschrieben. Ebenfalls kommt der geringe Preis von Neukunststoffen und die hohen Kosten beim Sortieren und Aufbereiten des Kunststoffes hinzu, woraus sich die geringe Akzeptanz zurückführen lässt [3, 18]. Mit der Einführung des EU-Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft im Rahmen des Europäischen Grünen Deals soll eine beschleunigte Umstellung hin zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise geschaffen werden. Hier wurden im Zuge der Richtlinie zur Regelung von Verpackungen und Verpackungsabfällen (Packaging and Packaging Waste Directive) Kunststoffrecyclingquoten von 55 % für Verpackungsabfälle bis 2030 festgelegt. Dies soll durch eine Einführung einer Mindestrecyclingquote, Senkung der Mehrwertsteuer auf rezyklierte Produkte, Förderungen von Zertifikaten und Grundlegung von Qualitätsstandards für sekundäre Kunststoffe gesteuert werden. Weiters wird vorgesehen Einwegverpackungen für spezielle Anwendungen, wie beispielsweise unverarbeitetes Obst oder Gemüse, komplett einzuschränken. [19, 20].

Ein Schritt in Richtung Schaffung von Qualitätsstandards wird im folgenden Abschnitt erläutert. Die Problematik der mangelnde Datenqualität führte zur Etablierung von Klassifizierungen für Kunststoffrezyklaten. Dieses Vorhaben wurde von wirtschaftlicher Seite angestoßen und ist in der DIN SPEC 91446 definiert. Sie sieht vor die wichtigsten Informationen, Eigenschaften und optischen Merkmale des Rezyklats anzugeben und nach Menge an Informationen in Qualitätsklassen einzuteilen. Darunter fallen Materialeigenschaften wie die Dichte oder Viskosität, aber auch Recyclingmethode oder Quelle. Die Transparenz und damit einhergehende Attraktivität für Kunden von rezyklierten Kunststoffen steigt dadurch. Es ist jedoch anzumerken, dass hierbei nicht die Qualität des Rezyklats sondern die Datenqualität bewertet wird, [21].

1.3.3 Degradation

Eine der wesentlichen Herausforderungen im Recyclingprozess und der mehrfachen Nutzung ist die Degradation des Polymers. Laut DIN 50035 [22] beschreibt Degradation die Gesamtheit aller im Laufe der Zeit in einem Material irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge. Grundsätzlich bedeutet das eine Veränderung der initialen werkstoffcharakteristischen Eigenschaften. Es gibt unterschiedliche Ursachen und Wirkmechanismen von Degradation. Nach der Nutzungsphase des Kunststoffes im Abfallstrom ist dieser vermehrt unterschiedlichen äußeren Einflüssen ausgesetzt. So wird der Kunststoff vor allem durch Witterung und UV-Strahlung beaufschlagt. Zusätzlich

dazu, kann es durch mechanischer Belastung über einen längeren Zeitraum zu Ermüdungserscheinungen durch Kriechen kommen. Diese Mechanismen sind während nach der ursprünglichen Nutzungsphase des virginen Material besonders bedeutend. Da der Fokus dieser Arbeit auf dem Recyclingprozess liegt und die logistischen Faktoren, wie Sammlung und Lagerung nicht behandelt werden, werden diese Mechanismen jedoch nicht näher ausgeführt [10].

Im Fall des mechanischen Recyclings ist vor allem die Degradation durch thermische und mechanischer Beanspruchung durch Scherung relevant. Thermoplastische Kunststoffe werden im Zuge des mechanischen Recyclingprozesses wieder aufgeschmolzen und mittels mechanischer Beanspruchung in die gewünschte Geometrie gebracht. Demzufolge treten auch Degradationserscheinungen auf. Die Effekte auf den Werkstoff können unterschiedlich ausfallen. Vor allem sind Auswirkungen auf die Kunststoffschmelze erkennbar. Dabei ist besonders das Fließverhalten und die Schmelzviskosität betroffen. Gründe hierfür sind vor allem die Änderung der Molekularstruktur durch Kettenbrüche, Oxidationserscheinungen, mögliche Nachvernetzungen und Ablösung von Atomen und Molekülketten. So zeigt PP und PS üblicherweise eine Verringerung des Molekulargewichts während bei PE eine Erhöhung des Molekulargewichts erkennbar ist. [10, 18, 23]

1.4 Zielsetzung

Die Forschungsarbeit beschäftigt sich mit rezyklierte Verpackungsmaterialien und deren Eigenschaften. Bei den Materialien handelt es sich um HDPE, PP und PS. Dabei sollen in Vorversuchen der Einfluss von rezyklierte HDPE-Fraktionen mit PP-Verunreinigungen und rezyklierte PP-Fraktionen mit HDPE-Verunreinigungen betrachtet werden. Die Thematik der Sortenreinheit sowie die damit verbundenen Eigenschaftsänderungen soll für spätere Untersuchungen der Rezyklate helfen Rückschlüsse zu ziehen. Die mechanischen, thermischen und rheologischen Eigenschaften werden dabei überprüft.

Im weiteren Verlauf liegen die Eigenschaften von rezyklierten PP- und PS-Joghurtbechern im Fokus der Arbeit. Blends mit unterschiedlichen Anteilen an Rezyklatanteilen werden als Ausgangsmaterial herangezogen. Auch hier werden mechanischen, rheologische und thermische Eigenschaften untersucht. Von Interesse waren auch Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften durch zwei ausgewählte Lebensmittel, Rapsöl und Apfelessig,

welche unter der Verwendung von Auslagerungsversuchen mit den PS- und PP-Rezyklat in Kontakt kommen. Zudem lag ein Schwerpunkt bei der Ermittlung von Veränderungen der Materialcharakteristika durch Mehrfachverarbeitung, durchgeführt mittels Extrusion.

Neben der Betrachtung der rezyklierten Joghurtbecher sollten auch die rheologischen Änderungen von Pre- und Post-Consumer Joghurtbecher aus PP und PS durch Waschversuche untersucht werden. Hier wurde vorgesehen mittels Wasser und verdünnter Natronlauge bei erhöhten Temperaturen zu waschen.

2 Materialien und Methoden

Die Arbeit lässt sich in folgende Subkategorien einteilen, welche immer Verpackungsmaterialien mit Verbindung zur Recyclingthematik behandelte.

- Werkstoffkundliche Untersuchungen
 - HDPE-PP Blends
 - Rezyklierte PS- und PP-Joghurtbechern
- Waschversuche von Pre- und Post-Consumer Joghurtbechern aus PP und PS
- Auslagerungsversuche an rezyklierten PS- und PP-Joghurtbechern in Apfelessig und Rapsöl

Manche Methoden wurden bei mehreren Subkategorien untersucht. Die Vorversuche umfassten Untersuchung mittels Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR), Differenzkalometrie (DSC), rheologische Analyse (Frequency sweeps) Zugversuche und Schlagzugversuche. Im Anschluss an den Auslagerungsversuchen wurden sowohl eine FTIR-Analyse als auch Zugversuche durchgeführt. Bei den Waschversuchen wurden rheologische Untersuchungen unternommen. Die werkstofftechnische Untersuchung der Joghurtbecher mit unterschiedlichen Rezyklinganteilen umfasste das gesamte Spektrum der Versuche. Hier sind FTIR-Analyse, DSC, thermogravimetrische Analyse (TGA), Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR), rheologische Analyse (Frequency sweeps), Zugversuche und Schlagzugversuche durchgeführt worden. Abbildung 8 gibt einen Überblick über die verwendeten Analysemethoden.

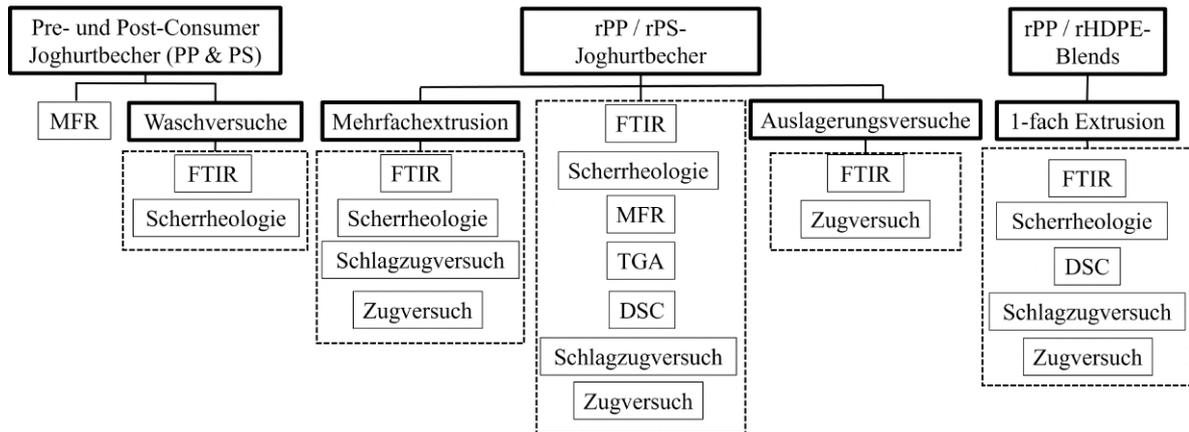


Abbildung 8 Überblick der verwendeten Analysemethoden für die jeweiligen Materialien

2.1 Materialien

In dem folgenden Abschnitt werden die verwendeten Materialien aufgezeigt. Dabei wird in dieser Arbeit die folgende Abkürzung verwendet:

XX % rPOLYMER

Dabei steht **XX** für den prozentuellen Rezyklatanteil, **r** für rezykliert und **POLYMER** für die Art des Kunststoffes. So bedeutet beispielsweise 30 % rPP, dass es sich um ein Polypropylen mit 30 % rezyklierten PP und 70 % virginen PP handelt.

2.1.1 Polyethylen

Das rezyklierte HDPE (rHDPE) welches in den Vorversuchen herangezogen wurde, stammt aus Flakes von HDPE-Hohlkörper mit einem Fassungsvermögen < 5 l. Sowohl ein farblich sortiertes weißes Reinrezyklat als auch eine farblich durchmischte und somit bunte Fraktion wurden betrachtet. Die Eigenschaften sind in den Tabellen 1 und 2 ersichtlich.

Tabelle 1 rHDPE-Fraktion weiß

Dichte ^a	0,942 – 0,965 $\frac{g}{cm^3}$
Schmelzbereich ^b	132,02 °C
Waschvorgang	heiß gewaschen 7 h
Nachbehandlung	Geruchsbehandlung

^a Werte aus der Literatur [5].

^b Im Zuge der Arbeit ermittelt.

Tabelle 2 rHDPE-Fraktion bunt

Dichte ^a	0,942 – 0,965 $\frac{g}{cm^3}$
Schmelzbereich ^b	131,42 °C
Waschvorgang	heiß gewaschen 24 h
Nachbehandlung	Geruchsbehandlung

^a Werte aus der Literatur [5].

^b Im Zuge der Arbeit ermittelt.

Die Eigenschaften des verwendeten HDPE für die Mischung mit dem rezyklierten PP aus den Vorversuchen ist in Tabelle 3 ersichtlich.

Tabelle 3 HDPE BorePure MB6561 [24]

Hersteller	Borealis AG
Dichte ISO 1183	955 $\frac{kg}{m^3}$
Schmelzbereich ^a	125,70 °C
Schmelze-Massefließrate (MFR) ISO 1133, 2,16kg & 190°C	1,5 $\frac{g}{10 \text{ min}}$

^a Im Zuge der Arbeit ermittelt.

Zusätzlich zu dem weißen und bunten rHDPE, wird eine Verunreinigung der HDPE Rezyklate mittels beigefügten PP nachgestellt. Dabei wird der rezyklierten rHDPE-Fraktion weiß zusätzlich 2,5 m% HC600TF, in dieser Arbeit auch PP2 genannt, zugefügt, siehe Tabelle 1 und 6.

2.1.2 Polypropylen

Im Falle der Vorversuche wurde rezykliertes PP-Granulat (rPP) betrachtet. Hierbei gibt es eine farblich sortierte weiße Fraktion und eine gemischt bunte Fraktion. Das Rezyklat ist in Granulatform zur Verfügung gestellt und stammt aus Schalen, Flaschen und Becher < 5 l. Nebenbestandteile wie Etiketten, Verschlüsse und Folien sind ebenfalls vorhanden.

Tabelle 4 rPP-Fraktion weiß

Dichte ^a	0,91 $\frac{g}{cm^3}$
Schmelzbereich ^b	163,55 °C
Waschvorgang	heiß gewaschen
Reinheit	≥ 96 %

^a Werte aus der Literatur [5].

^b Im Zuge der Arbeit ermittelt.

Tabelle 5 rPP-Fraktion bunt

Dichte ^a	0,91 $\frac{g}{cm^3}$
Schmelzbereich ^b	162,00 °C
Waschvorgang	kalt gewaschen
Nachbehandlung	Geruchsbehandlung 2,7 h
Reinheit	≥ 96 %

^a Werte aus der Literatur [5].

^b Im Zuge der Arbeit ermittelt.

Wie bereits auch bei den HDPE-Gebinden werden zusätzlich zu den PP-Rezyklaten weiß und bunt eine verunreinigte PP-Fraktion nachgestellt. Hierbei wird die rPP-Fraktion weiß mit 3 m% HDPE BorePure MB6561 gemischt, siehe Tabelle 4 und 3.

Das Polypropylen HC600TF (PP2), für die Mischung mit die rHDPE-Gebinde ist in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6 PP HC600TF (PP2) [25]

Hersteller	Borealis AG
Dichte ISO 11357-3	$0,9 - 1,0 \frac{g}{cm^3}$
Schmelztemperatur ISO 11357-3	164 °C
Schmelze-Massefließrate ISO 1133, 2,16 kg & 230 °C	$2,8 \frac{g}{10 \text{ min}}$

Die untersuchten rezyklierten PP-Joghurtbecher bestanden im Ausgangszustand aus rezyklierten Flakes und Granulat, welches wiederum davor als PP-Becher und PP-Schalen Anwendung fand. Das virgine PP-ist nicht bekannt. Ein Überblick über die Eigenschaften der unterschiedlichen Blends an rezyklierten PP-Becher ist in Tabelle 7 ersichtlich.

Tabelle 7 rPP-Becher

Dichte ^a	$0,91 \frac{g}{cm^3}$
Schmelzbereich ^a	160-165 °C
Zusammensetzung % rPP	MFR ^b , 5 kg & 200 °C $\frac{g}{10 \text{ min}}$
30	$7,4 \pm 0,3$
40	$8,7 \pm 0,2$
50	$10,7 \pm 0,7$
60	$10,6 \pm 0,7$
80	$14,4 \pm 1,2$
100	$18,6 \pm 1,8$

^a Werte aus der Literatur [5].

^b Schmelze-Massefließrate (MFR), Im Zuge der Arbeit ermittelt.

2.1.3 Polystyrol

Ähnlich wie bereits die PP-Becher, bestanden auch die rezyklierte PS-Joghurtbecher im Ausgangszustand aus rezyklierten Flakes und Granulat, welches wiederum davor als

PS-Bechern und PS-Schalen Anwendung fand. Zusätzlich zu den regulären Mischungen aus dem PS-Rezyklat und virginen PS wurde für das 30 %-ige rPS zusätzlich ein Farb-Masterbatch (MB) mit 1,5 m% und 2,5 m% hinzugefügt. Das virgine PS stand in dem Fall zur Verfügung. Die Eigenschaften der PS-Rezyklat-Blends sind in Tabelle 8

Tabelle 8 rPS-Becher

Dichte ^a	1,05 $\frac{g}{cm^3}$
Schmelzbereich ^a	- (amorph)
Glasübergangstemperatur ^a	90 °C
Zusammensetzung	MFR ^b , 2,16 kg & 230 °C
% rPS	$\frac{g}{10\ min}$
Virgin PS	3,2 ± 0,1
10 % rPS	3,2 ± 0,1
30 % rPS	3,2 ± 0,1
30 % rPS + 1,5 m% MB	3,3 ± 0,1
30 % rPS + 2,5 m% MB	3,5 ± 0,1
50 % rPS	3,6 ± 0,2
70 % rPS	4,1 ± 0,1
100 % rPS	5,5 ± 0,2

^a Werte aus der Literatur [5].

^b Im Zuge der Arbeit ermittelt.

2.1.4 Materialien der Waschversuche

Für die Waschversuche wurde sowohl mit Pre- als auch mit Post-Consumer Becher von Joghurt und anderen Milchprodukten gearbeitet. Der Pre-Consumer Typ wurde firmen-seitig zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um Becher vor der Nutzung durch den Endkonsumer. Der Post-Consumer Typ umfasst Becher nach deren Nutzung und geht aus eigener Sammlung hervor.

Ein Teil der Becher war farblich bedruckt und einige wiesen geklebte Papieretiketten auf. Zusätzlich wurde ein aufgetrennter 3-Komponenten Becher untersucht. Dieser wies Klebstoffreste auf. Es sind sowohl PP- als auch PS-Becher gewaschen worden, eine Übersicht geben die Abbildungen 9 bis 11 und die Tabelle 9.



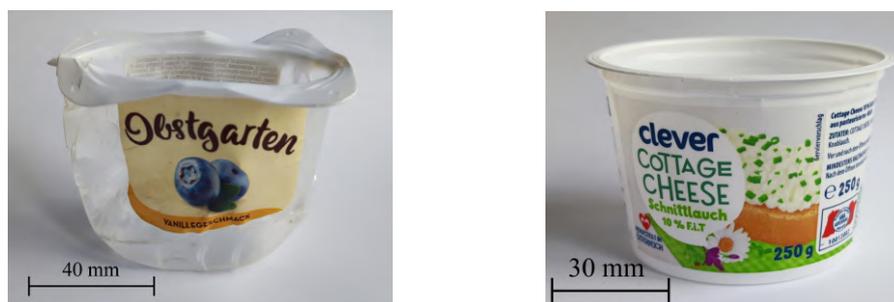
(a) PP Pre Consumer bedruckt (Selsky Jogurt) (b) PP Pre Consumer unbedruckt (Selsky Jogurt) (c) PS Pre Consumer bedruckt (Sauerrahm) (d) PS Pre Consumer unbedruckt (Sauerrahm)

Abbildung 9 Pre Consumer Becher



(a) PP Post Consumer K3 (b) PP Post Consumer (NÖM Joghurt) (c) PP Post Consumer (Zott Sahne Joghurt)

Abbildung 10 PP Post Consumer Becher



(a) PS Post Consumer (Obstgarten) (b) PS Post Consumer (clever cottage cheese)

Abbildung 11 PS Post Consumer Becher

Tabelle 9 Materialien der Waschversuche

Joghurtbecher	MFR in $\frac{g}{10 \text{ min}}$	Herstellungsart	Dekorationsart
PP Pre Consumer bedruckt (Selsky Joghurt) ^a	$8,4 \pm 0,5$	Thermoformen	Bedruckt
PP Pre Consumer unbedruckt (Selsky Joghurt) ^b	$7,4 \pm 0,2$	Thermoformen	Unbedruckt
PS Pre Consumer bedruckt (Sauerrahm) ^b	$3,3 \pm 0,1$	Thermoformen	Bedruckt
PS Pre Consumer unbedruckt (Sauerrahm) ^a	$3,8 \pm 0,1$	Thermoformen	Bedruckt
PP Post Consumer K3 ^a	$15,9 \pm 1,5$	Thermoformen	Banderole/ Sleeve
PP Post Consumer (NÖM Joghurt) ^a	$8,2 \pm 0,3$	Thermoformen	Bedruckt
PP Post Consumer (Zott Sahne Joghurt) ^c	$59,6 \pm 0,2$	Spritzgießen	In-Mould- Prozess
PS Post Consumer (Obstgarten) ^b	$5,4 \pm 0,7$	Spritzgießen	geklebtes Papieretikett
PS Post Consumer (clever cottage cheese) ^b	$3,1 \pm 0,1$	Thermoformen	Bedruckt

^a im Zuge der Arbeit ermittelt, 2,16 kg & 230 °C.

^b im Zuge der Arbeit ermittelt, 5 kg & 200 °C

^c Ist lediglich ein indikativer Wert. Aufgrund der der nicht passenden Ausrüstung für diese hohen MFR-Werte, außerhalb dem Wirksamkeit der Norm DIN EN ISO 1133-1, in der Arbeitsgruppe ermittelt, 2,16 kg & 230 °C

2.1.5 Sonstige Stoffe

Bei den Auslagerungsversuche kamen sowohl Rapsöl als auch Apfelessig zum Einsatz. Die Informationen diesbezüglich sind in Tabelle 10 und 11 ersichtlich.

Tabelle 10 Rapsöl

Hersteller	VFI GmbH
Bestandteile	Angaben in g ^a
Fett	92
Kohlenhydrate	0
davon Zucker	0
Eiweiß	0
Salz	0
Linolensäure (Omega-3-Fettsäure)	7,1

^a pro 100 ml.

Tabelle 11 Apfelessig

Hersteller	Friedrich Feldmann GmbH & Co. KG
Säuregehalt	5 %
Bestandteile	Angaben in g ^a
Fett	< 0,5
Kohlenhydrate	< 0,5
davon Zucker	< 0,5
Eiweiß	< 0,5
Salz	< 0,01

^a pro 100ml.

Bei den Waschversuchen kam Natriumhydroxid zur Herstellung einer Natronlauge mit 2 Massenprozent (m%)¹ zum Einsatz, siehe Tabelle 12.

Tabelle 12 Natriumhydroxid

Hersteller	Carl Roth GmbH
Dichte in $\frac{g}{cm^3}$	< 2,13
Reinheit in %	≥ 98

¹bezogen auf die Wassermenge bei dem Waschvorgang

2.2 Methoden

2.2.1 Prüfkörperherstellung

Die Herstellung der Prüfkörper zur mechanischen und rheologischen Untersuchung wurde je nach Anwendungsfall und Material durch unterschiedliche Prozesse gefertigt. Abbildung 12 gibt hierfür einen Überblick der Prüfkörperherstellung je nach Material und Anwendungsfall.

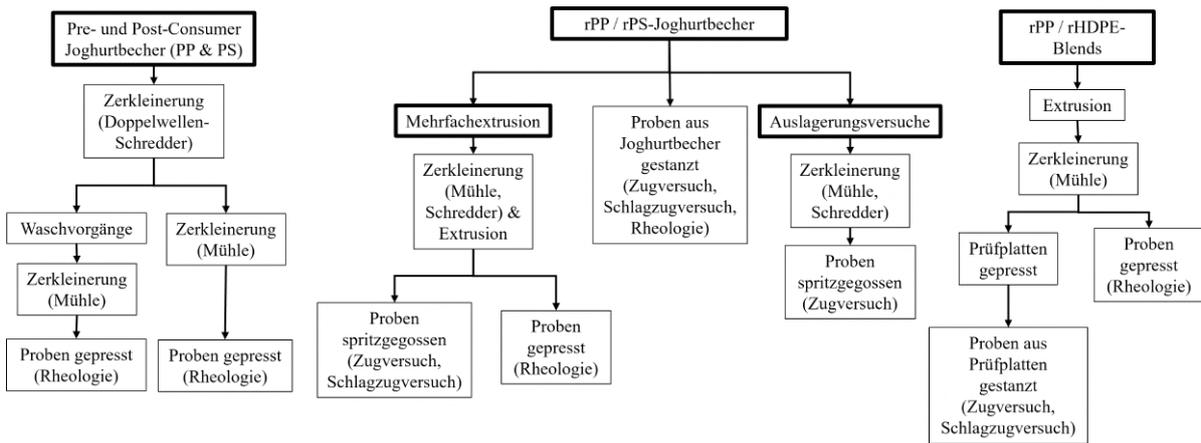


Abbildung 12 Überblick der Prüfkörperherstellung nach Anwendungsfall

Für PP als auch PS wurden einerseits Probenkörper direkt aus den Joghurtbecher gestanzt, um den Einfluss des Herstellungsprozess zu betrachten. Andererseits wurden sowohl für die Auslagerungsversuche als auch für die Untersuchung der Mehrfachextrusion Zugproben mittels Spritzgussverfahren produziert. Im Falle von HDPE sind Prüfkörper aus zuvor gepressten Platten gestanzt worden.

Je nach Material und Ausgangsstoff wurden unterschiedliche Zerkleinerungsmethoden herangezogen. Die Zerkleinerung erfolgte bei den PP-Joghurtbecher durch Schreddern. Im Falle von PS wurde eine Schneidmühle "Pulverisette 19" (Fritsch GmbH, Deutschland) verwendet. Im Laufe des Zerkleinerungsprozesses zeigte sich, dass PS aufgrund der höheren Wärmeentwicklung im Einwellen-schredder aufschmelzen kann und den Prozess dadurch deutlich erschwert. In Abbildung 13 ist das Ergebnis beider Verfahren für PS ersichtlich. Für die Probekörper der Mehrfachextrusion wurde ebenfalls für die Zerkleinerung als Vorprozess die Schneidmühle verwendet.



Abbildung 13 rPS Mahlgut: aus dem Schredder (links) und der Schneidmühle (rechts)

Prüfkörper Zugversuch

Zum Stanzen von Zugstäben aus den untersuchten Joghurtbechern wurden Siegelränder und Becherböden abgetrennt. Die Proben wurden anschließend aus dem Bechermantel entnommen. Im Anschluss sind je 2 vertikale und 2 horizontale Proben gestanzt worden. Die beiden horizontalen Proben wurde einmal aus oberen Viertel und einmal aus dem unteren Viertel des Bechers gestanzt, siehe Abbildung 14. In der DIN EN ISO 527-2 wird eine definierte Dicke von 2 mm für den Typ 5A vorgesehen. Die geringere Dicke bei den Zugproben der Joghurtbecher stellt somit eine Abweichung zur Norm dar. In dem Fall ist demnach lediglich ein Vergleich untereinander sinnvoll [26].

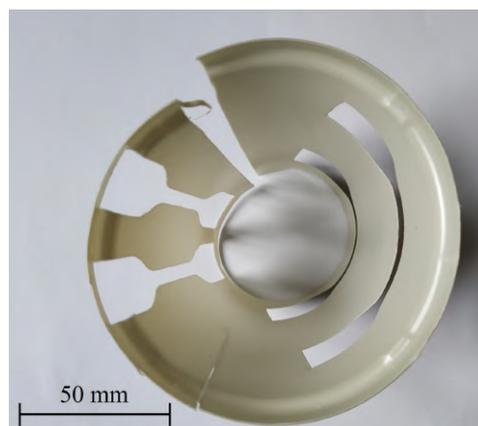


Abbildung 14 Joghurtbecher aus PS nach dem Stanzvorgang, horizontale (rechts) & vertikale Orientierung (links)

Im Falle der rezyklierten HDPE-PP-Blends, sind zuerst Prüfplatten mit Hilfe einer Heizpresse "Collin P 200"(COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH, Deutschland) und einem Tauchkantenwerkzeug hergestellt worden. Für die Prüfplatten der Schlagzugversuche wurden 1,25 mm dicke Platten hergestellt, für die Prüfplatten des Zugversuchs entsprach die Dicke 2 mm. Das gewählte Pressprogramm ist in Tabelle 13 ersichtlich. Im Anschluss wurden aus den Platten Zugproben ausgestanzt. Probenkörper für Zug- und Schlagzugverfahren wurden mit den Normen entsprechenden Werkzeugen aus den Platten gestanzt.

Tabelle 13 Pressprogramm der Presse für HDPE Prüfplatten

		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
Temperatur	(°C)	80	190	190	190	30
Zeit	(min)	10	14	2	3	20
Druck	(bar)	2	10	20	40	60

Im Falle der spritzgegossenen Proben wurde das zuvor produzierte Granulat zunächst dem Doppelschneckenextruder "Haake Mini Lab II"(Thermo Fisher Scientific Inc., USA) zugeführt und aufgeschmolzen. Zur Gewährleistung der Durchmischung wurde die Polymerschmelze zyklisch bei einer Umdrehung von $100 \frac{U}{min}$, bis zur Entnahme, im Kreis geführt. Im anschließenden Schritt wurde die Schmelze in die Heizpistole "Haake Mini Jet II"(Thermo Fisher Scientific Inc., USA) aufgezogen. Im Spritzgussverfahren wird die Schmelze bei einem Druck von 350 bar in die temperierte Form gepresst. Die Geometrie der Zugproben und deren Abmaße ist in Abbildung 15 und Tabelle 14 ersichtlich.

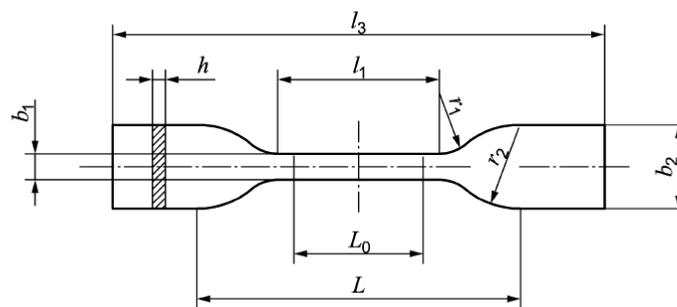


Abbildung 15 Prüfkörpergeometrie für den Zugversuch, Typ 5A [26]

Tabelle 14 Maße des Prüfkörpers, Typ 5A aus der Abbildung 15

	Bezeichnung	Abmaße in mm
l_3	Gesamtlänge	75
b_2	Breite an den Enden	12,5
l_1	Länge des engen parallelen Teils	25
b_1	Breite des engen Teils	4
r_1	Kleiner Radius	8
r_2	Großer Radius	12,5
L	Anfangsabstand der Klemmen	45
L_0	Messlänge	20
h	Dicke	2

Prüfkörper Schlagzugversuch

Ähnlich zu den Prüfkörpern für die Zugversuche erfolgte auch die Herstellung der Probekörper für den Schlagzugversuch. Die Prüfplatten der HDPE-Gebinde sowie die Joghurtbecher wurden wieder gestanzt. Zudem sind auch spritzgegossene Proben für die Mehrfachextrusion gefertigt wurden. Im Gegensatz zu den Proben für den Zugversuch wird in diesem Fall nachträglich eine Kerbe erzeugt. Dazu wurde eine Kerbmaschine "Ceast Notch-vis" (Illinois Tool Works Inc., USA) verwendet. Die Kerben wurden mittig und beidseitig erzeugt. Die Form ist nach DIN EN ISO 8256 genormt [27]. Die Geometrie der Schlagzugproben und deren Abmaße sind in Abbildung 16 und Tabelle 15 ersichtlich.

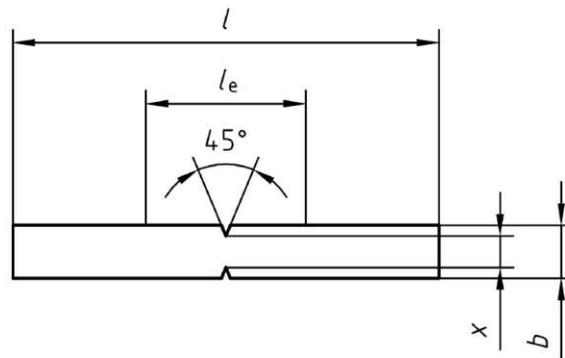
**Abbildung 16** Prüfkörpergeometrie für den Schlagzugversuch [27]

Tabelle 15 Prüfkörpergeometrien für den Schlagzugversuch

	Bezeichnung	Abmaße in mm
l	Gesamtlänge	60
l_2	Einspannlänge	30
b	Breite	10
x	Breite des Stegs	6
h	Dicke	1,25

Prüfkörper Rheologie

Für die Versuche der Scherrheologie wurden kreisrunde Plättchen mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Dicke von etwa 1,2 mm hergestellt. Hierfür wurden direkt Böden der Joghurtbecher herausgestanzt. Für die Proben der Waschversuche und der Mehrfachextrusion sowie den HDPE-Gebinden kam, wie bereits Herstellung der Prüfkörper für die mechanische Untersuchung, die Heizpresse COLLIN P 200 mit den Pressprogrammen laut Tabelle 16 zum Einsatz.

Tabelle 16 Pressprogramme der Presse für Rheologieproben

		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
PP						
Temperatur	(°C)	180	210	210	210	30
Zeit	(min)	10	2	5	1	12
Druck	(bar)	0	100	100	80	80
Rampe	($\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$)	0	0	0	0	15
PS						
Temperatur	(°C)	180	180	180	180	30
Zeit	(min)	10	2	5	1	12
Druck	(bar)	0	100	100	80	80
Rampe	($\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$)	0	0	0	0	15
HDPE						
Temperatur	(°C)	180	180	180	180	30
Zeit	(min)	10	2	5	1	12
Druck	(bar)	0	100	100	80	80
Rampe	($\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$)	0	0	0	0	15

2.2.2 Mehrfachextrusion

Zur Erreichung eines geschlossenen Werkstoffkreislaufs ist besonders die damit verbundene Mehrfachverarbeitung der Polymere und die Auswirkung auf deren Eigenschaften von Bedeutung. Vor allem ist die Degradation und die damit verbundenen Veränderung relevant, wie im Kapitel 1.3.3 näher beschrieben ist. Im Falle der 100 %igen Rezyklate sowohl bei PS als auch PP sowie bei den HDPE-Blends wurden Mehrfachextrusionen durchgeführt.

Im Falle der PS- und des PP-Joghurtbecher wurden diese zunächst mittels Schneidmühle zerkleinert und anschließend im Einschneckenextruder aufgeschmolzen. Der prinzipielle Aufbau ist mit den unterschiedlichen Zonen in Abbildung 17 erkennbar. In der Einzugszone wird das feste Material weiter in den Extruder gefördert und dabei verdichtet. In der Aufschmelzzone, auch Umwandlungszone genannt, wird der feste Kunststoff zur Poly-

merschmelze aufgeschmolzen. Anschließend wird in der Meteringzone, auch Ausstoßzone genannt, die Schmelze homogenisiert und der nötige Druck für das Formwerkzeug aufgebaut. Im letzten Schritt passiert die Schmelze das Werkzeug und erstarrt ausreichend, um weiterverarbeitet werden zu können [10].

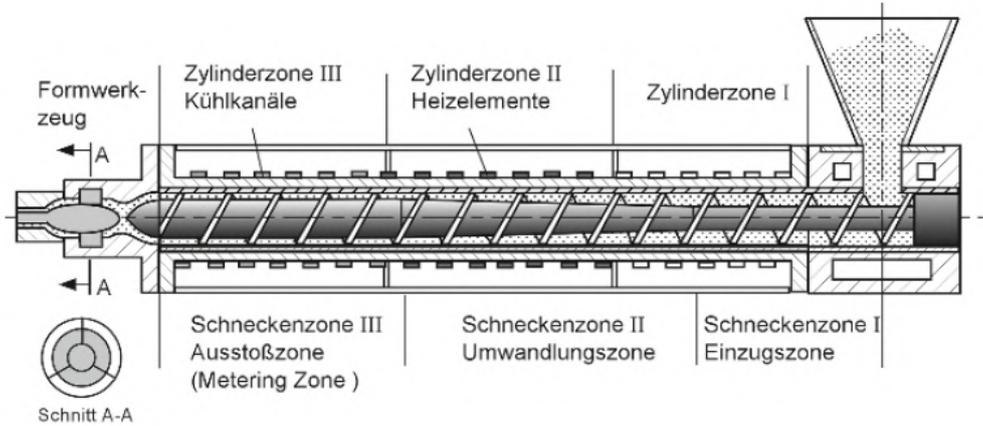


Abbildung 17 Schematischer Aufbau eines Einschneckenextruders [10]

Je nach Art des Kunststoff sind verschiedene Temperatureinstellungen nötig. Während sich die Temperaturzonen unterscheiden, wurde für sämtliche Kunststoffe einen Schneckendurchmesser von 18 mm und eine Drehzahl von $70 \frac{U}{min}$ verwendet. Nach dem Extrusionsprozess wurden die entstandenen Extrusionsstränge in der Schneidmühle ein weiteres Mal zerkleinert, um die nachfolgenden Prozesse wie die Prüfkörperherstellung oder die Messung des MFR zu ermöglichen. In Tabelle 17 sind die Temperatureinstellungen für die unterschiedlichen Zonen des Extruders nach Polymereart ersichtlich.

Tabelle 17 Temperaturprogramm des Extruders nach Material

Material	Temperatur in der Einzugszone (°C)	Temperatur in der Aufschmelzzone (°C)	Temperatur im Werkzeug / Flansch (°C)
PP, HDPE	165	240	200
PS	165	200	200

2.2.3 Waschversuche

Wie bereits im Kapitel 1.3.1 erwähnt, ist der Waschprozess ein bedeutender Teilschritt im mechanischen Recycling. Unerwünschte Komponenten im Recyclingstrom der Kunststoffe wie Druckfarben, Klebstoffe und Papier sollen durch den Waschprozess entfernt werden.

Becher aus Kapitel 2.1.4 wurden mittels Doppelwellen-Schredder "RF-137" (Zmprecyzja Sp.z o.o ,Polen) auf eine Breite von 0,5 - 2 cm und einer Länge von 1-7 cm zerkleinert. Dies wurde einerseits gemacht, um die Materialien besser handzuhaben, andererseits sollte damit auch ein quasi-industrieller Zerkleinerungsprozess durchgeführt werden, siehe Abbildung 18.



(a) Doppelwellen-Schredder



(b) Zerkleinerter PP Post Consumer Becher (NÖM Joghurt)

Abbildung 18 Verwendeter Schredder und geschredderter Joghurtbecher

Im Anschluss werden die zerkleinerten Becher in getrennten Wäschesäcken mit einem definierten Waschprogramm mit Wasser als auch einer 2 m%-ige Natronlauge gewaschen. Das Waschprogramm umfasste einen 10 minütigen Waschgang mittels Agitation bei $120 \frac{U}{min}$ und einer Starttemperatur von $80 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$. Dem folgte ein Ablassen der Waschmediums und ein 2 minütiger Schleudergang bei $360 \frac{U}{min}$. Im Falle der 2 m%-igen Natronlauge wurden nach dem Hauptwaschgang 3 Spülvorgänge mit Wasser unternommen, um die

Ladung von Laugereste zu befreien. Gewaschen wurde in einer Waschmaschine für Laborgebrauch "Vortex M6" (SDL Atlas, LLC, USA). Vor der weiteren Probenvorbereitung für die Untersuchung der rheologischen Eigenschaften wurden die zerkleinerten und gewaschenen Becher getrocknet.

2.2.4 Auslagerungsversuche

Mit Blick auf das Entsorgungssystem, kommt der Kunststoffabfall, bis er in einer Recyclinganlage weiter verarbeitet wird, mit unterschiedlichen Lebensmittelresten in Kontakt.

In dieser Arbeit wurden die 100 %igen PP- und PS-Rezyklate in den Medien Rapsöl und Apfelessig ausgelagert. Der Einfluss der Medien auf die mechanischen Eigenschaften war hier von besonderer Bedeutung. Dies führte zur Entscheidung direkt Zugproben auszulagern. Zur Feststellung, ob Diffusion in die Probenkörper stattfindet, wurden die Probenmassen und deren Massenänderungen in regelmäßigen Abständen während des Versuchs gemessen. Da es sich um geringe Änderungen handelt, wurde eine Feinwaage "LE225D" (Sartorius, Data Weighing Systems, Inc., USA) verwendet. Weiteres wurden die Versuche bei 3 Temperaturzuständen durchgeführt. Dabei wird bei Raumtemperatur, mit einer Schwankungsbreite von 20-25 °C aufgrund der Raumklimatisierung, bei 40 °C und bei 60 °C ausgelagert. Die Temperierung der 40 °C- und 60 °C-Proben wurde in zwei unterschiedlichen Öfen, mit konstanter Temperaturregelung, durchgeführt. Die Versuchsdauer betrug 672 Stunden, was 4 Wochen entspricht.

Wie bereits in Kapitel 2.2.1 erklärt, wurden die Joghurtbecher zunächst zerkleinert und anschließend zu Zugproben spritzgegossen. Die produzierten Proben wurden nun mittels einer Drahtkonstruktion in Bechergläser bzw. Glasflaschen gehängt. Die Herausforderung bestand hier die Proben komplett in das Medium einzutauchen und gleichzeitig so wenig Einfluss von außen miteinzubringen. Weiters wurde die Konstruktion so gewählt, um möglichst leicht einzelne Proben aus den Behältnissen entfernen zu können. Dies ist notwendig, um die regelmäßigen Gewichtsmessungen zu ermöglichen. Zusätzlich erhielt jede Probe ein mit Bleistift beschriftetes Etikett, um eine genaue Zuordnung innerhalb einer Fraktion zu bewerkstelligen. Nach der Versuchsdauer wurden die Proben getrocknet und der Zugversuch durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 19 zu erkennen.



(a) Auslagerungsversuch mit Apfelessig



(b) Auslagerungsversuch mit Rapsöl

Abbildung 19 Versuchsaufbau der Auslagerungsversuche

Die Intervalle zwischen den Probenmassebestimmungen wurden mit zunehmender Versuchsdauer verlängert. Eventuell schneller ablaufende Sättigungsprozesse sollten damit verfolgt werden. Dabei bestand der übliche Ablauf eines Messvorgangs aus den folgenden Schritten:

1. Entnahme der Gefäße aus dem Ofen im Falle der 40 °C und 60 °C Fraktionen.
2. Entnahme jeder einzelnen Proben und anschließender Trocknung mittels Papierhandtücher
3. Lagerung in einem Behältnis bis zur Erreichung einer Messtemperatur im Bereich von 20-25 °C
4. Dokumentation der Messtemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit in Nähe der Waage
5. Gewichtsmessung und anschließende Dokumentation der Messwerte
6. Bestückung der Behälter
7. Gegebenenfalls Nachfüllen des Mediums

8. Lagerung in den Öfen im Falle der 40 °C und 60 °C Fraktionen

Am Ende des Auslagerungszeitraum von knapp einem Monat wurden die Proben getrocknet und der Zugversuch durchgeführt.

2.2.5 Zugversuch

Der Zugversuch ist einer der weitverbreitetsten Methoden und dient der Analyse der Prüfkörper zur Feststellung von charakteristischen mechanischen Eigenschaften unter statisch, bzw. quasistatischen Bedingungen. Es handelt sich um einen zerstörende Werkstoffprüfung, bei der, der die Prüfung mit dem Bruch des Prüfkörper endet und ist nach DIN EN ISO 527 genormt [26, 28]. In dieser Arbeit wurden die Zugversuche mit der Prüfmaschine SZ050"(ZwickRoell GmbH & Co. KG, Deutschland) durchgeführt.

Die zuvor erzeugten Proben, siehe Kapitel 2.2.1, werden bei dem Zugversuch mit einer konstante Traversengeschwindigkeit von $10 \frac{mm}{min}$ belastet, wobei ein einachsiger Spannungszustand im Probenkörper erzeugt wird. Während des Versuchs wird die Längenänderung ΔL und die wirkende Kraft F gemessen. Mithilfe der zuvor gemessenen Ausgangslänge L_0 und dem Ausgangsquerschnitt A_0 ergibt sich die Dehnung ε nach (1) und die Spannung σ nach (2).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

Aus diesen Zusammenhängen lässt sich ein charakteristisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm ermitteln. Es ist jedoch darauf zu achten, dass im Laufe des Versuchs die Probe eine Querschnittsverringering erleidet, eine sogenannte Einschnürung. Aufgrund der messtechnischen Schwierigkeit, zu jedem Zeitpunkt den tatsächlichen Querschnitt zu ermitteln, wird der Ausgangsquerschnitt als Referenz herangezogen. Demnach sind die dadurch ermittelten Spannungen nicht die tatsächlich auftretenden Spannungen im Prüfkörper sondern lediglich die nominell berechneten [28]. Ein schematisches Spannungs-Dehnungsdiagramm ist in Abbildung 20 zu erkennen.

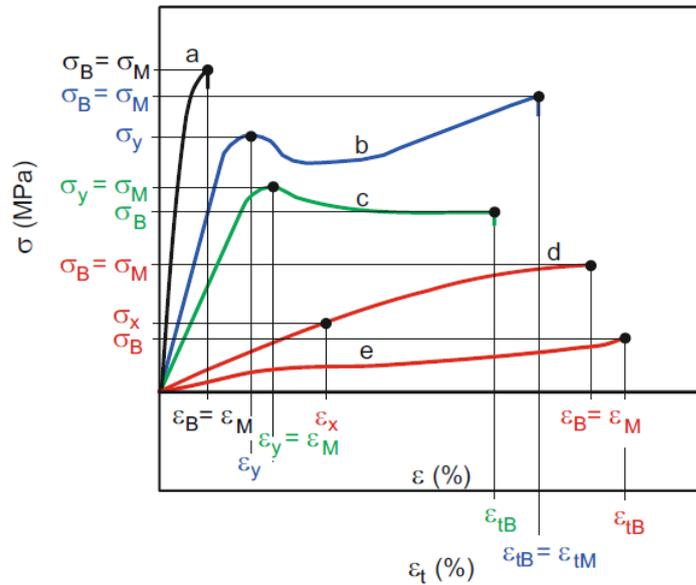


Abbildung 20 Schematisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm für unterschiedliche Kunststoffe; a: Spröde Kunststoffe, b und c: Zähle Werkstoffe mit Streckpunkt, d: Zähle Werkstoffe ohne Streckpunkt und e: Elastomere Werkstoffe [28]

Aus dem schematischen Diagramm lassen sich unterschiedliches Werkstoffverhalten herauslesen. Materialien wie PE und PP weisen tendenziell einen zähen Verlauf auf, während bei PS ein spröder Verlauf zu erwarten ist. Zusätzlich sind in dem Diagramm entscheidende Kennwerte herauszulesen. Hinzu kommt der Elastizitätsmodul E , welcher ein Maß für die Steifigkeit im elastischen Bereich ist. Er ergibt sich über die Proportionalität im linear elastischen Bereich aus dem Hook'schen Gesetz bei uniaxialer Zugbeanspruchung (3). Eine Übersicht der wichtigsten Werte ist in Tabelle 18 ersichtlich [5, 28].

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3)$$

Tabelle 18 Wichtigsten Kennwerte des Zugversuchs [26]

Symbol	Kennwert	Einheit	Erklärung
E	Elastizitätsmodul	$\frac{N}{mm^2}$	Steifigkeit im elastischen Bereich, Steigung der Spannungs-Dehnungskurve
σ_y	Streckspannung	$\frac{N}{mm^2}$	Spannung bei der Streckdehnung
ε_y	Streckdehnung	%	Dehnungswert, bei dem ein die Dehnung wächst ohne Erhöhung der Spannung
σ_M	Zugfestigkeit	$\frac{N}{mm^2}$	Erstes Spannungsmaximum
ε_M	Dehnung bei der Zugfestigkeit	%	Dehnung bei der Zugfestigkeit
ε_B	Bruchdehnung	%	Letzer Dehnungswert bevor die Probe bricht
σ_B	Bruchspannung	$\frac{N}{mm^2}$	Spannung, bei der die Probe bricht
ε_t	nominelle Dehnung	%	Dehnung bezogen auf die ursprüngliche Einspannlänge
σ_x	Dehngrenze	$\frac{N}{mm^2}$	Ersatz für eine nicht vorhandene Streckgrenze bei x% Dehnung
ε_x	Dehnung an der Dehngrenze	%	Dehnung an der Dehngrenze

2.2.6 Schlagzugversuch

Im Gegensatz zum Zugversuch wird hier, die Zugprobe schlagartig auseinandergezogen. Der Schlagzugversuch ist nach der DIN-EN-ISO-8256 genormt. Dabei wird die Schlagzugprobe an einem Ende in ein Querjoch mit definierter Masse und am anderen Ende in die Einspannvorrichtung des Pendelschlagwerks "CEAST 9050" (INSTRON, Illinois Tool Works Inc, USA) gespannt. In dieser Arbeit wurde mit Verfahren A der Norm gearbeitet, bei dem das Querjoch lose auf einer Auflage in der Prüfmaschine liegt. Der Pendelhammer schlägt auf das Querjoch, und zieht so den Prüfkörper bei hoher Geschwindigkeit auseinander. Bei diesem Vorgang wird die verbrauchte Schlagarbeit gemessen. Der Aufbau ist in Abbildung 21 schematisch dargestellt [27].

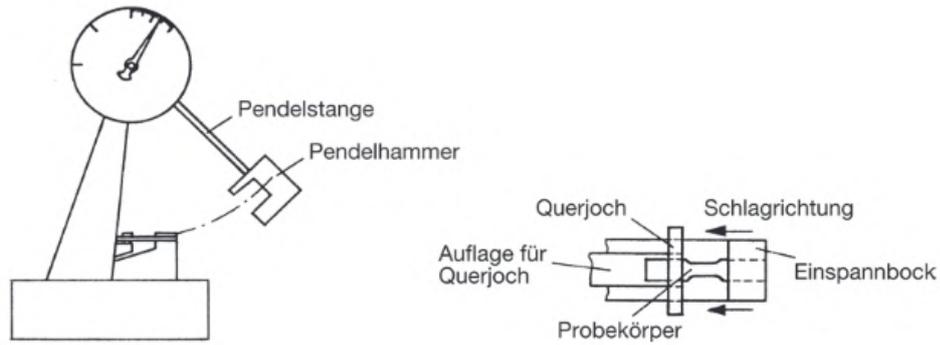


Abbildung 21 Schematischer Aufbau der Apparatur für Schlagzugversuche [12]

Die maßgebende Eigenschaft, die bei diesen Messverfahren ermittelt wird, ist die Kerbschlagzugzähigkeit a_{tN} . Die sich über die Kerbschlagarbeit E und dem Querschnitt der Probe $x \cdot h$ nach (4) ergibt.

$$a_{tN} = \frac{E}{x \cdot h} \cdot 10^3 \quad (4)$$

a_{tN} ... Kerb-Schlagzugzähigkeit ($\frac{kJ}{m^2}$)

E ... Kerbschlagarbeit (J)

x ... Breite an der Kerbe (mm)

h ... Dicke (mm)

Der Schlagzugversuch wurde mit einer Prüfmaschine mit der Bezeichnung INSTRON CEAST 9050 durchgeführt, wobei die Masse des Querjochs 15 g betrug.

2.2.7 Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR)

Die Infrarot-Spektroskopie beruht auf der Anregung molekularer Schwingungszustände durch Infrarot-Strahlung. Die Absorption der IR-Strahlung erfolgt nur dann, wenn sich das Dipolmoment während der Schwingung ändert. Maßgebend ist die sogenannte Wellenzahl $\tilde{\nu}$, sie ist als $\tilde{\nu} = \lambda^{-1}$ definiert, wobei λ die Wellenlänge der Infrarotstrahlung beschreibt. Das verwendete Spektrometer arbeitet im mittleren Infrarotpektrum

(MIR), das bei einer Wellenlänge von 2,5 bis 25 μm bzw. in einem Wellenzahlbereich von 400 bis 4000 cm^{-1} liegt und die Schwingungen der Bindungen im Molekül anregt. Unterschiedliche Wellenzahlen sind bestimmten Schwingungsarten zuzuordnen. Das heißt, die Zusammensetzung eines Moleküls wird durch das Absorptionsspektrum charakterisiert. Die Interpretation der Molekülbestandteile wird durch mögliche Absorptionen unbekannter Substanzen erschwert. Für eine Strukturaufklärung sind weitere Analyseverfahren notwendig. Daraus folgt nun, dass sich ergebenden Absorptionsspektren, mit Hilfe der IR-Spektroskopie, mit Bekannten verglichen werden und somit eingeteilt werden können. Zudem sind gewisse Bindungen charakteristisch in einem Wellenzahlbereich vertreten welche hier Rückschlüsse auf Bestandteile von Molekülen in der Probe geben [10, 28, 29]. Tabelle 19 gibt eine Übersicht der charakteristischen Absorptionsbanden zu den jeweiligen Wellenzahlen.

Bei der IR-Spektroskopie wird aus einer Quelle IR-Strahlung emittiert, an einem Strahlenteiler geteilt und anschließend an einem festen und an einem beweglichen Spiegel reflektiert. Der bewegliche Spiegel erzeugt einen Gangunterschied, der eine steuerbare Interferenz ermöglicht. Die beiden Strahlen werden anschließend überlagert, werden an der Oberfläche reflektiert und an einem Detektor aufgenommen. Nach der Umwandlung in ein elektrisches Signal und der anschließenden Fourier-Transformation ergibt sich ein Absorptionsspektrum der Probe. Die schematische Funktionsweise des FTIR ist in Abbildung 22 ersichtlich [28].

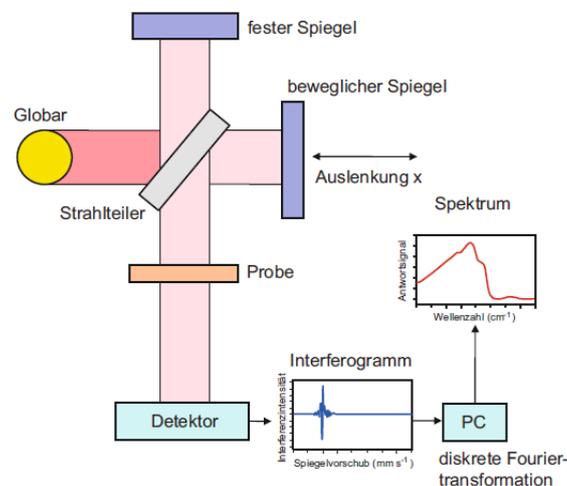


Abbildung 22 Schematischer Aufbau eines FTIR [28]

IR-Absorptionen von Multilagen und Farbstoffen treten überlagert mit dem Signal des

Polymers auf und können nicht ohne weitere Veränderungen des Ausgangsmaterials korrigiert werden. Hier muss ein anderes Analyseverfahren, wie zum Beispiel die Differenzkalorimetrie (DSC), herangezogen werden. Kunststoffblends sind von besonderem Interesse. Hier können gegebenenfalls molekulare Interaktionen durch Mischungen sichtbar gemacht werden. Über charakteristische Peaks für Wasserstoffbrückenbindungen können Grenzflächenwechselwirkungen zwischen Mischungspartnern überprüft werden [30].

In dieser Forschungsarbeit wurde das FTIR-Messgerät Bruker "Tensor 27" (Bruker, USA) und die Software Opus Viewer Version 6.5 verwendet. Dabei wurden die Messungen mit der Messeinheit DuraSampl IR II durch ein Diamant ATR (abgeschwächte Totalreflexion) durchgeführt. Pro Messung wurden 16 Scans über einen Wellenzahlbereich von 4000 bis 600 cm^{-1} , bei einer Auflösung von 4 cm^{-1} aufgenommen. Sämtliche Joghurtbecher wurden an der Innenseite an je drei Stellen gemessen. Bei den Auslagerungsversuchen wurden die Zugproben herangezogen, welche ebenfalls an drei unterschiedlichen Stellen gemessen worden sind. Bei allen anderen Proben wurden die Probenkörper der Scherrheologie herangezogen. Das Referenzmedium war bei sämtlichen Messungen Luft.

Tabelle 19 Übersicht der charakteristischen Absorptionsbande für HDPE, PP und PS [31]

Polymer	Wellenzahl (cm^{-1})	Molekülschwingung
HDPE	2915 (a)	C-H Streckschwingung
	2845 (b)	C-H Streckschwingung
	1472 (c)	CH_2 Biegeschwingung
	1462 (d)	CH_2 Biegeschwingung
	730 (e)	CH_2 Deformationsschwingung
	717 (f)	CH_2 Deformationsschwingung
PP	2950 (a)	C-H Streckschwingung
	2915 (b)	C-H Streckschwingung
	2838 (c)	C-H Streckschwingung
	1455 (d)	CH_2 Biegeschwingung
	1377 (e)	CH_3 Biegeschwingung
	1166 (f)	C-H Biegeschwingung
		CH_3 Deformationsschwingung
	997 (g)	C-C Streckschwingung
		CH_3 Deformationsschwingung
	972 (h)	CH_3 Biegeschwingung
C-H Biegeschwingung		
840 (i)	CH_3 Deformationsschwingung	
	C-C Streckschwingung	
808 (j)	CH_2 Deformationsschwingung	
	C- CH_3 Streckschwingung	
PS	3024 (a)	Aromatische C-H Streckschwingung
	2847 (b)	C-H Streckschwingung
	1601 (c)	Aromatische Ringstreckschwingung
	1492 (d)	Aromatische Ringstreckschwingung
	1451 (e)	CH_2 Streckschwingung
	1027 (f)	Aromatische C-H Biegeschwingung
	694 (g)	Außerplanare Deformationsschwingung der aromatischen CH-Gruppe
	537 (h)	Außerplanare Deformationsschwingung des aromatischen Rings

2.2.8 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)

Die Kalorimetrie wird dazu genutzt, um die Wärmemenge von Stoffen bei physikalischen und chemischen Umwandlungen erkennbar zu machen und somit die Materialien zu analysieren.

Die Probe sowie die Referenz werden in Tiegel, mit 5 mm Durchmesser, mit einem vordefinierten linearen Heizprogramm erwärmt. Aus den zugeführten Wärmemengen Q , sowie den bekannten Massen m lassen sich mit (6) und (5) die Enthalpien H und spezifische Wärmekapazitäten c_p , abhängig von der Temperatur T ermitteln [28].

$$dQ = m \cdot c_p(T)dt \quad (5)$$

$$Q = m \cdot \Delta H = m \int_{T_1}^{T_2} c_p(T)dT \quad (6)$$

Q ... Wärmemenge (J)

m ... Masse (kg)

T ... Temperatur (K)

c_p ... spezifische isobare Wärmekapazität ($\frac{J}{kg \cdot K}$)

H ... Enthalpie ($\frac{J}{kg}$)

Die sich ergebenden Kurven des Wärmestroms über die Temperatur und der Zeit, geben wiederum Aufschluss über charakteristische Temperaturen sowie die Verarbeitung des Werkstoffs. Dabei sind endotherme Vorgänge als Peaks nach oben bzw. als eine Stufe erkennbar und zeigen einen Schmelzvorgang bzw. Glasübergang. Exotherme Vorgänge wie die Kristallisation sind als Peaks nach unten ersichtlich. Die jeweiligen Temperaturen bei den Peaks und Stufen geben Rückschlüsse auf die Art des Kunststoffes.

Grundsätzlich sind zwei unterschiedliche Messmethoden zu unterscheiden:

- Dynamische Leistungs-Differenzkalorimetrie (DLDK)
- Dynamische Wärmestrom-Differenzkalorimetrie (DWDK)

Die DSC ist nach DIN EN ISO 11357 und DIN 51007 definiert [32, 33]. Bei der DLDK wird die Probe und die Referenz in zwei voneinander getrennten Öfen, mit einem vordefinierten linearen Heizleistungsprogramm, temperiert. Kommt es nun aufgrund von Phasenumwandlungen zu einer Temperaturdifferenz zwischen Probe und Referenz, wird diese durch eine Änderung des Wärmestroms zum Probenofen ausgeglichen. Bei der DWDK hingegen, werden Probe und Referenz im selben Ofen mit einem vorgegebenen Temperaturprogramm aufgeheizt bzw. abgekühlt. Bei einer Phasenumwandlung der Probe ändert sich nun die Temperatur nicht, während die Temperatur der Referenz, bei konstantem Wärmestrom, weiter steigt. Aus dieser Temperaturdifferenz lässt sich die Wärmestromänderung berechnen. Der schematische Aufbau ist in 23 zu erkennen [34]

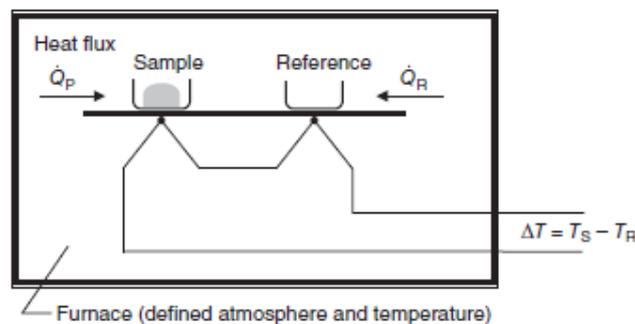


Abbildung 23 Schematischer Aufbau der DSC; T_S ist die Proben­temperatur, T_R die Temperatur der Referenz, \dot{Q}_P der Probe zugeführten Wärmemenge, \dot{Q}_R der Referenz zugeführten Wärmemenge [35]

Nach der Probeneinwaage von ≈ 5 mg mit der Waage "LE225D" (Sartorius, Data Weighing Systems, Inc., USA) wurden die Proben in den Tiegeln, des Typs Standard Pan und Standard Lid aus Aluminium, mit der Probenpresse Tzero Press verschlossen. Es wurde mit der Prüfmaschine "DSC Q2000" (TA Instruments, USA) gearbeitet und die Proben durchliefen zwei Heizvorgänge von jeweils $0 - 300$ °C. Zwischen den beiden Heizvorgängen wurden die Proben von 300 °C auf 0 °C mittels flüssigen Stickstoffs durch das Kühlsystem TA Instruments Liquid Nitrogen Cooling Accessory abgekühlt. Dabei lag die Heiz- bzw. Kühlrate bei den Temperierungsvorgängen bei HDPE- und PP-Proben bei $10 \frac{K}{min}$, bei PS-Proben bei $20 \frac{K}{min}$. Das Referenzmaterial der Messung war Luft und der Tiegel aus Aluminium. Die Auswertung der erhaltenen Daten wurde mit der Software "TRIOS 5.1.1" (TA Instruments, USA) durchgeführt.

Der erste Heizvorgang gibt Informationen über den momentanen Zustand der Probe. Er berücksichtigt morphologische Einflüsse durch die Bearbeitung des Kunststoffes in der Vergangenheit. Durch den zweiten Aufheizvorgang können wiederum die charakteristischen Vorgänge des Kunststoffes ohne Einfluss dessen Verarbeitung erkennbar gemacht werden.

Hier ist noch zu erwähnen, dass bei der Referenz zu beachten ist, dass sie innerhalb des Temperaturbereichs des Heizprogramms keinen Phasenübergang 1. Ordnung aufweist [32].

2.2.9 Thermogravimetrische Analyse (TGA)

Die Thermogravimetrische Analyse (TGA) ist eine thermische Analysemethode, welche in Abhängigkeit von der Temperatur und/oder der Zeit die Massenänderung einer Probe misst. Die auftretenden Massenänderungen Δm basieren im Falle von Polymeren vor allem auf Zersetzungen, Verdampfungen oder chemischen Reaktionen.

Bei der Analyse wird ein Probenkörper auf einer Balkenwaage in einem Ofen bei einem definierten Temperaturprogramm erhitzt und dabei die Massenänderung gemessen. Zusätzlich kann bei Bedarf die Gasatmosphäre im Ofen variabel eingestellt werden. Der Ofenraum lässt mit einem inerten Gas wie Stickstoff füllen, um Oxidationsreaktionen des Materials zu verhindern und lediglich die Zersetzung zu veranschaulichen. Ein schematischer Aufbau ist in Abbildung 24 ersichtlich. Im Falle des rezyklierten Materials können mit den sich ergebenden Kurven quantitative und qualitative Aussagen über die Zusammensetzung getroffen werden [28, 34].

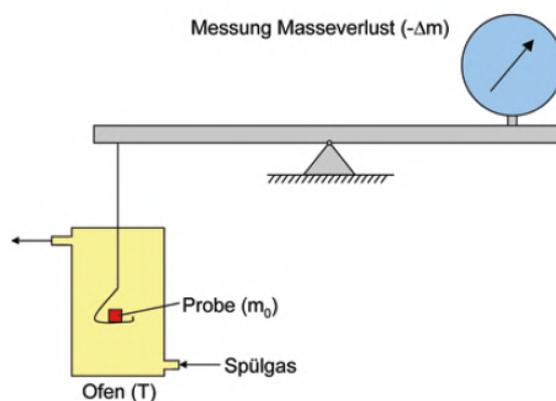


Abbildung 24 Schematischer Aufbau der TGA [29]

In dieser Arbeit wurden die 100 %-igen Rezyklate von PS und PP mit dem Gerät "Q500"(TA Instruments, USA) gemessen. Dabei wurden je zwei Messungen von 0 bis 800 °C bei Stickstoff- und Luft-Atmosphäre durchgeführt.

2.2.10 Schmelze-Massefließrate (MFR)

Bei der Schmelze-Massefließrate MFR (Melt Flow Rate) werden die diversen Kunststofffraktionen auf deren Fließeigenschaften überprüft. Die Bestimmung wird nach der DIN EN ISO 1133 mit einem Kapillarrheometer durchgeführt [36]. Der MFR ist als die Masse einer Kunststoffschmelze, die bei einem definierten Druck, welcher über ein Prüfgewicht erzeugt wird, und bei definierter Temperatur innerhalb von 10 min durch eine definierten Kapillare fließt, charakterisiert und wird in der Einheit $\frac{g}{10min}$ [28] angegeben. Demnach zeigt eine Kunststoffschmelze mit einem hohen MFR Anzeichen für eine geringe Schmelzviskosität. Der schematische Aufbau des Prüfverfahrens ist in Abbildung 25 ersichtlich.

Es wurde mit dem MFR-Messgerät "MeltFlow Basic 3100.000"(Emmeram Karg Industrietechnik, Deutschland) gearbeitet. Je nach zu prüfende Kunststoffart werden unterschiedliche Prüfparameter eingesetzt. Dabei wurde bei PP mit 230 °C und einer Belastungsmasse von 2160 g gearbeitet, während bei PS die Messung bei 200 °C und einer Belastungsmasse von 5000 g durchgeführt wurde. Durchschnittlich wurden 8-10 Stränge eingewogen und zur Berechnung des MFR 6 davon herangezogen.

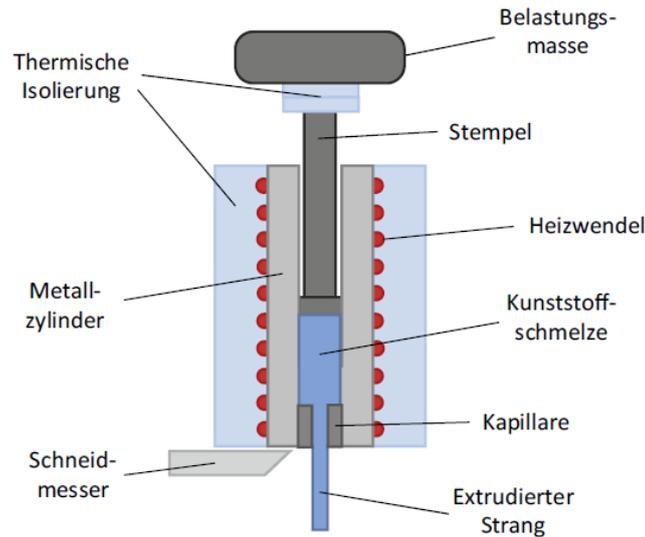


Abbildung 25 Schematischer Aufbau eines MFR-Messgeräts [37]

2.2.11 Scherrheologie

Grundsätzlich beschreibt die Rheologie das Deformations- und Fließverhalten von Stoffen. So sind Polymerschmelzen nicht newtonsche Fluide, bei denen die Viskosität abhängig von der Scherrate ist und verhalten sich demnach viskoelastisch. Viskoelastizität beschreibt das Verformungsverhalten. Dabei kann die Verformung mit einem Feder-Dämpfer-System verglichen werden, bei der sich der Körper bei Belastung zuerst rein elastisch verformt und dann stetig mit der Zeit stärker verformt [37].

Bei der Scherrheologie wird die Probe mit einer Scherbeanspruchung beaufschlagt und dessen rheologisches Verhalten gemessen. Der Zusammenhang zwischen Schubspannung und Schergeschwindigkeit wird dabei ermittelt.

In dieser Arbeit wurde mit einem modularen Kompaktrheometer "MCR 302" (Anton Paar, Österreich) mit Platte-Platte-Geometrie gearbeitet. Hierbei kann die Scherbeanspruchung über eine Rotations- oder Oszillationsbewegung erfolgen. Bei den rHDPE-PP-Blends wird zur Bestimmung einer Viskositätskurve der Rotationsmodus verwendet. Für die verwendeten PP- und PS-Proben wird ein Oszillationsversuch durchgeführt, ein sogenannter Frequenztests (frequency sweep). Bei den Oszillationsversuchen wird im Wesentlichen die Schubspannung über eine vorgegebene Deformation gemessen. Die sich

ergebende Deformationskurven über die Zeit sind dabei sinusförmig [37]. Der schematische Aufbau der Messung ist in Abbildung 26 zu erkennen.

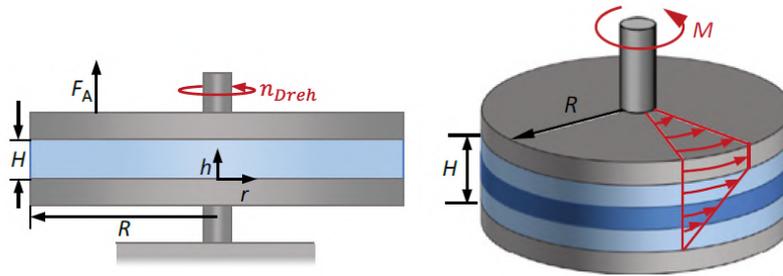


Abbildung 26 Schematischer Aufbau eines Platte-Platte Rheometer [37]

Die Messung liefert den Speichermodul G' und den Verlustmodul G'' in Abhängigkeit der Kreisfrequenz ω . Dabei beschreibt der Speichermodul den elastischen, bzw. gespeicherten, Anteil der Deformationsenergie der Kunststoffschmelze, während der Verlustmodul den viskosen, bzw. dissipierenden, Anteil darstellt. Diese beiden Kennwerte werden bei oszillierender Beanspruchung während des Versuchs bestimmt und dienen der Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens. Zusammen bilden beide den komplexen Schubmodul. Mittels der Cox-Merz Relation (7), lässt sich über den Speicher- und Verlustmodul die sogenannte komplexe Viskosität η^* berechnen. Grundsätzlich beschreibt die Viskosität die Zähigkeit eines Fluids, sprich den inneren Widerstand einer Flüssigkeit gegen eine von außen einwirkender Beanspruchung [28, 37].

$$|\eta^*| = \frac{G^*}{\omega} = \frac{1}{\omega} [G'^2 + G''^2]^{0,5} \quad (7)$$

η^* ... komplexe Viskosität ($Pa \cdot s$)

ω ... Kreisfrequenz (s^{-1})

G^* ... komplexer Schubmodul (Pa)

G'' ... Speichermodul (Pa)

G' ... Verlustmodul (Pa)

Aus der Messung ergeben sich zwei Kurven über die Kreisfrequenz welche, den Speichermodul und Verlustmodul darstellen. Der Schnittpunkt dieser beiden Kurven wird als cross-over-point (COP) bezeichnet. Betrachtet man den COP mit der Hilfe von einem Referenzwert, so lässt sich eine Aussage über die mittlere Molmasse (\overline{M}_w) und die Molmassenverteilung (MMD) des Kunststoffes treffen. So deutet ein höherer Wert der Scherrate, welche proportional zur Kreisfrequenz ist, bei dem COP auf eine niedrigere mittlere Molmasse und somit auf weniger verzweigte Moleküle hin und andersherum. Liegt der COP über dem Referenzwert, besitzt die Probe eine engere Molmassenverteilung als die Referenz. Der gegenteilige Zusammenhang trifft zu, wenn der COP unter dem Referenzwert liegt. Die Übersicht in Abbildung 27 verdeutlicht dieses Verhalten [37].

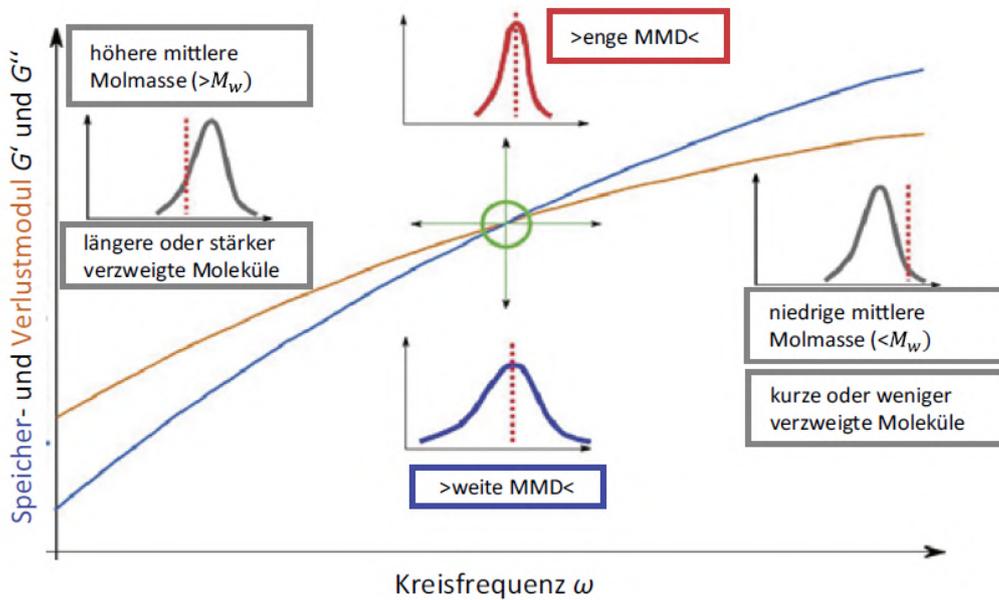


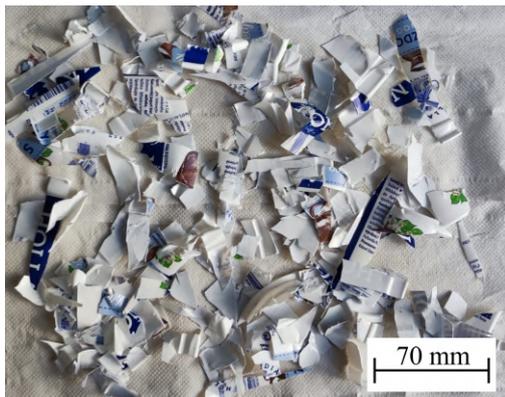
Abbildung 27 Zusammenhang zwischen der Lage des cross-over-point und der Molmasse sowie der der Molmassenverteilung [37]

3 Ergebnisse

3.1 Probencharakterisierung

3.1.1 Waschversuche

Die Waschversuche bei 80 C haben gezeigt, dass die Bedruckung von Joghurtbechern unter der Verwendung einer 2 m%igen Natronlauge zum Großteil entfernt wird. Dabei sieht das Endergebnis sowohl bei PP als auch PS ähnlich aus, siehe Abbildung 28 und 29. Für die geklebten Papieretiketten und Etiketten durch In-Mould-Prozess reichte sogar lediglich ein Waschvorgang mit Wasser aus, um den größten Teil von den Bechern zu trennen, siehe Abbildung 30 und 31.

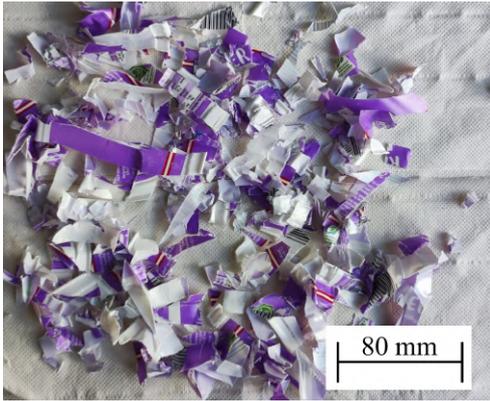


(a) vor der Wäsche

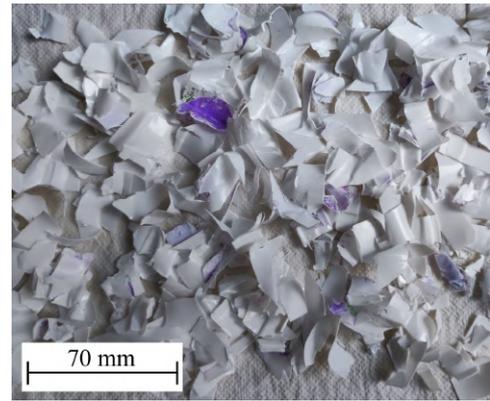


(b) nach der Wäsche mit 2 m% NaOH

Abbildung 28 PP Pre Consumer bedruckt (Selsky Jogurt)



(a) vor der Wäsche



(b) nach der Wäsche mit 2 m% NaOH

Abbildung 29 PS Pre Consumer bedruckt (Sauerrahm)



(a) vor der Wäsche



(b) nach der Wäsche mit Wasser

Abbildung 30 PP Post Consumer (Zott Sahne Joghurt)



(a) vor der Wäsche



(b) nach der Wäsche mit Wasser

Abbildung 31 PS Post Consumer (Obstgarten)

3.1.2 Auslagerungsversuche

Die im ersten Schritt durchgeführten Gewichtsmessungen der Zugproben während des Auslagerungsversuche sind in den folgenden Graphen ersichtlich. Aufgetragen ist die Massenänderung pro vergangenen Tag im Auslagerungsmedium. Zu beachten ist, dass die Änderungen in absoluten Zahlen aufgetragen sind. Eine Massenänderung von 1 mg bei rPP entspricht einer relativen Änderung der Masse von 0,083 % bei rPS 0,074 %. Im Vergleich, die Masse einer durchschnittliche rPP-Zugproben liegt bei 1202 mg bei einer rPS-Zugprobe bei 1345 mg. Abbildung 32 und 33 zeigen die Änderung bei 100 % rPP durch Essig und Öl bei den drei Temperaturbereichen. Für die Proben in Essig wurden Werte bis zu dem 4.Tag aufgezeichnet, da es zu verstärkten Verdunstungsprozessen kam und damit die Vergleichbarkeit einschränkte. Im Kapitel 4.1 wird dies näher ausgeführt. Es zeigt sich, dass mit Essig als Medium eine Gewichtszunahme in allen Temperaturbereichen erkennbar ist. Die Massenänderung fällt dabei deutlich größer bei höherer Temperatur aus.

Mit Blick auf die Öl-Fraktion ist eine Gewichtszunahme bei 60 °C zu erkennen. Bei 40 °C und Raumtemperatur zeigt sich zunächst eine Gewichtszunahme, die nach rund 11 Tagen jedoch wird abnimmt. Die Werte pendeln sich bei einer positiven Massenänderung von 2 mg ein. Im Allgemeinen lag die Standardabweichung bei der Öl-Fraktion höher als bei der Essig-Fraktion.

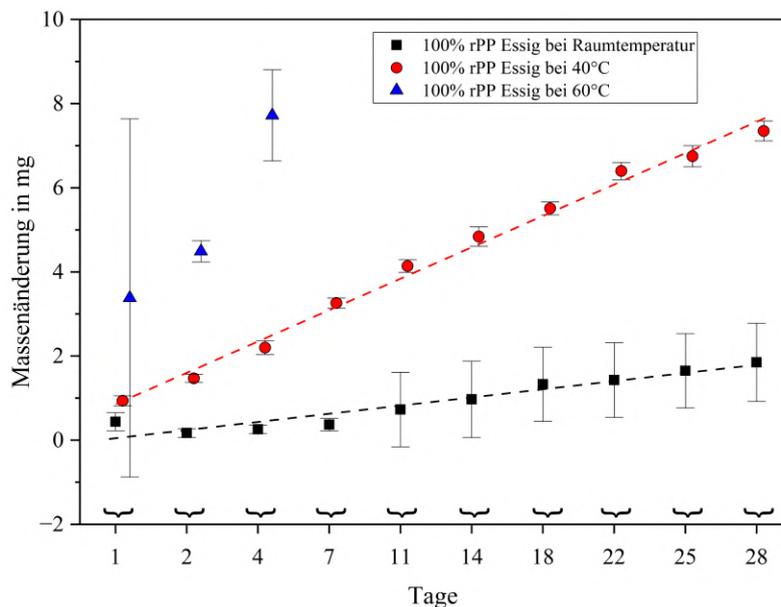


Abbildung 32 Massenänderung von 100 % rPP durch Auslagerung in Essig

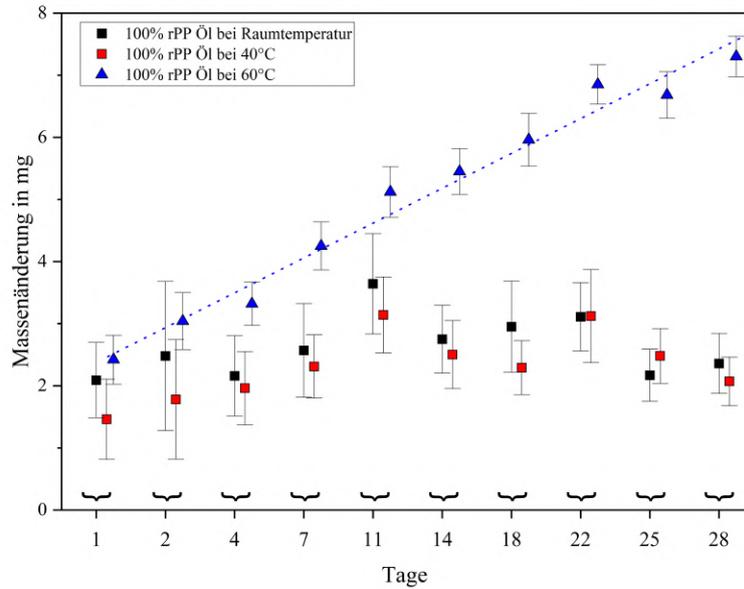


Abbildung 33 Massenänderung von 100 % rPP durch Auslagerung in Öl

Bei 100 %igen rPS ist, wie auch schon bei PP, eine Gewichtszunahme mit Essig erkennbar. Auch eine Temperaturabhängigkeit ist erkennbar. Auffällig ist das bei Raumtemperatur (RT) die Massenänderung zunächst ein Plateau erreicht und anschließend wieder zunimmt. Im Falle der Auslagerung in Öl variieren die Ergebnisse bei Raumtemperatur stark, hierbei ist eine Aussage über die Massenänderung schwer. Bei erhöhten Temperaturen zeigt sich am Anfang der Messzeit eine Zunahme des Gewichts während im folgenden eine Reduktion erkennbar ist und es sogar zu einem Massenverlust kommt, siehe Abbildung 34 und 35.

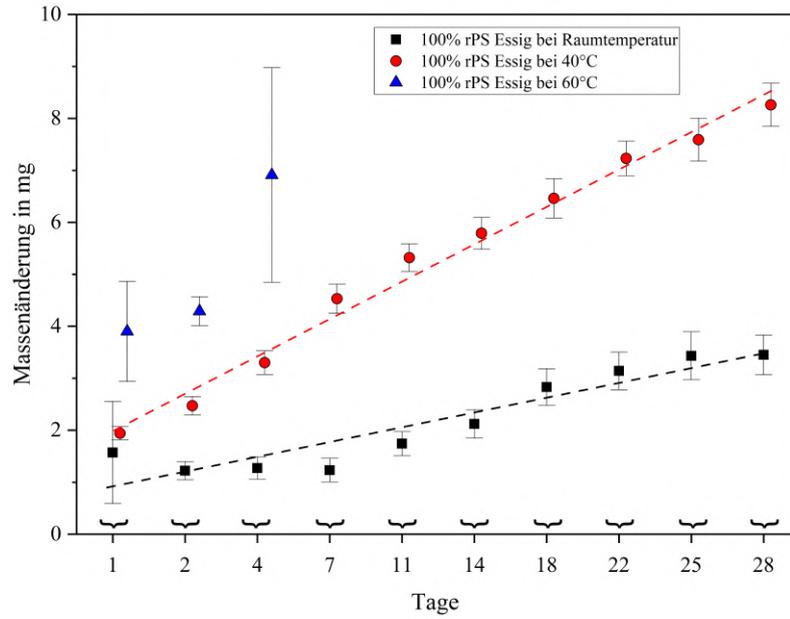


Abbildung 34 Massenänderung von 100 % rPS durch Auslagerung in Essig

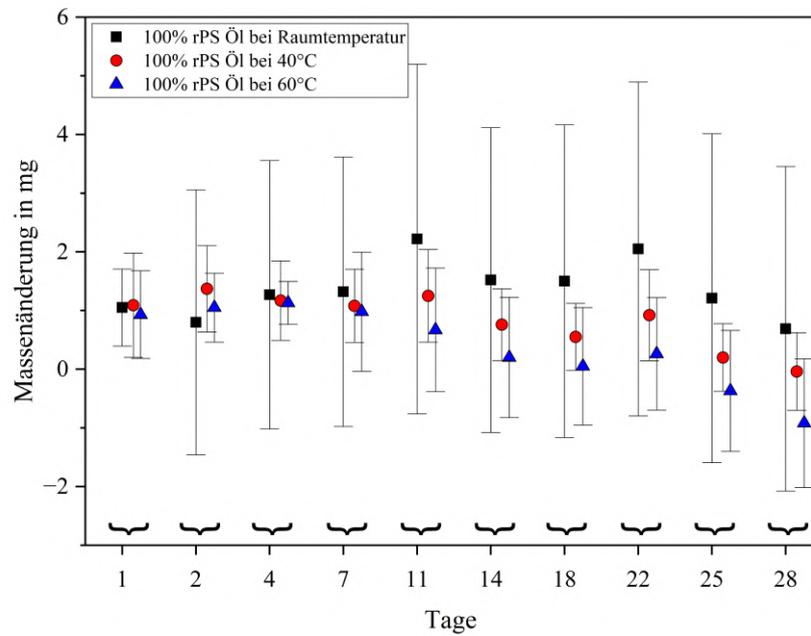


Abbildung 35 Massenänderung von 100 % rPS durch Auslagerung in Öl

3.2 Ergebnisse der FTIR Spektroskopie

Bei den folgenden Graphen der FTIR-Spektren werden die charakteristischen Peaks in Anlehnung an Tabelle 19 aus Kapitel 2.2.7 gekennzeichnet. Außerordentliche Peaks werden markiert und mit der zugehörigen Wellenzahl beschriftet.

3.2.1 Vorversuche zu den HDPE-PP Blends

Die Peaks der FTIR-Spektroskopie für die HDPE- und PP-Fractionen mit Verunreinigung weisen die, aus der Literatur bekannten, typische Spektren auf [38]. Anzeichen von PP-Verunreinigungen in den HDPE-Gebinden oder HDPE-Verunreinigungen in den PP-Gebinden konnten nicht ausgemacht werden, siehe Abbildung 36 und 37.

Auffällig ist für beide Spektren der Peak in der Region von $1650 \frac{1}{cm}$, welcher in Literaturquellen für HDPE oder PP nicht vorkommt [39]. Der Peak ist üblicherweise repräsentativ für C=C Biegeschwingungen, welche im Falle von oxidativer oder UV-Degradation in konjugierter Form mit Carbonylgruppen oder mit sich selbst vorkommen können [40]. Zudem ist ein breiter Peak bei $3400 \frac{1}{cm}$ erkennbar, welcher für die Hydroxygruppen charakteristisch ist und ebenfalls ein Zeichen von Degradation ist [40].

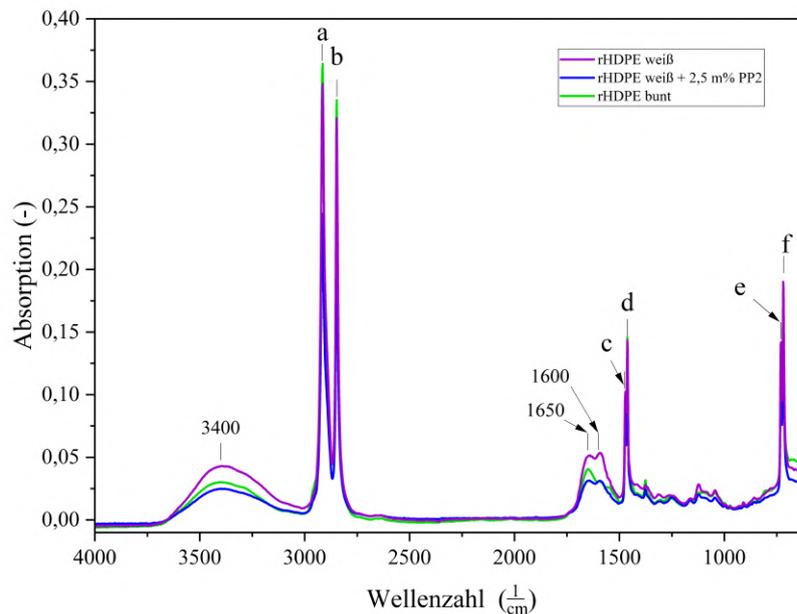


Abbildung 36 FTIR-Spektren der rHDPE-Gebinde mit PP Verunreinigung

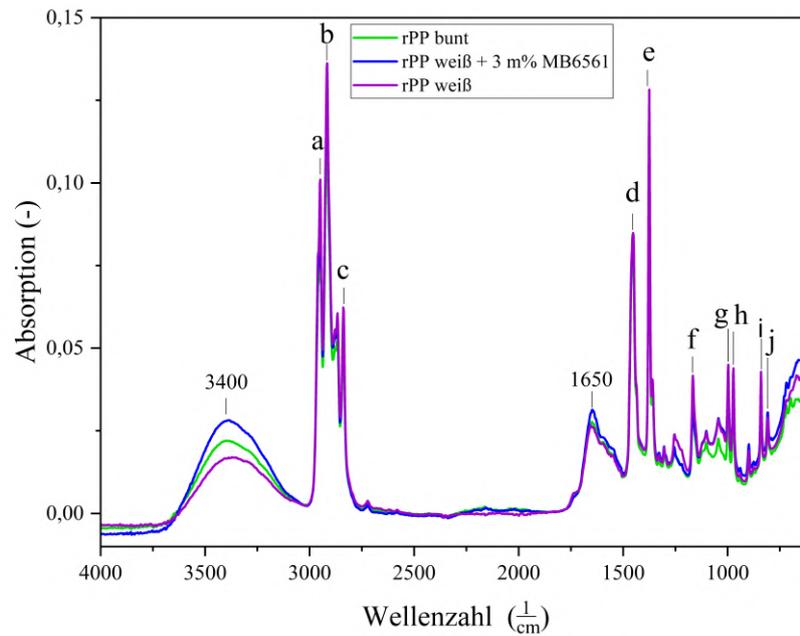


Abbildung 37 FTIR-Spektren der rPP-Gebinde mit HDPE Verunreinigung

3.2.2 Rezyklierte Joghurtbecher aus PP und PS

Die FTIR-Spektren der PP-Joghurtbecher weisen durchweg ein ähnliches Bild auf. Wie bereits im Kapitel 3.2.1 erwähnt sind auch hier wieder Peaks bei 1650 $\frac{1}{\text{cm}}$, 1650 $\frac{1}{\text{cm}}$ und 3400 $\frac{1}{\text{cm}}$ erkennbar.

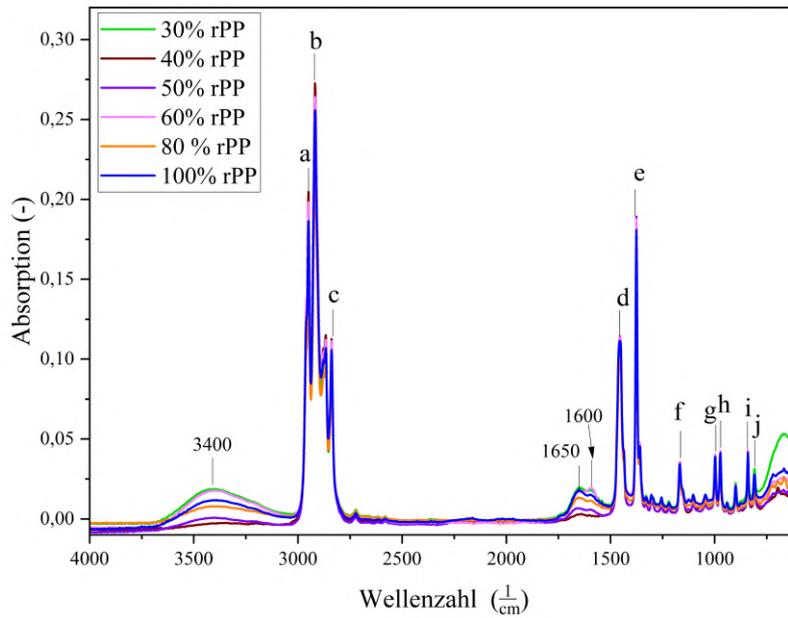


Abbildung 38 FTIR-Spektren der PP-Joghurtbecher

Bei den PS-Joghurtbecher ist es ebenfalls ein Peak bei etwa $3400 \frac{1}{cm}$ erkennbar. Dieser ist wieder Hydroxygruppen zuzuschreiben. Daneben sind keine deutlichen Unterschiede zwischen den virginen und dem rezyklierten Material zu erkennen. Ebenfalls sind keine Änderungen durch den Masterbatch ausmachbar.

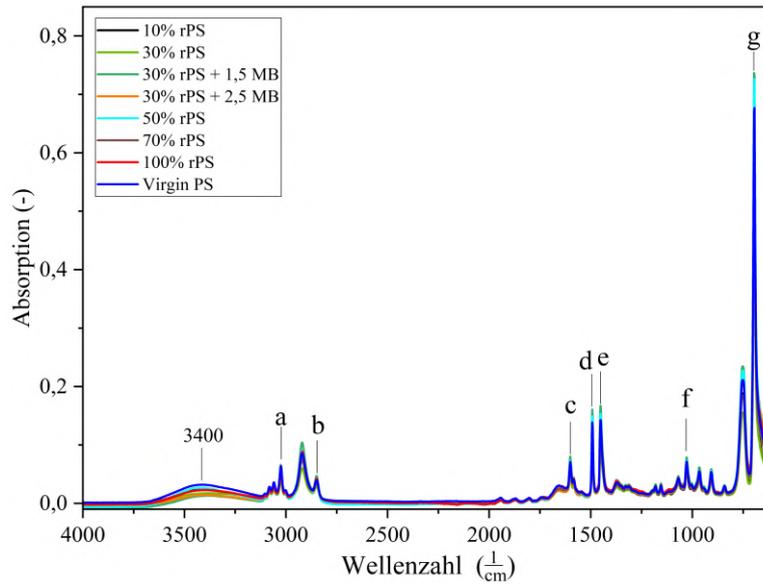


Abbildung 39 FTIR-Spektren der PS-Joghurtbecher

3.2.3 Mehrfachextrusion von 100 % rPP und rPS

Im Vergleich zu der 0-fach extrudierten Probe sind für Mehrfachextrusion keine zusätzlichen Peaks in den IR-Spektren erkennbar. Lediglich die Stärke der Peaks variiert. Mit Vergleich zu den 100 % rPP-Joghurtbechern aus Abbildung 38 zeigt sich, dass die Peaks bei $1650 \frac{1}{cm}$ und bei $3400 \frac{1}{cm}$ stärker ausgeprägt sind. Zudem lässt sich bei $600 \frac{1}{cm}$ ein Peak abzeichnen, der aufgrund der Messgrenzen nicht klar definiert werden kann, siehe Abbildung 40.

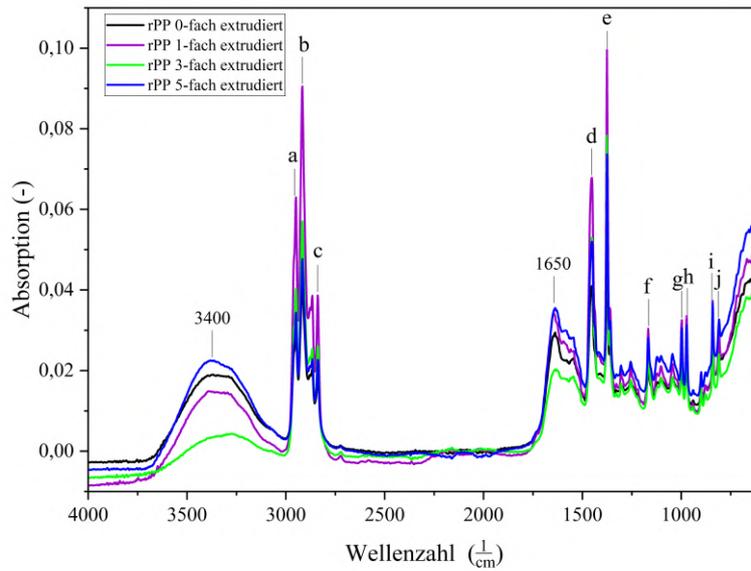


Abbildung 40 FTIR-Spektren der 100 % rPP Joghurtbechern nach Mehrfachextrusion

Wie bereits bei der Mehrfachextrusion von PP lässt sich kein zusätzlicher Peak bei den rPS-Proben erkennen. Der Peak bei $1650 \frac{1}{cm}$ ist bei mehrfacher Extrusion jedoch stärker ausgeprägt, siehe Abbildung 41.

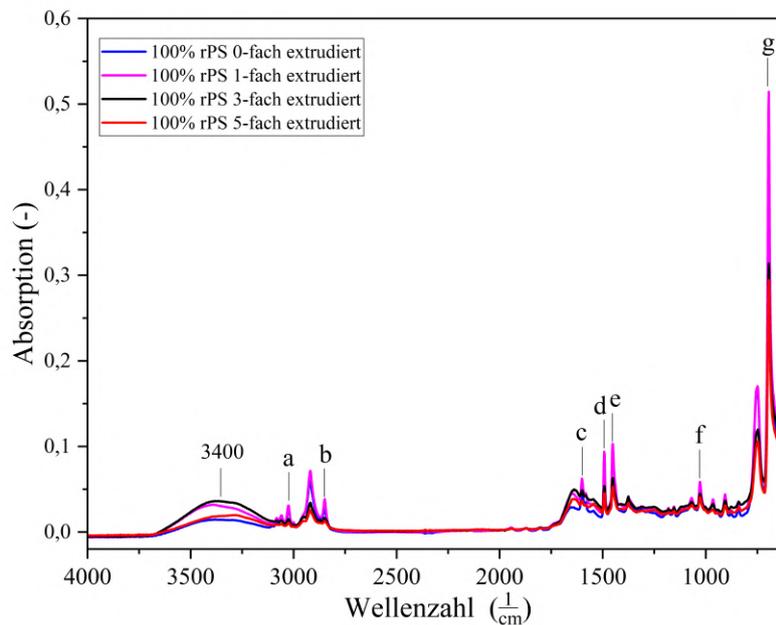


Abbildung 41 FTIR-Spektren der 100 % rPS Joghurtbechern nach Mehrfachextrusion

3.2.4 Waschversuche

Die IR-Spektroskopie zeigte keine neuen Peaks durch die Waschgänge, lediglich eine Variation der Intensität der Vorhandenen. Auffällig war hier, dass in einer Rheologieprobe der PP Post Consumer Joghurtbecher (NÖM Joghurt) ein charakteristischer Peak für PS zu finden war. Dieser deutet auf Verunreinigungen hin, welche möglicherweise während des Schreddervorgangs entstanden ist, siehe Abbildung 42.

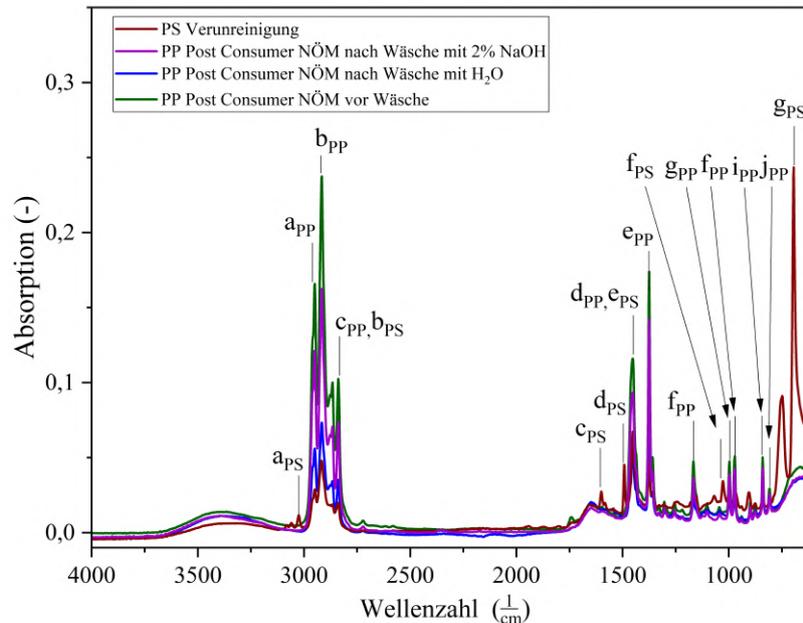


Abbildung 42 FTIR-Spektren der PP Post Consumer Joghurtbecher (NÖM Joghurt)

3.2.5 Auslagerungsversuche

Die Proben wurden nach dem Zugversuch noch mittels IR-Spektroskopie untersucht. Die charakteristischen Peaks der PP und der PS-Spektrum sind deutlich vorhanden. Daneben sind wie bereits in untersuchten Spektren zuvor Peaks, bei einer Wellenzahl von $1650 \frac{1}{\text{cm}}$ und $3400 \frac{1}{\text{cm}}$ zu erkennen, siehe auch Kapitel 3.2.1. Darüber hinaus ist ein deutlicher Peak $1745 \frac{1}{\text{cm}}$ bei den Proben für die Auslagerung in Öl wahrnehmbar. Dieser Peak kann C=O Streckschwingungen zugeordnet werden, welche charakteristisch für Ester und in IR-Spektren von Rapsöl auffindbar sind [41]. Da dieser Peak auch leicht bei der Auslagerung von PP in Essig erkennbar ist, kann dieser auch auf Degradation

durch den Recyclingprozess hindeuten [42]. Das selbige gilt für den Peak bei ungefähr $1150 \frac{1}{cm}$, welche deutlich stärker bei den in Öl ausgelagerten PP-Proben ausgeprägt ist, siehe Abbildungen 43 bis 46.

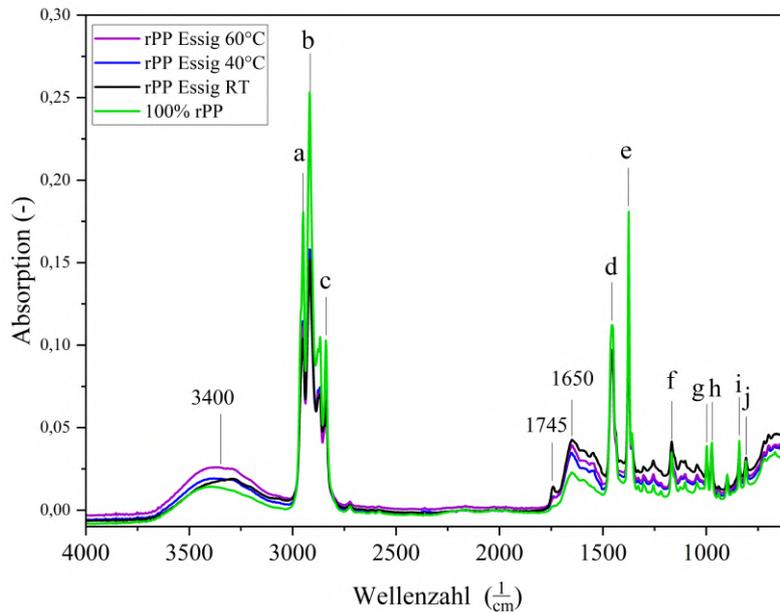


Abbildung 43 FTIR-Spektren des 100 % PP-Rezyklat nach Auslagerung in Essig

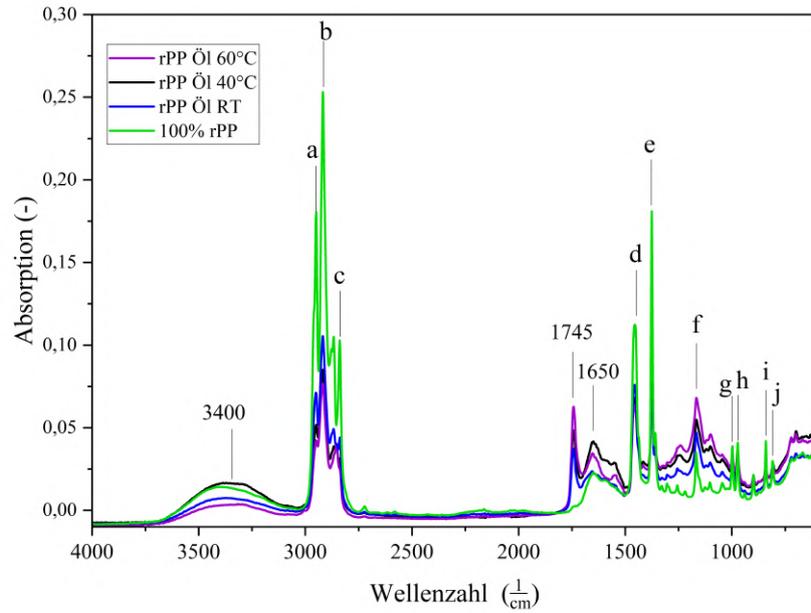


Abbildung 44 FTIR-Spektren des 100 % PP-Rezyklat nach Auslagerung in Öl

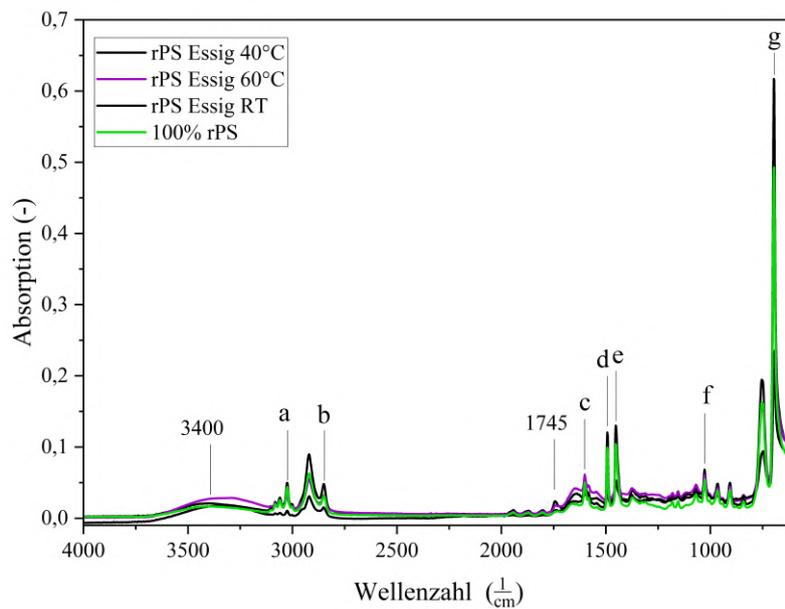


Abbildung 45 FTIR-Spektren des 100 % PS-Rezyklat nach Auslagerung in Essig

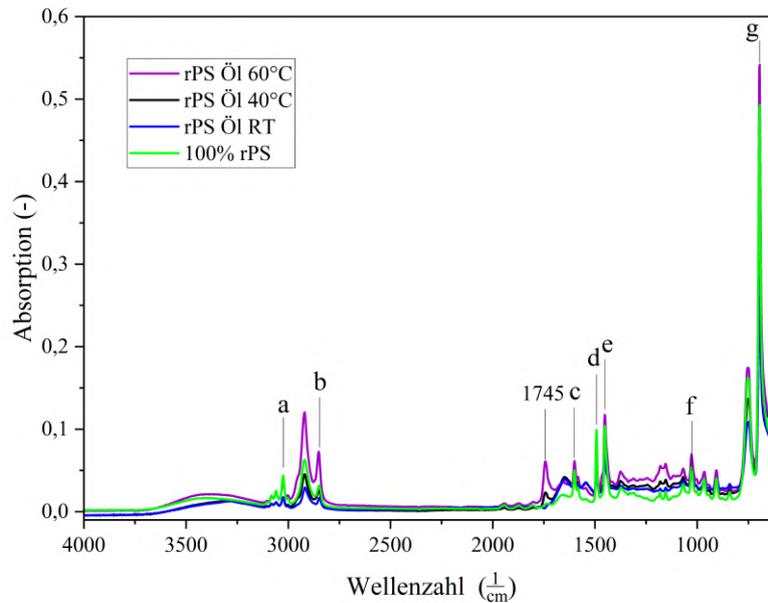


Abbildung 46 FTIR-Spektren des 100 % PS-Rezyklat nach Auslagerung in Öl

3.3 Ergebnisse der thermischen Untersuchung

3.3.1 Vorversuche zu den HDPE-PP Blends

Die Thermische Analyse von rHDPE ergab klar erkennbare Schmelzbereiche des HDPE bei ≈ 132 °C. In der weißen rHDPE-Fraktion mit PP2-Anteil sowie in der bunten rHDPE-Fraktion ist außerdem bei etwa 163 °C eine Wärmetönung sichtbar, die auf PP zurückgeführt werden kann, siehe Abbildung 82. Für die rezyklierte PP Fraktion sind neben den charakteristischen Schmelzbereich für PP bei ≈ 163 °C zusätzlich die Wärmetönungen der HDPE-Verunreinigung im bunten rPP und in dem weißen PP-Rezyklat mit MB6561-Verunreinigung bei einer Temperatur von ≈ 124 °C zu erkennen. Andere Auffälligkeiten sind nicht ausmachbar, siehe Abbildung 85.

3.3.2 Rezyklierte Joghurtbecher aus PP und PS

In der thermischen Untersuchung wurden die 100 %igen PS und PP Joghurtbecher untersucht. Die DSC-Kurve der 100 %igen rPP-Fraktion zeigt den Schmelzpunkt bei 163

°C und die Kristallisationstemperatur bei 128,05 °C. Darüber hinaus ist bei der Abkühlkurve ein kleiner Peak bei 118°C zu erkennen. Dieser ist in der Aufheizkurve nicht mehr auffindbar, oder wird von dem Schmelzbereich des PP überdeckt. Dies kann auf eine Verunreinigung durch PE hindeuten, siehe Abbildung 86.

Die TGA-Kurve zeigt sowohl bei Messungen in Luft als auch in Stickstoff keine Auffälligkeiten. Der 50 %ige Massenverlust wird in Luft bei einer Temperatur von 350 °C erreicht, in Stickstoff liegt diese bei 460 °C. Bei einer Temperatur von 435 °C in Luft und 490 °C in Stickstoffatmosphäre tritt kein weiterer Massenverlust auf, siehe Abbildung 87.

PS hat als amorpher Kunststoff im Allgemeinen lediglich einen Glasübergang. In der Aufheizkurve der DSC ist dieser bei 96 °C erkennbar. Daneben ist zusätzlich ein Schmelzbereich bei 124 °C auszumachen. Dies deutet auf eine Kontamination des Werkstoffs hin, welche möglicherweise durch PE hervorgerufen wird. In der Abkühlkurve sind zudem drei weitere Peaks unter 50 °C erkennbar, siehe Abbildung 88.

Im Falle der TGA-Kurve für PS, ist im Medium Luft bei 425 °C eine Stufe zu erkennen bei der sich die Steigung der Kurve ändert. Dies ist in der inerten Stickstoff-Atmosphäre nicht zu erkennen. Dementsprechend sind Oxidationsvorgänge wahrscheinlich. Der 50 %ige Massenverlust wird in Luft bei einer Temperatur von 405 °C erreicht, in Stickstoff liegt diese bei 430 °C. Bei einer Temperatur von 510 °C in Luft und 50 °C in Stickstoffatmosphäre tritt kein weiterer Massenverlust auf, siehe Abbildung 89.

3.4 Ergebnisse der rheologischen Untersuchung

3.4.1 Vorversuche zu den HDPE-PP Blends

Die Viskositätskurve der HDPE-Gebinde zeigt, dass die HDPE-Gebinde mit einer PP-Kontamination eine höhere Viskosität aufweisen. Zwischen dem weißen HDPE-Rezyklat mit PP2-Kontamination und dem bunten HDPE-Rezyklat sind nur geringe Unterschiede erkennbar. Zusätzlich ist zu beachten, dass im Falle der HDPE-Proben die Scherbeanspruchung nicht oszillierend, sondern kontinuierlich auf die Probe eingewirkt hat und dementsprechend auf den Achsen die Viskosität und die Scherrate aufgetragen ist, siehe Abbildung 47.

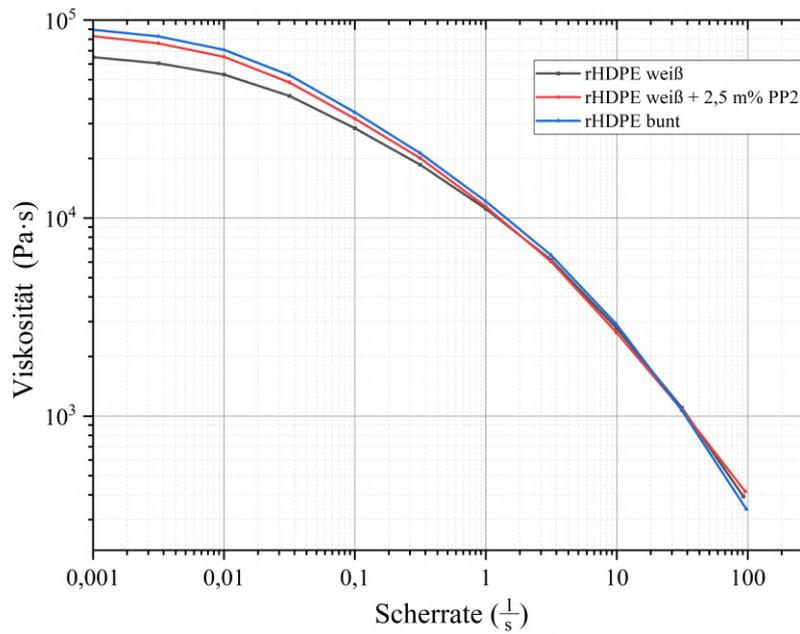


Abbildung 47 Viskositätskurven der rHDPE-Gebinde mit PP-Verunreinigungen

Das bunte PP-Rezyklat weist die höchste Viskosität auf. Bei dem weißen PP-Rezyklat mit und ohne Verunreinigung liegen die Viskositäten nah beieinander. Bei Kreisfrequenzen ab $10 \frac{rad}{s}$ besitzt die reine Fraktion höhere Viskositäten als die Verunreinigte, siehe Abbildung 48a.

Die Schnittpunkte der Speicher- und Verlustmoduln sind in Abbildung 48b dargestellt und in Tabelle 20 aufgelistet. Das bunte PP-Rezyklat ist dabei weiter links im Diagramm als die weißen PP-Rezyklate mit und ohne Kontamination aufzufinden. Dies ist ein Zeichen für höhere mittlere Molmassen und spiegelt sich auch in den Werten für die Schlagzugzähigkeit wider, welche sich mit zunehmender Kettenlänge erhöht, [37].

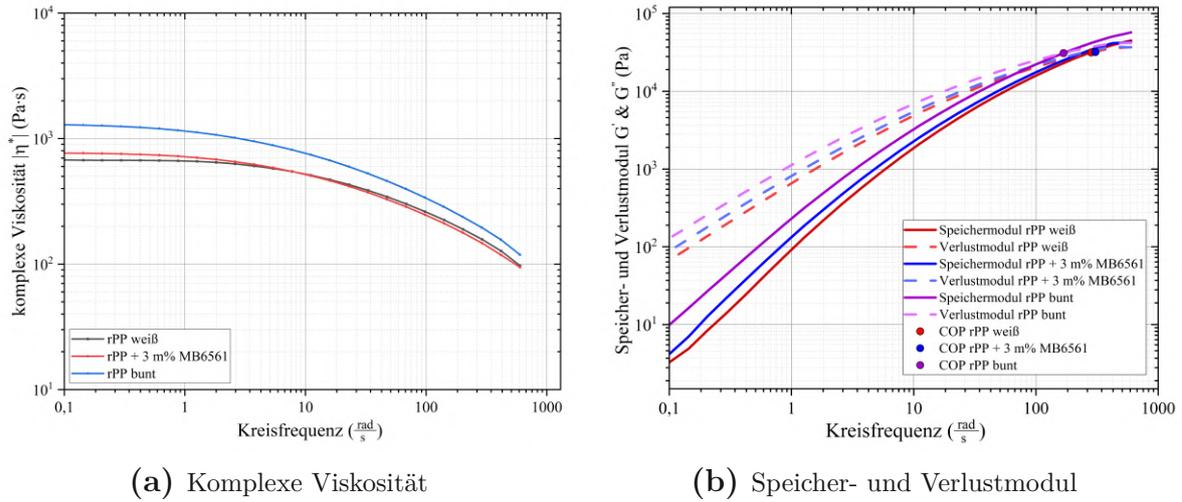


Abbildung 48 Frequenztests der rPP-Gebinde mit HDPE-Verunreinigung

Tabelle 20 Cross-Over Punkte der rPP-Gebinde mit HDPE-Kontamination

Typ	rPP weiß	rPP weiß + 3 m% MB6561	rPP bunt
$G_{COP}(Pa)$	31621	31973	31019
$\omega_{COP}(\frac{rad}{s})$	283,0	307,0	168,3

3.4.2 Rezyklierte Joghurtbecher aus PP und PS

Abbildung 49a zeigt die Viskositätskurven von den rezyklierten PP-Joghurtbechern. Es ist einen Trend in Richtung niedrigerer Viskosität bei steigenden Rezyklinganteil erkennbar. Bereits bei den MFR-Werten konnte diese Tendenz erkannt werden, siehe Tabelle 7.

Die Kurven der Speicher- und Verlustmoduln der PP-Joghurtbecher sind in Abbildung 49 erkennbar. Der Anschaulichkeit halber wurde lediglich der Verlustmodul der 100 % rPP Fraktion dargestellt. Die Cross-over Punkte (COP) sind für alle dargestellt und in Tabelle 21 aufgelistet. Mit steigenden Rezyklatanteile wandert der Schnittpunkt zu höheren Kreisfrequenzen nach rechts im Diagramm. Wie bereits oben erwähnt, beschreibt das ein eine Reduzierung der Molmasse [37].

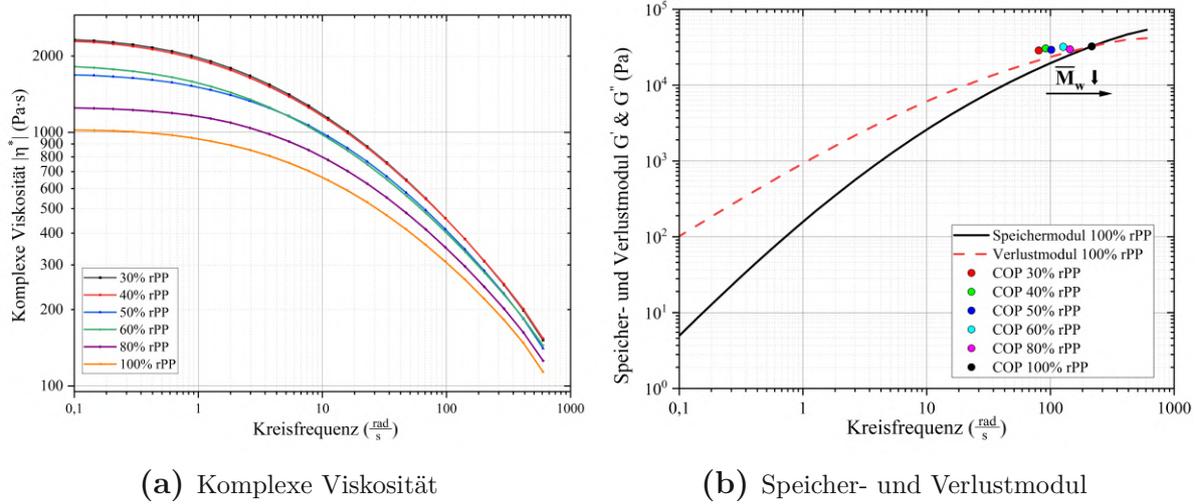


Abbildung 49 Frequenztests der rPP-Joghurtbecher

Tabelle 21 Cross-Over Punkte der rezyklierten PP-Joghurtbecher

Rezyklatanteil (%)	30	40	50	60	80	100
G_{COP} (Pa)	28727	30545	29269	32022	29735	32478
ω_{COP} ($\frac{rad}{s}$)	81	92	102	127	144	216

Für die PS-Joghurtbecher zeigt sich wie auch bei den PP-Joghurtbechern, dass die Viskosität mit steigendem Rezyklatanteil sinkt. Eine Ausnahme ist die 10 % rPS-Fraktion und 30 % rPS-Fraktion mit 1,5 m% Masterbatch. Diese weisen sogar höhere Viskositäten als die virgine Referenz auf, siehe 50a.

Mit Blick auf die Schnittpunkte der Speicher- und Verlustmoduln in Abbildung 50b lässt sich eine Verschiebung zu höheren Werten für Kreisfrequenz und Speicher- bzw. Verlustmodul, mit steigendem Rezyklatanteil erkennen. Dadurch lässt sich erkennen, dass im Vergleich zur virginen Referenz bis auf das 10 %ige PS-Rezyklat, die Molmasse mit höheren Rezyklatanteil sinkt. Zudem sind die höheren Werte für Speicher- und Verlustmodul für die Rezyklate ein Zeichen für eine engere Molmassenverteilung [37]. In Tabelle 22 sind die exakten Werte zu erkennen.

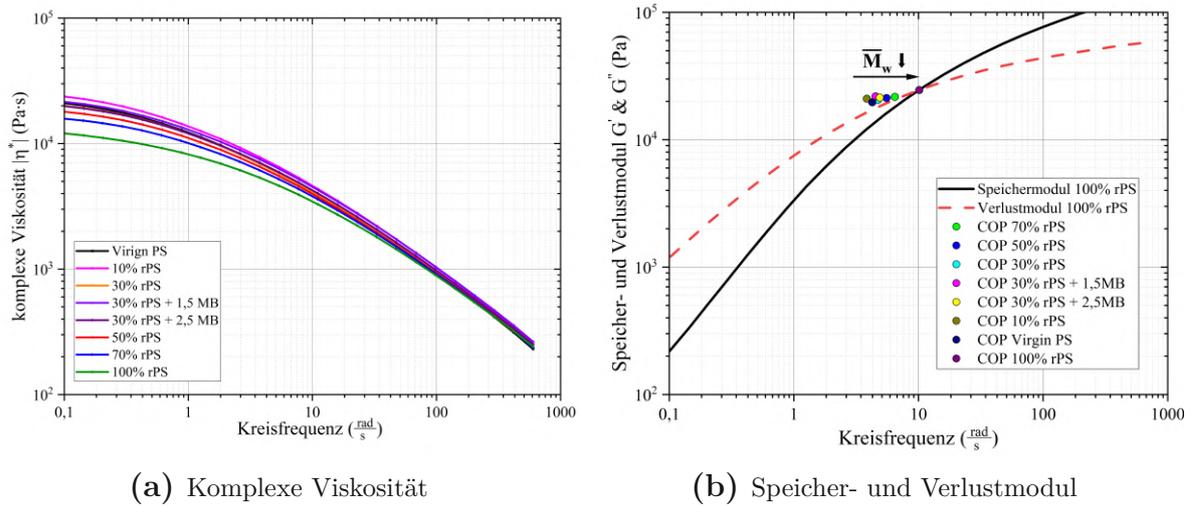


Abbildung 50 Frequenztests der rPS-Joghurtbecher

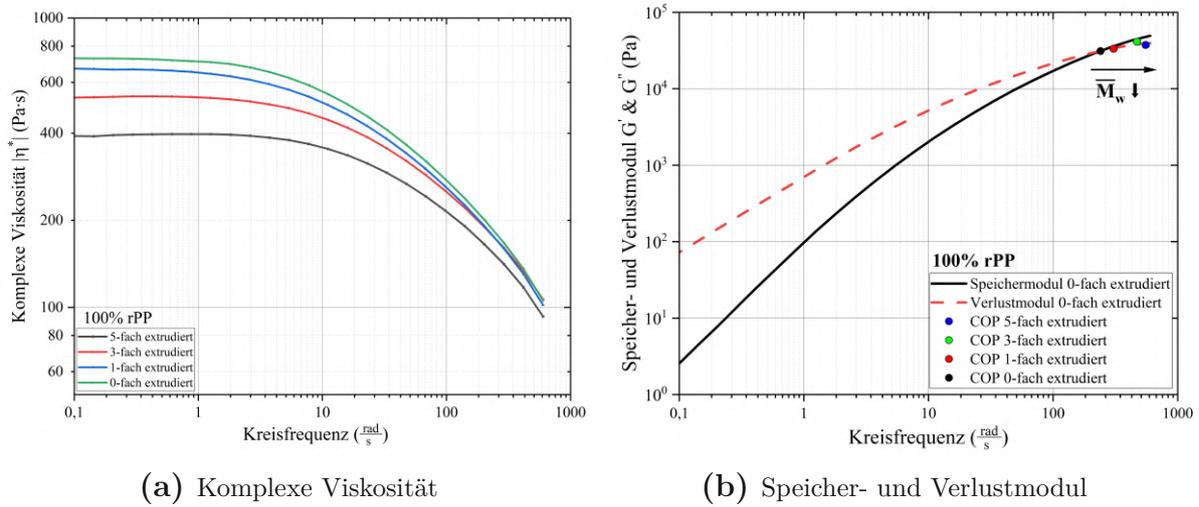
Tabelle 22 Cross-Over Punkte der rezyklierten PS-Joghurtbecher

Rezyklatanteil	%	0 ^a	10	30	30 + 1,5 MB	30 + 2,5 MB	50	70	100
G_{COP}	(Pa)	19657	20980	20558	21924	21407	21257	21716	24558
ω_{COP}	($\frac{rad}{s}$)	4,3	3,9	4,7	4,5	4,9	5,6	6,5	10,1

^a entspricht virginen Material

3.4.3 Mehrfachextrusion von 100 % rPP und rPS

Die rheologischen Ergebnisse für die mehrfach extrudierten rPP-Joghurtbecher lassen erkennen, dass mit Erhöhung der Extrusionszyklen die Viskosität abnimmt. Im Falle der Kurven für den Speicher- und Verlustmodul wandert der COP mit steigender Anzahl an Extrusionen im Diagramm auf die rechte obere Seite, hin zu höheren Kreisfrequenzen und höheren Moduln was für eine geringere Molmasse und engere Molmassenverteilung spricht, siehe Abbildung 51. Die genauen Werte der COPs sind in Tabelle 23 aufgelistet.



(a) Komplexe Viskosität

(b) Speicher- und Verlustmodul

Abbildung 51 Frequenztests der rPP-Proben (100 % Rezyklat) nach Mehrfachextrusion**Tabelle 23** Cross-Over Punkte der 100 % rPP-Joghurtbecher nach Mehrfachextrusion

Anzahl an Extrusionen		0-fach	1-fach	3-fach	5-fach
G_{COP}	(Pa)	31170	33386	41252	37494
ω_{COP}	($\frac{rad}{s}$)	240	305	470	553

Auch im Falle der Mehrfachextrusion der rPS-Joghurtbecher ist eine Verringerung der Viskosität mit der Anzahl der Extrusionen beobachtbar. Im Bezug auf die Schnittpunkte der Speicher- und Verlustmodulkurven ist eine minimale Wanderung des COP zu höheren Kreisfrequenzen beobachtbar, siehe Abbildung 52. Die Schnittpunkte und deren zugehörigen Kreisfrequenzen sind in Tabelle 24 aufgelistet.

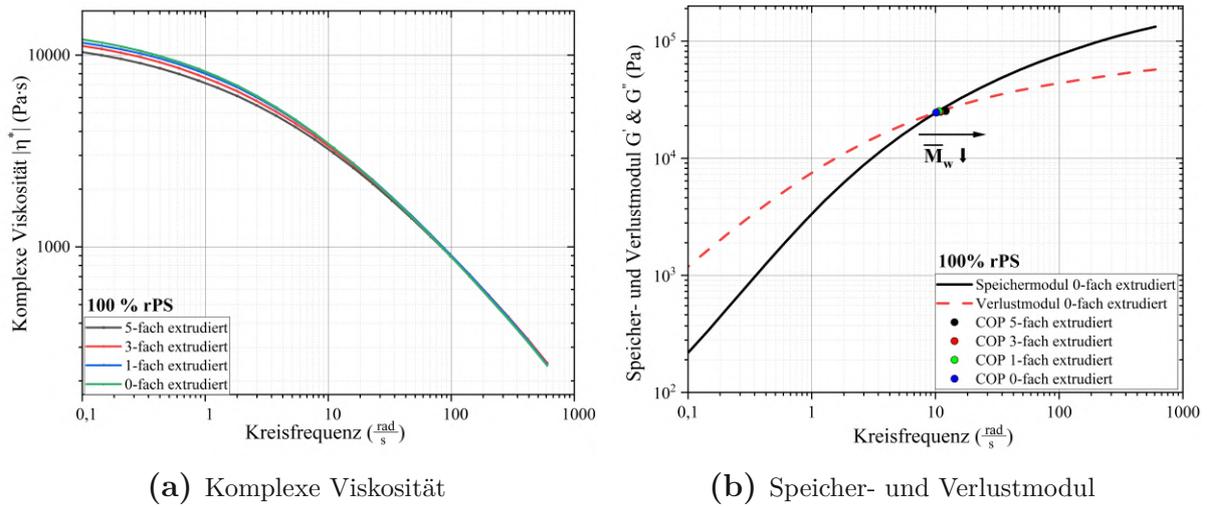


Abbildung 52 Frequenztests der rPS-Proben (100 % Rezyklat) nach Mehrfachextrusion

Tabelle 24 Cross-Over Punkte der 100 % rPS-Joghurtbecher nach Mehrfachextrusion

Anzahl an Extrusionen		0-fach	1-fach	3-fach	5-fach
G_{COP}	(Pa)	24558	25196	24934	25332
ω_{COP}	($\frac{rad}{s}$)	10,1	10,7	11,0	12,1

3.4.4 Waschversuche

Die rheologische Untersuchung zeigten, dass die Viskosität beider Bechermaterialien beeinflusst wird. Sowohl mit Wasser als auch mit der 2 m%igen Natronlauge nimmt die Viskosität für die PP- und die PS-Joghurtbecher tendenziell ab. Ausnahmen sind die PP Post Consumer Becher der Sorte NÖM und Zott Sahne Joghurt. Bei den NÖM-Joghurtbechern nimmt die Viskosität für beide Wascharten zu. Bei Zott-Joghurtbechern sinkt die Viskosität mit einem Waschvorgang in 2 m%iger Natronlauge, während sie bei Wasser bei geringen Kreisfrequenzen höher ist und mit steigender Oszillation sinkt, siehe Abbildung 53a und 54a.

Die Kurven der Speicher- und Verlustmoduln zeigen eine Verschiebung der Cross-Over-Punktes durch die Waschvorgänge bei manchen Joghurtbechern. Bei PP-Joghurtbechern ist die Verschiebung zu höheren oder niedrigeren Kreisfrequenzen erkennbar, siehe Abbildung 53b und 54b. Bei PS-Joghurtbechern ist nur eine geringe Bewegung erkennbar,

mit Ausnahme der PS Post Consumer Joghurtbecher (Obstgarten). Bei diesen ist eine Verschiebung zu höheren und niedrigeren Speicher- und Verlustmoduln auszumachen, siehe Abbildung 56b. Eine Auflistung der Schnittpunkte für Speicher- und Verlustmoduln sämtlicher Joghurtbecher sind in den Tabellen 25 und 26 zu finden.

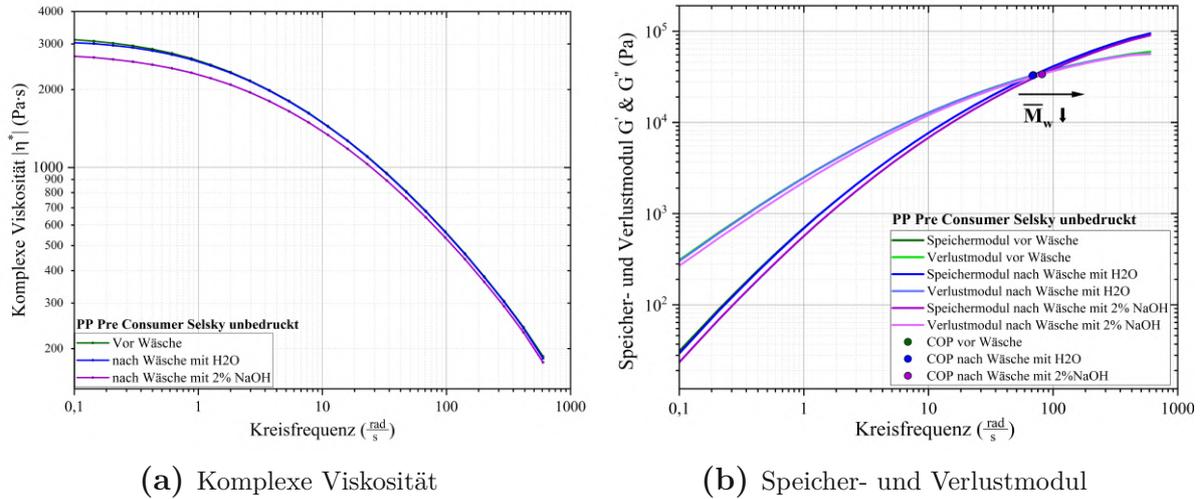


Abbildung 53 Frequenztests der PP Pre Consumer Joghurtbecher unbedruckt (Selsky Joghurt)

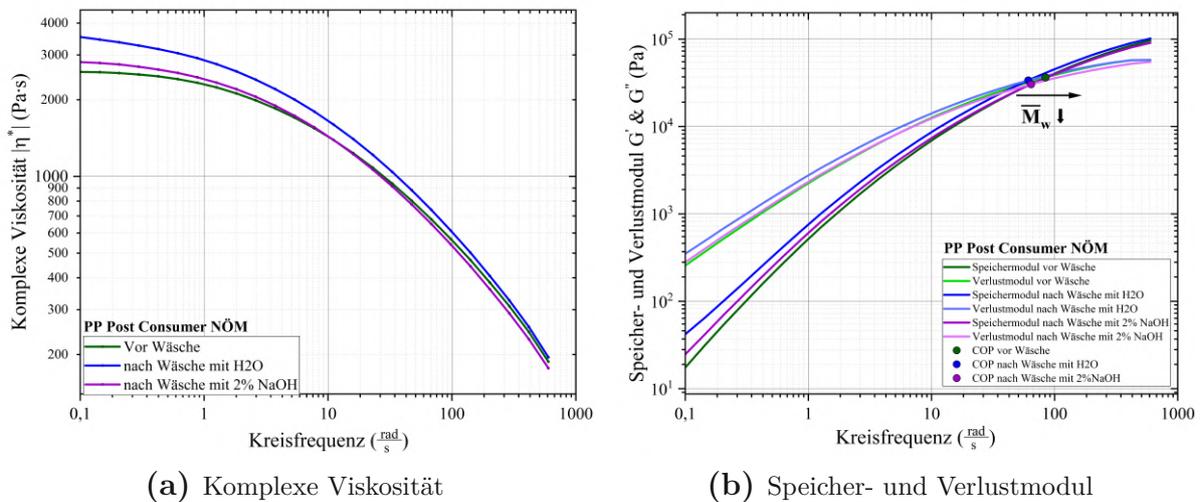
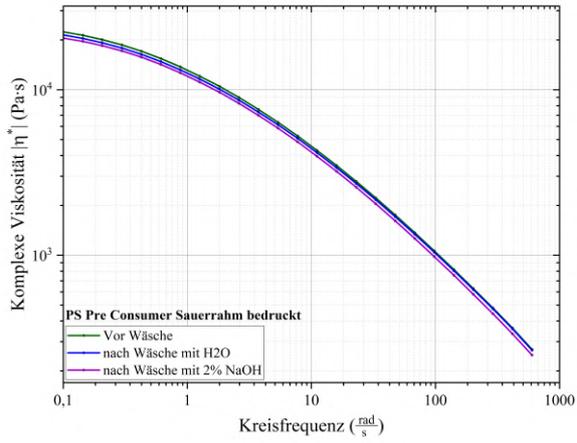
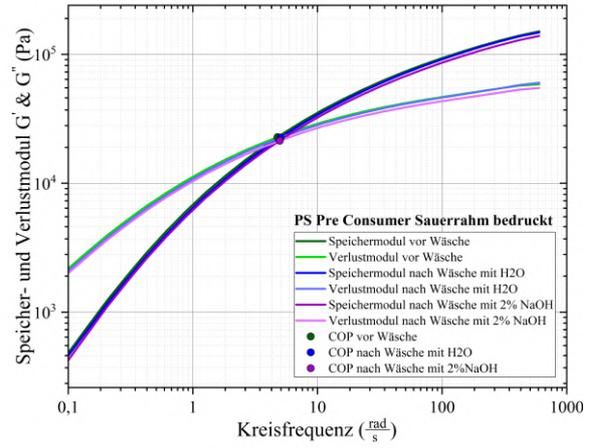


Abbildung 54 Frequenztests der PP Post Consumer Joghurtbecher (NÖM Joghurt)

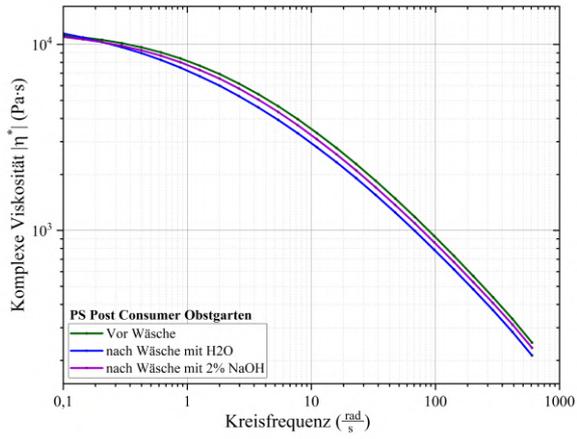


(a) Komplexe Viskosität

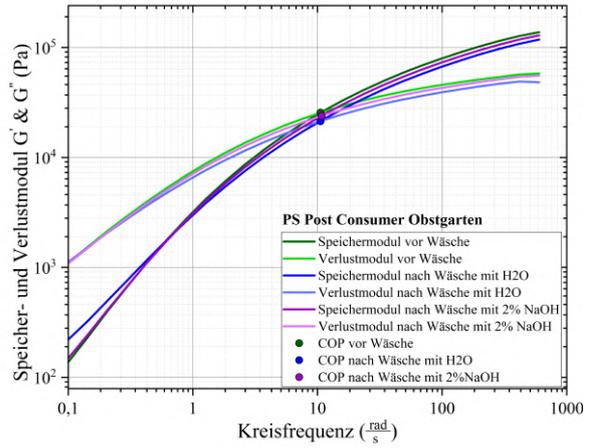


(b) Speicher- und Verlustmodul

Abbildung 55 Frequenztests der PS Pre Consumer Joghurtbecher bedruckt (Sauerrahm)



(a) Komplexe Viskosität



(b) Speicher- und Verlustmodul

Abbildung 56 Frequenztests der PS Post Consumer Joghurtbecher (Obstgarten)

Tabelle 25 Schnittpunkte der Speicher- und Verlustmoduln für die PP-Joghurtbecher der Waschversuche

		vor Wäsche	nach Wäsche mit H ₂ O	nach Wäsche mit 2 m% NaOH
PP Pre Consumer bedruckt(Selsky Jogurt)				
G_{COP}	(Pa)	32445	33731	31515
ω_{COP}	($\frac{rad}{s}$)	67,8	71,3	72,0
PP Pre Consumer unbedruckt(Selsky Jogurt)				
G_{COP}	(Pa)	33031	32660	33796
ω_{COP}	($\frac{rad}{s}$)	69,3	68,5	81,4
PP Post Consumer K3				
G_{COP}	(Pa)	35728	35987	32497
ω_{COP}	($\frac{rad}{s}$)	71,9	85,3	67,6
PP Post Consumer (NÖM Joghurt)				
G_{COP}	(Pa)	36463	33678	30450
ω_{COP}	($\frac{rad}{s}$)	84,5	61,1	64,5
PP Post Consumer (Zott Sahne Joghurt)				
		keine	Schnittpunkte	

Tabelle 26 Schnittpunkte der Speicher- und Verlustmoduln für die PS-Joghurtbecher der Waschversuche

		vor Wäsche	nach Wäsche mit H ₂ O	nach Wäsche mit 2m% NaOH
PS Pre Consumer bedruckt (Sauerrahm)				
G_{COP}	(Pa)	22765	22604	21398
ω_{COP}	($\frac{rad}{s}$)	4,8	5,1	5,0
PS Pre Consumer unbedruckt (Sauerahm)				
G_{COP}	(Pa)	23151	21550	23278
ω_{COP}	($\frac{rad}{s}$)	5,5	5,6	5,5
PS Post Consumer (Obstgarten)				
G_{COP}	(Pa)	25530	21381	23852
ω_{COP}	($\frac{rad}{s}$)	10,6	10,6	10,8
PS Post Consumer (clever cottage cheese)				
G_{COP}	(Pa)	23459	23504	23348
ω_{COP}	($\frac{rad}{s}$)	5,0	5,4	5,13

3.5 Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen

3.5.1 Vorversuche zu den HDPE-PP Blends

In Anbetracht der Ergebnisse für die Zugversuche der HDPE-Gebinde lässt sich im Falle des E-Modul lediglich eine geringe Veränderung erkennen. Hierbei weist die weiße rHDPE-Fraktion mit PP2-Verunreinigungen die höchsten ($1117 \frac{N}{mm^2}$), und die bunte rHDPE-Fraktion die niedrigsten, ($1112 \frac{N}{mm^2}$) Werte auf. Im Falle der Zugfestigkeit liegen die Werte lediglich für das bunte rHDPE etwas unter den beiden anderen Proben, bei $26,4 \frac{N}{mm^2}$. Der größte Einfluss ist bei der Bruchdehnung zu erkennen. Die, mit

PP2 verunreinigte, weiße rHDPE Fraktion weist ein stark sprödes Verhalten auf, deren Bruchdehnung liegt bei 16 %. Zudem haben auch die bunten rHDPE-Proben eine deutlich geringere Bruchdehnung bei 236 % und haben um den Faktor 3,5 geringere Werte als das weiße rHDPE, welche eine Bruchdehnung von 811 % aufweist. Dies lässt auf eine starke Versprödung durch PP-Verunreinigungen schließen. Darüber hinaus weist die weiße rHDPE-Fraktion eine hohe Schwankungsbreite auf, siehe Abbildung 57 und Tabelle 27.

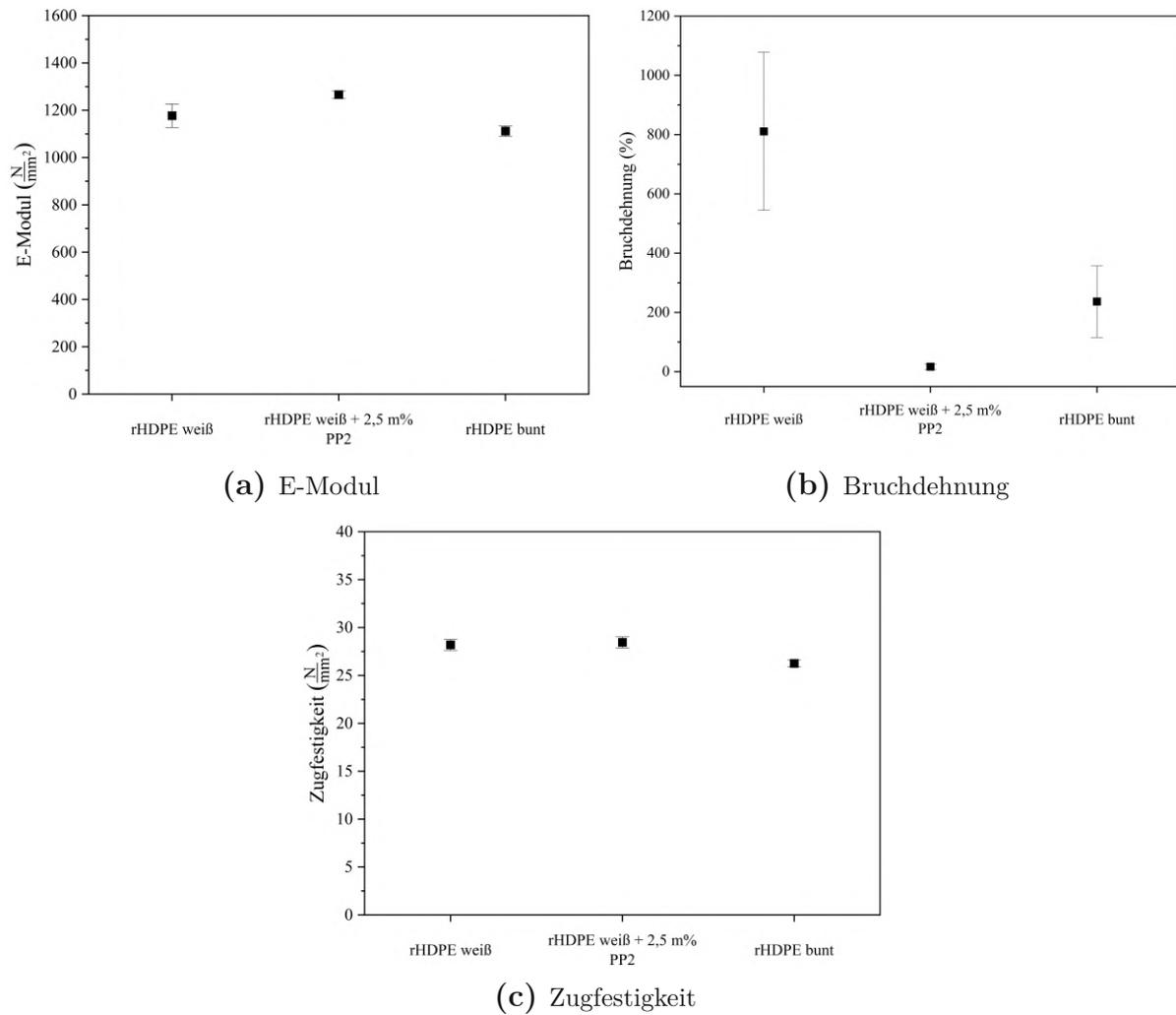


Abbildung 57 Ergebnisse des Zugversuchs für die rHDPE-Gebinde mit PP-Verunreinigungen

Die rezyklierten PP Fraktionen mit HDPE-Verunreinigungen weisen auf eine Erhöhung der Bruchdehnung hin. Die weiße rPP Fraktion weist demnach die geringste Bruchdehnung mit 631 % auf, während die bunte rPP-Fraktion die höchste Bruchdehnung von

759 % hat. Der E-Modul liegt lediglich bei dem bunten PP-Rezyklat etwas geringer als bei den anderen beiden Proben mit $1193 \frac{N}{mm^2}$ vor. Bei der Zugfestigkeit ist kein Einfluss durch HDPE-Verunreinigungen feststellbar, siehe Abbildung 58 und Tabelle 27.

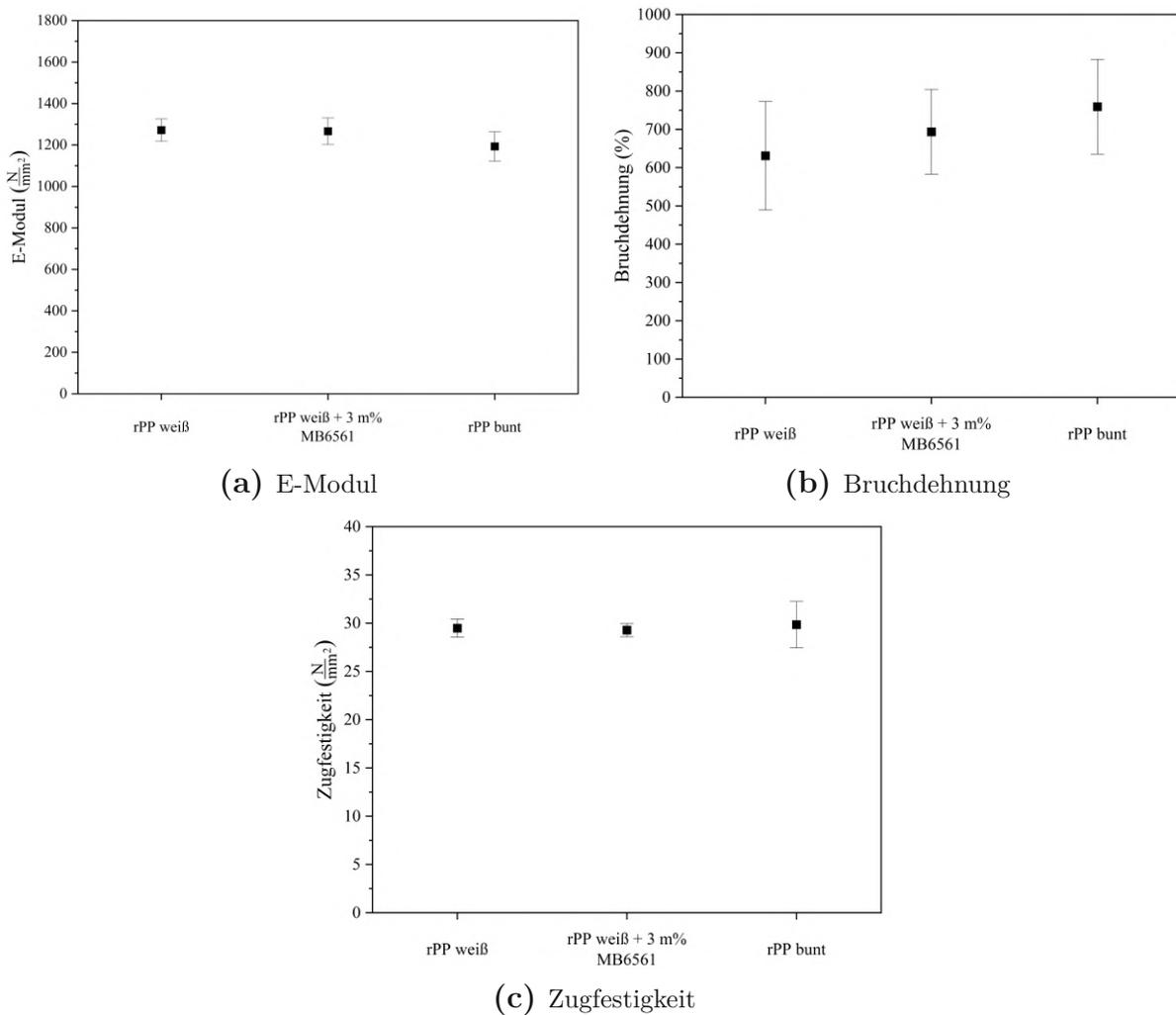


Abbildung 58 Ergebnisse des Zugversuchs für die rPP-Gebinde mit HDPE-Verunreinigungen

Die Kerb-Schlagzugzähigkeit des verunreinigten rHDPE ist für beide Fraktionen deutlich geringer als die des weißen rHDPE. Dabei sind die Werte, im Vergleich mit der weißen, für das bunte HDPE-Rezyklat um 15 % geringer und liegen bei $52 \frac{kJ}{m^2}$. Bei der Verunreinigung mit PP2 sind es sogar 25 % und eine Kerb-Schlagzugzähigkeit von $48 \frac{kJ}{m^2}$. Das weiße rHDPE hat im verunreinigten und im reinen Zustand zudem eine größere Standardabweichung ($6 \frac{kJ}{m^2}$) als das bunte rHDPE ($2 \frac{kJ}{m^2}$).

Im Falle des rezyklierten PP liegen die Werte näher beieinander. Hier weist das bunte

PP-Rezyklat die höchste Kerb-Schlagzugzähigkeit mit ($60 \frac{kJ}{m^2}$) unter den dreien auf. Die weiße rPP-Fraktion mit HDPE-Verunreinigung hat dabei die größte Standardabweichung von ($9 \frac{kJ}{m^2}$), siehe Abbildung 59 und Tabelle 27.

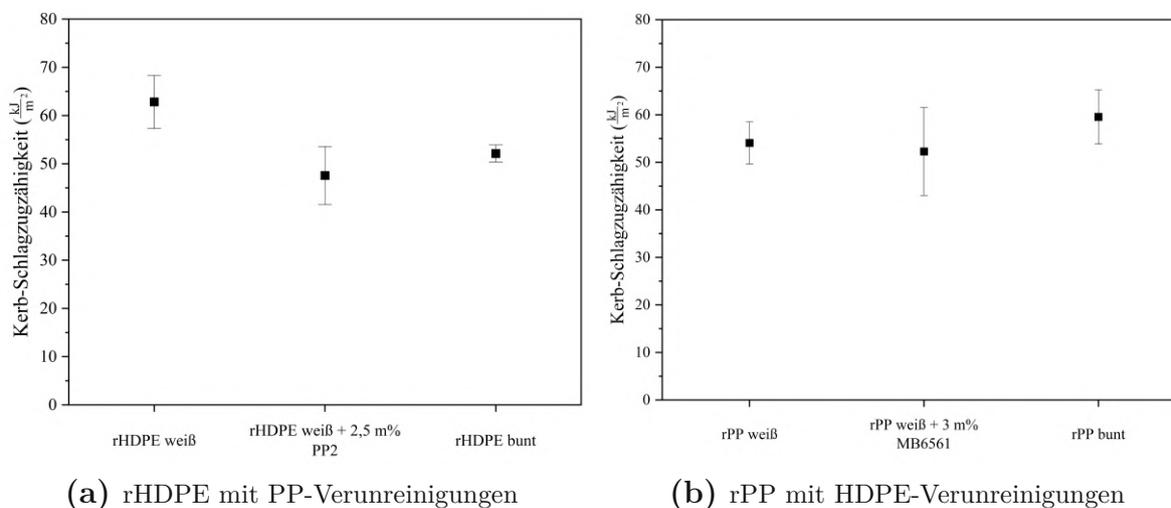


Abbildung 59 Kerb-Schlagzugzähigkeit der HDPE-PP Blends

Tabelle 27 Ergebnisse der mechanischen Analyse für die rHDPE-PP-Blends

Typ	E-Modul $\frac{N}{mm^2}$	Zugfestigkeit $\frac{N}{mm^2}$	Bruchdehnung %	Kerb Schlagzug- zähigkeit $\frac{kJ}{m^2}$
rHDPE weiß	1177 ± 49	28,2 ± 0,6	811 ± 267	62,8 ± 5,5
rHDPE weiß + 2,5 m% PP2	1112 ± 23	28,5 ± 0,6	16 ± 8	47,6 ± 6,0
rHDPE bunt	1112 ± 23	26,4 ± 0,4	236 ± 120	52,1 ± 1,8
rPP weiß	1271 ± 54	29,5 ± 0,9	631 ± 142	54,1 ± 4,4
rPP weiß + 3 m% MB6561	1266 ± 64	29,3 ± 0,7	693 ± 8	52,3 ± 9,2
rPP bunt	1193 ± 71	29,8 ± 2,4	759 ± 124	59,6 ± 5,7

3.5.2 Rezyklierte Joghurtbecher aus PP und PS

Die Ergebnisse der Zugversuche zeigten eine Richtungsabhängigkeit nach Orientierung für die ausgestanzten Joghurtbecherproben. Horizontale und vertikale Proben, siehe 2.2.1, wiesen sowohl für PP- als auch PS-Joghurtbecher deutlich unterschiedliche Eigenschaften auf. Bei den rezyklierten PP-Joghurtbechern kommt eine Positionsabhängigkeit der horizontalen Proben hinzu. Dieses Verhalten zeigt sich sowohl bei virginen Material als auch bei hohen und geringen Rezyklinganteilen. Da die mechanisch niedrigsten Eigenschaften für das Bauteilversagen relevant sind, wird in den folgenden Grafiken lediglich auf diese Bezug genommen. Bei PS sind die kritischen Proben die horizontalen, bei PP die horizontalen des unteren Viertels der Joghurtbecher, siehe Abbildung 60 und 61.

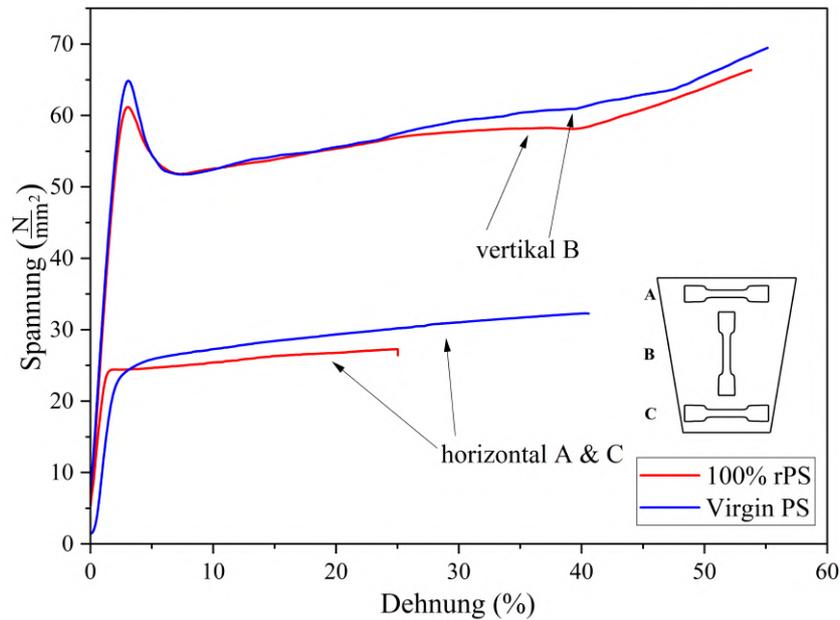


Abbildung 60 Richtungsabhängigkeit der PS-Joghurtbecher dargestellt im Spannungs-Dehnungs-Diagramm

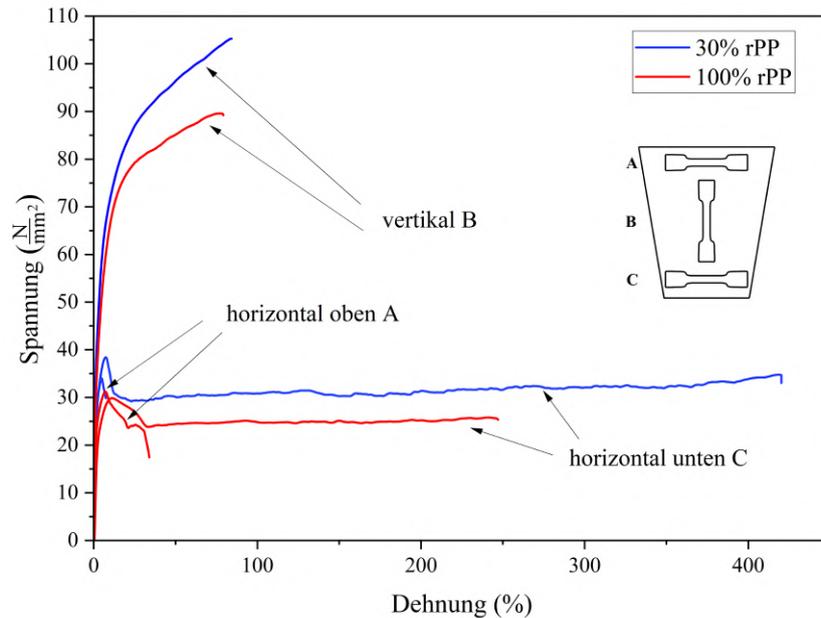


Abbildung 61 Richtung- und Positionsabhängigkeit der PP-Joghurtbecher dargestellt im Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Im Vergleich zum virginen Material, welches eine Zugfestigkeit von $31,5 \frac{N}{mm^2}$ aufweist, zeigten die rPS-Joghurtbecher eine niedrigere Zugfestigkeit für alle Zusammensetzungen mit Ausnahme der 50 % rPS-Fraktion, welche eine Zugfestigkeit von $31,7 \frac{N}{mm^2}$ hat. Einflüsse des Masterbatches (MB) bei der 30 % rPS-Joghurtbechern beeinflussten das Rezyklat in einem geringen Ausmaß. Mit Blick auf die Bruchdehnung lässt sich erkennen, dass mit steigenden Rezyklatanteil dieser Materialkennwert tendenziell sinkt. Dabei ist der niedrigste Wert bei 70 % rPS gemessen worden, welcher bei 19 % liegt. Im Vergleich hat das virginen Material eine Bruchdehnung von 33 %, was eine Verringerung um 44 % bedeutet. Darüber hinaus zeigen sich bei sämtlichen Proben ähnlich hohe Standardabweichungen, siehe Abbildung 62 und Tabelle 28.

Die geringere Dicke der Proben und die gegebene Krümmung aufgrund der Bechergeometrie, zeigten die Schwierigkeit mittels Extensometer konsistent anfängliche Dehnungen zu messen. Damit einhergehend sind berechnete E-Moduln in dem Fall nicht repräsentativ und hier nicht gelistet.

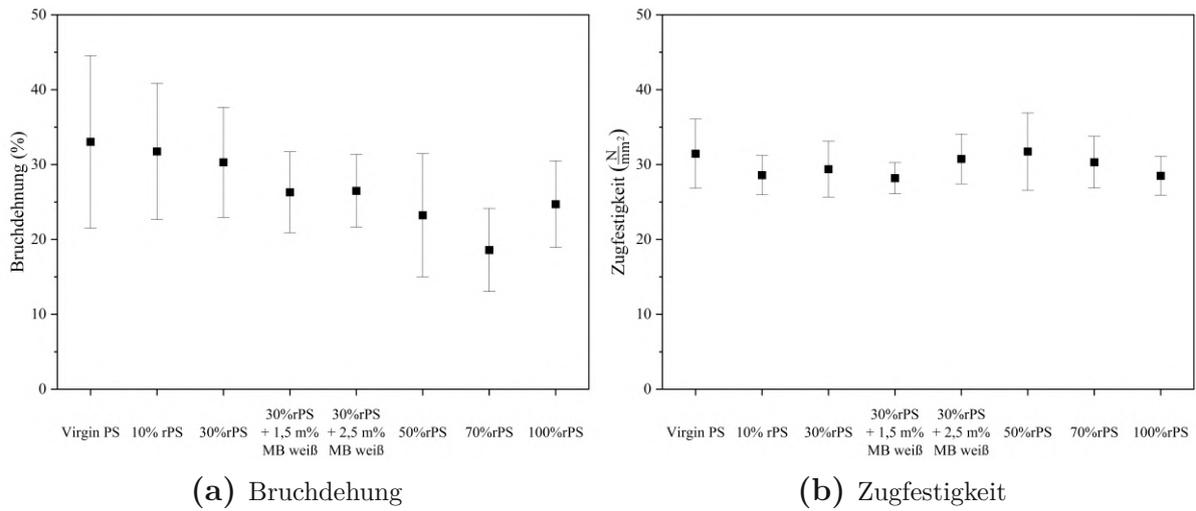


Abbildung 62 Ergebnisse des Zugversuchs für die horizontal gestanzten Proben der rPS Joghurtbecher

Im Hinblick auf die rezyklierten PP-Joghurtbecher lässt sich ein Trend zu niedrigeren Zugfestigkeiten mit steigenden Rezyklatanteilen erkennen. Die Ausnahme sind die 40 %igen rPP-Becher, diese weisen den höchsten Zugfestigkeitswert von $66 \frac{N}{mm^2}$ auf. Im Gegensatz zur Zugfestigkeit, lässt sich bei der Bruchdehnung eine Steigerung in Richtung höherem Rezyklatanteil feststellen. Die 80 % rPP-Fraktion muss mit besonderer Vorsicht betrachtet werden. Hier zeigten sich große Abweichungen innerhalb der Fraktion, was zu starken Schwankungen bei der Bruchdehnung führte und zu einer Standardabweichung von 50 % bei einer Bruchdehnung von 55 % führte.

Ähnlich wie bereits bei den rPS-Bechern traten Schwierigkeiten aufgrund der Geometrie auf. Bei den rPP-Proben konnten hierbei jedoch konsistentere Werte gemessen werden. Hier waren sehr hohe Standardabweichungen und ein Abwärtstrend mit steigenden Rezyklatanteil für die E-Moduln erkennbar. Eine Ausnahme sind hier die Joghurtbecher aus 100 % PP-Rezyklat. Der E-Modul lag hierbei knapp unter $1400 \frac{N}{mm^2}$. Zum Vergleich, der E-Modul der 30 %-igen rPP-Fraktion lag bei $1748 \frac{N}{mm^2}$ siehe Abbildung 63 und Tabelle 29.

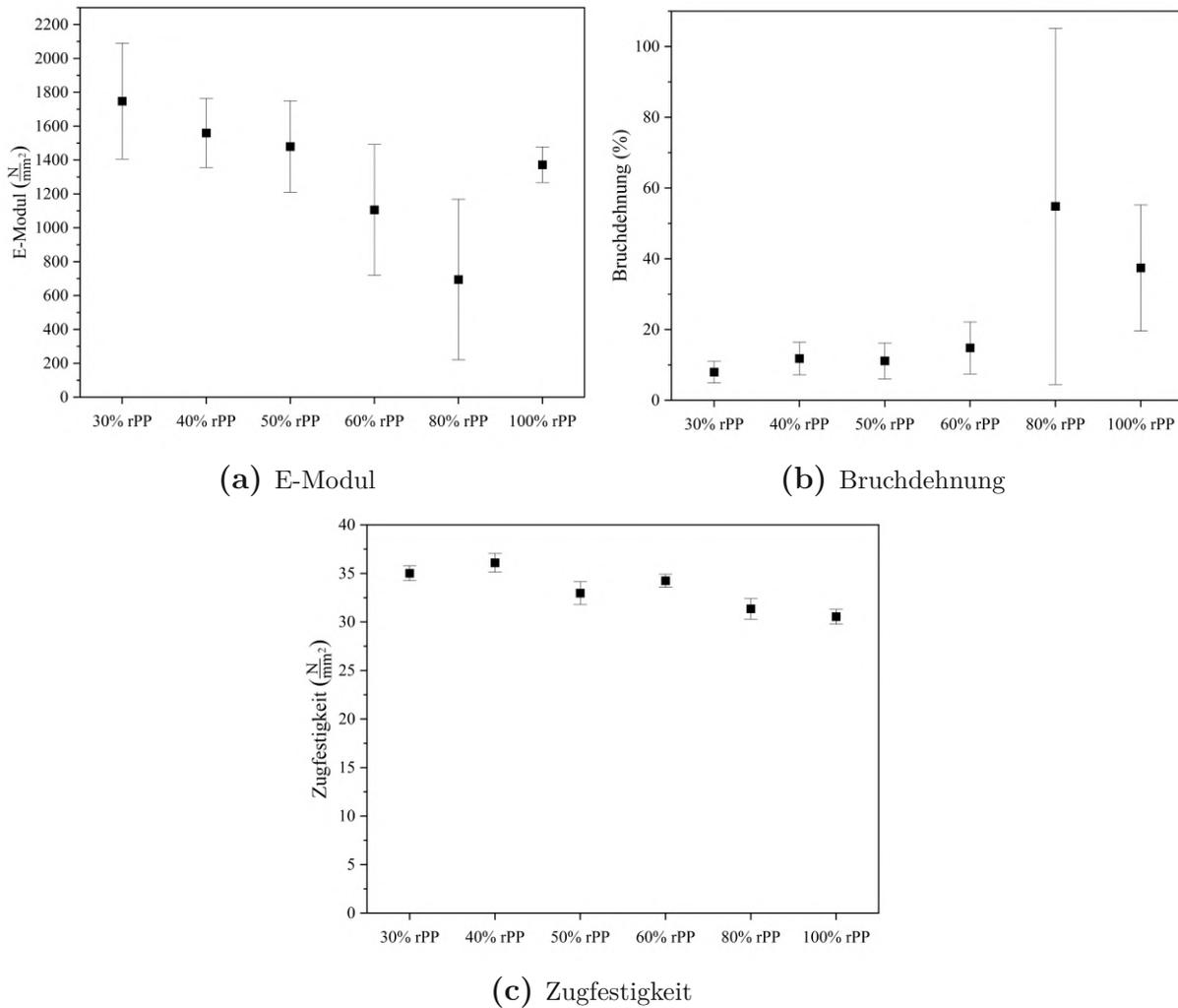


Abbildung 63 Ergebnisse des Zugversuchs für die horizontal gestanzten Proben der rPP Joghurtbecher

Mit Blick auf die Ergebnisse des Schlagzugversuchs ist für die rPP-Joghurtbecher erkennbar, dass für sämtliche Rezyklate ähnliche Werte und Standardabweichungen vorhanden sind. Die Ausnahme im Falle der Standardabweichung ist hier, wie bereits bei den Zugversuchen, der 80 % rPP-Joghurtbecher, welcher eine deutlich höhere Standardabweichung von $12 \frac{kJ}{m^2}$ bei einer Kerb-Schlagzugzähigkeit von $26,8 \frac{kJ}{m^2}$ aufweist, als die restlichen Becher. Mit einem Wert von $35,8 \frac{kJ}{m^2}$ übertrifft die 100% rPP-Fraktion die anderen Fraktionen um rund 20 %.

Im Falle der PS-Joghurtbecher ist merkbar, dass das virgine Material die geringste Kerb-Schlagzugzähigkeit mit $24 \frac{kJ}{m^2}$ aufweist. Die höchsten Werte sind bei 50 % rPS ($29,4 \frac{kJ}{m^2}$) und 100 % rPS ($29,1 \frac{kJ}{m^2}$) zu finden. Für die Joghurtbecher mit Masterbatch sind leicht

geringerer Werte als bei der 30 %igen rPS-Fraktion erkennbar, siehe Abbildung 64 und Tabelle 28.

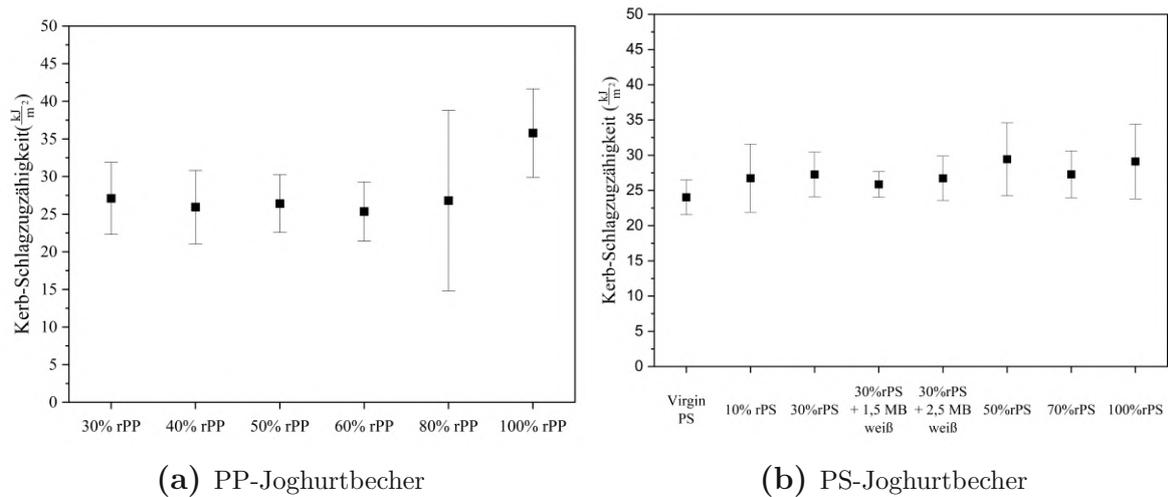


Abbildung 64 Kerb-Schlagzugzähigkeit der PP und PS Joghurtbecher

Tabelle 28 Ergebnisse der mechanischen Analyse für die rPS-Joghurtbecher

Rezyklatanteil	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	Kerb-Schlagzugzähigkeit
% rPS	$\frac{N}{mm^2}$	%	$\frac{kJ}{m^2}$
0 ^a	31,5 ± 4,6	33 ± 12	24,0 ± 2,5
10	28,6 ± 2,6	32 ± 9	26,7 ± 4,8
30	29,4 ± 3,7	30 ± 7	27,2 ± 3,1
30 + 1,5m% MB	28,2 ± 2,1	26 ± 5	25,9 ± 1,8
30 + 2,5m% MB	30,8 ± 3,3	26 ± 5	26,7 ± 3,2
50	31,7 ± 5,2	23 ± 8	29,4 ± 5,2
70	30,3 ± 3,4	19 ± 6	27,3 ± 3,3
100	28,5 ± 2,6	25 ± 6	29,1 ± 5,3

^a entspricht virginen Material

Tabelle 29 Ergebnisse der mechanischen Analyse für die rPP-Joghurtbecher

Rezyklatanteil	E-Modul	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	Kerb Schlagzug- zähigkeit
% rPP	$\frac{N}{mm^2}$	$\frac{N}{mm^2}$	%	$\frac{kJ}{m^2}$
30	1748 ± 342	35,0 ± 0,8	8 ± 3	27,1 ± 4,8
40	1560 ± 204	66,1 ± 1,0	12 ± 5	25,9 ± 4,9
50	1480 ± 270	33,0 ± 1,2	11 ± 5	26,4 ± 3,8
60	1106 ± 386	34,2 ± 0,7	15 ± 7	25,3 ± 3,9
80	695 ± 473	31,4 ± 1,1	55 ± 50	26,8 ± 12,0
100	1373 ± 105	30,5 ± 0,8	37 ± 18	35,8 ± 5,8

3.5.3 Mehrfachextrusion von 100 % rPP und rPS

In den folgenden Graphen, Abbildung 65 sind die Ergebnisse des Zugversuchs für das mehrfach-extrudierte PP-Rezyklat erkennbar. Es zeigte sich, dass sämtliche charakteristischen Materialkennwerte des Zugversuchs mit steigender Anzahl an Extrusionen sinken. Dabei ist der größte Einfluss bei der Bruchdehnung erkennbar. Die 5-fach extrudierte Fraktion hat eine Bruchdehnung von 312 % während die 0-fach extrudierte Fraktion eine Bruchdehnung von 709 % aufweist. Dies entspricht einer Verringerung um 56 %. In Tabelle 30 sind die genauen Werte auffindbar.

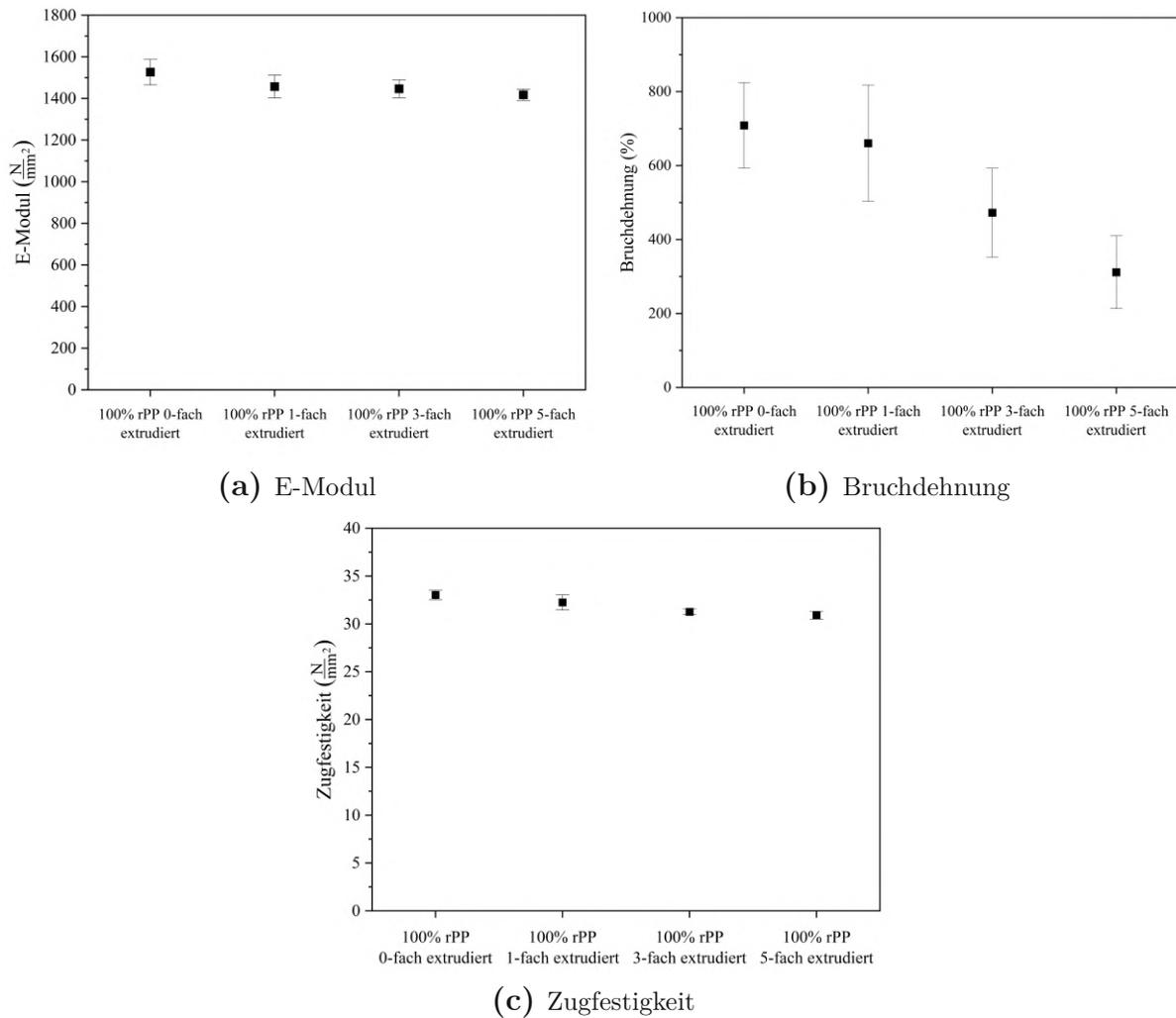


Abbildung 65 Ergebnisse des Zugversuchs für die Mehrfachextrusion der 100 % rPP Joghurtbecher

Bei der Mehrfachextrusion der 100 % rPS Joghurtbecher ist ein anderes Verhalten wahrnehmbar. Für den E-Modul sind keine nennenswerten Änderungen bis auf die 5-fache Extrusion erkennbar, hier liegt der E-Modul bei $2651 \frac{N}{mm^2}$. Im Vergleich dazu liegt der E-Modul des nicht extrudierten rPS-rezyklat bei $2495 \frac{N}{mm^2}$. Im Fall der Bruchdehnung fällt die 1-fach extrudierte rPS-Fraktion auf, die die höchsten Werte mit 37 % aufweist. Bei der Zugfestigkeit sind nur kleine Schwankungen identifizierbar, siehe Abbildung 66 und Tabele 31.

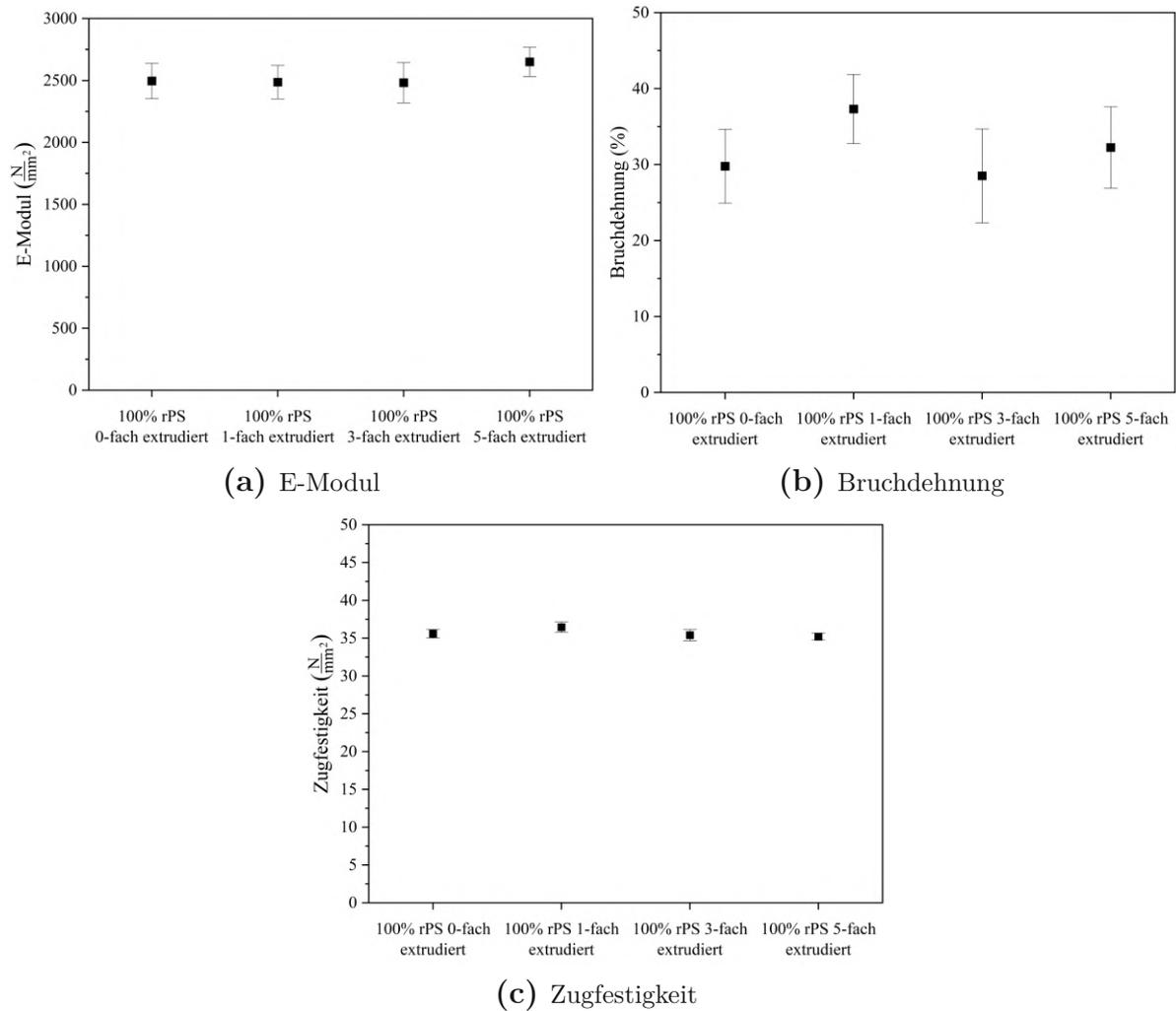


Abbildung 66 Ergebnisse des Zugversuchs für die Mehrfachextrusion der 100 % rPS Joghurtbecher

Im Bezug auf die Ergebnisse des Schlagzugversuches ist auf Seiten der Mehrfachextrusion für die rPP-Proben kein klarer Trend auszumachen. Lediglich die Ergebnisse der 1-fach Extrusion zeigen leicht höhere Werte mit $49,1 \frac{kJ}{m^2}$. Im Vergleich dazu liegt die Kerb-Schlagzugzähigkeit des nicht extrudierten PP-Rezyklat bei $45,4 \frac{kJ}{m^2}$.

Bei den rPS-Proben ist ein leichter Anstieg für die 3-fache ($34,2 \frac{kJ}{m^2}$) und 5-fache ($33,2 \frac{kJ}{m^2}$) Extrusion im Vergleich mit der nicht extrudierten rPS-Referenz ($29,9 \frac{kJ}{m^2}$) erkennbar. Mit Blick auf die Standardabweichung ist dieser Trend jedoch mit Vorsicht anzuerkennen, siehe Abbildung 67 und Tabelle 31.

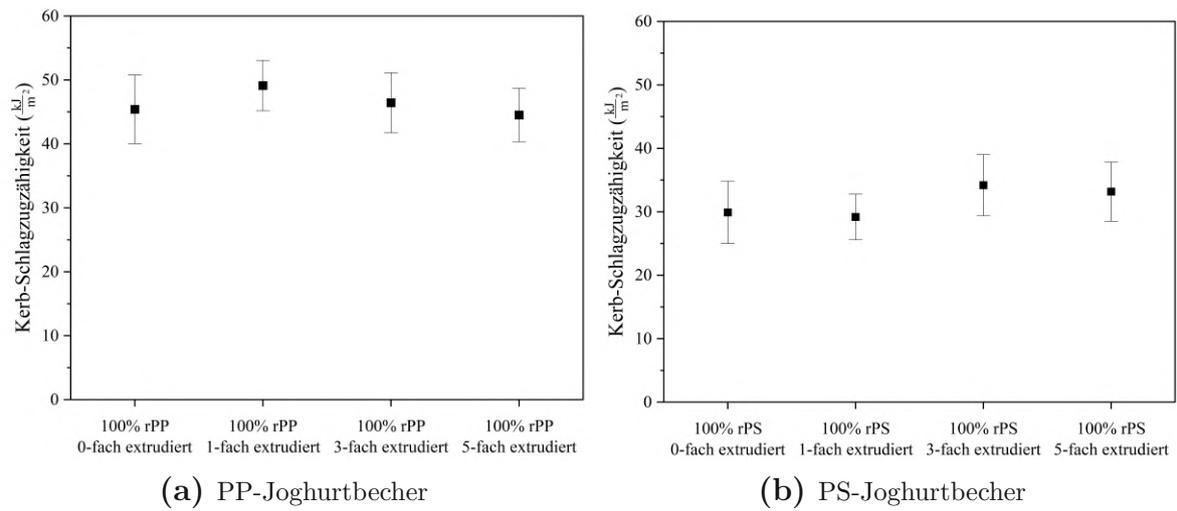


Abbildung 67 Kerb-Schlagzugzähigkeit der 100 % igen rPP und rPS Joghurtbecher nach Mehrfachextrusion

Tabelle 30 Ergebnisse der mechanischen Analyse für die Mehrfachextrusion der 100% rPP Joghurtbecher

100 % rPP	E-Modul	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	Kerb Schlagzugzähigkeit
Extrusionszyklen	$\frac{N}{mm^2}$	$\frac{N}{mm^2}$	%	$\frac{kJ}{m^2}$
0-fach	1527 ± 62	33,0 ± 0,5	709 ± 116	45,4 ± 5,4
1-fach	1457 ± 55	32,2 ± 0,8	660 ± 157	49,1 ± 4,0
3-fach	1447 ± 43	31,3 ± 0,3	472 ± 120	46,4 ± 4,7
5-fach	1418 ± 27	30,9 ± 0,4	312 ± 99	44,5 ± 4,2

Tabelle 31 Ergebnisse der mechanischen Analyse für die Mehrfachextrusion der 100% rPS Joghurtbecher

100 % rPS	E-Modul	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	Kerb Schlagzugzähigkeit
Extrusionszyklen	$\frac{N}{mm^2}$	$\frac{N}{mm^2}$	%	$\frac{kJ}{m^2}$
0-fach	2495 ± 142	35,6 ± 0,6	30 ± 5	29,9 ± 4,9
1-fach	2486 ± 134	36,5 ± 0,7	37 ± 5	29,2 ± 3,6
3-fach	2482 ± 162	35,4 ± 0,8	29 ± 6	34,2 ± 4,8
5-fach	2651 ± 117	35,2 ± 0,5	32 ± 5	33,2 ± 4,6

3.5.4 Auslagerungsversuche

Die im Zugversuch ermittelten Eigenschaften nach den Auslagerungsversuchen sind für PP in Abbildung 68 und für PS in Abbildung 69 erkennbar. Die genauen Werte sind in Tabelle 32 und 33 zu finden. Zusätzlich zu den Kennwerten der Auslagerungs-Proben wurden diese mit einer nicht ausgelagerten spritzgegossenen Fraktion des jeweiligen Werkstoff verglichen, diese entsprechen der 0-fach extrudierten 100 % rPP- bzw. rPS-Fraktion aus Kapitel 3.5.3.

Mit Blick auf den E-Modul zeigt sich, dass bei rPP für beide Medien und bei allen drei Bedingungen, die Werte merklich niedriger sind. Bei Essig sind diese zwischen 19 - 20 % niedriger bei Öl 11-13 %. Zum Vergleich, die nicht ausgelagerte Probe hat einen E-Modul von $1527 \frac{N}{mm^2}$. Die Zugfestigkeit weist für sämtliche Auslagerungsproben geringere Werte auf. Bei Auslagerung in Essig sind Reduzierungen von 5-7 % und in Öl von 2-5 % für die PP-Proben erkennbar. Bei der rPP-Referenz liegt die Zugfestigkeit bei $33 \frac{N}{mm^2}$. Die Werte der Bruchdehnung zeigen bei rPP und einer Auslagerung in Essig zunächst einen Anstieg bei Raumtemperatur, fallen jedoch mit steigender Temperatur stark ab. Zudem vergrößert sich die Standardabweichung hingehend zu höheren Temperaturen. In Öl ist ebenfalls eine Reduktion der Bruchdehnung erkennbar. Wie auch bei Essig, sinkt die Bruchdehnung mit steigender Temperatur. Die geringste Bruchdehnung weist die in Öl-ausgelagerte Fraktion bei 60 °C auf, welche bei 421 % liegt und einer Verminderung von 40 % im Vergleich zu der nicht ausgelagerten Referenzprobe entspricht.

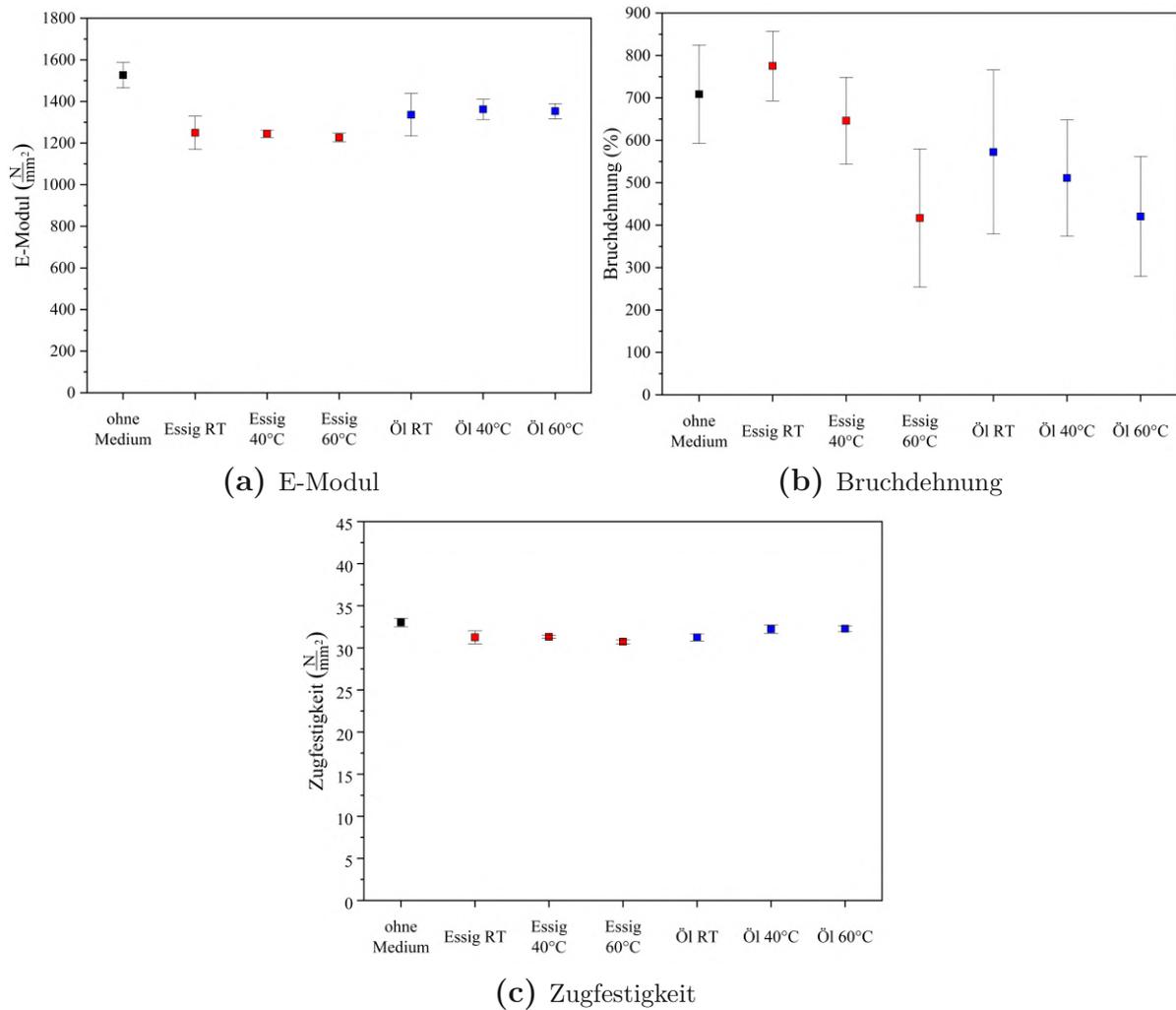


Abbildung 68 Ergebnisse des Zugversuchs für die ausgelagerten 100% rPP-Proben

Für rPS ist ein gegenteiliges Verhalten für den E-Modul erkennbar. Hier ist tendenziell eine Erhöhung der E-Moduln für die ausgelagerten Proben erkennbar. Aufgrund der hohen Standardabweichung ist dies jedoch nicht eindeutig. Auch die Zugfestigkeit der rPS-Proben ist für sämtliche Auslagerungen geringer und die Standardabweichung höher. Die Verminderung der Zugfestigkeit durch Auslagerung in Essig liegt dabei bei 4-7 % und bei Öl bei rund 4 %. Zum Vergleich, die Zugfestigkeit der rPS-Referenz liegt bei $35,6 \frac{N}{mm^2}$. Bei der Auslagerung von rPS in Essig bei Raumtemperatur ist für die Bruchdehnung eine leichte Erhöhung zu erkennen. Bei höheren Temperaturen sowie bei der Auslagerung in Öl kommt es jedoch zu einer Reduktion. Für Auslagerungen bei 60 °C in Essig liegt die Bruchdehnung bei 20 % und in Öl bei 24% was eine Reduktion von 32 % und 19 %, im Vergleich zu rPS-Referenz entspricht.

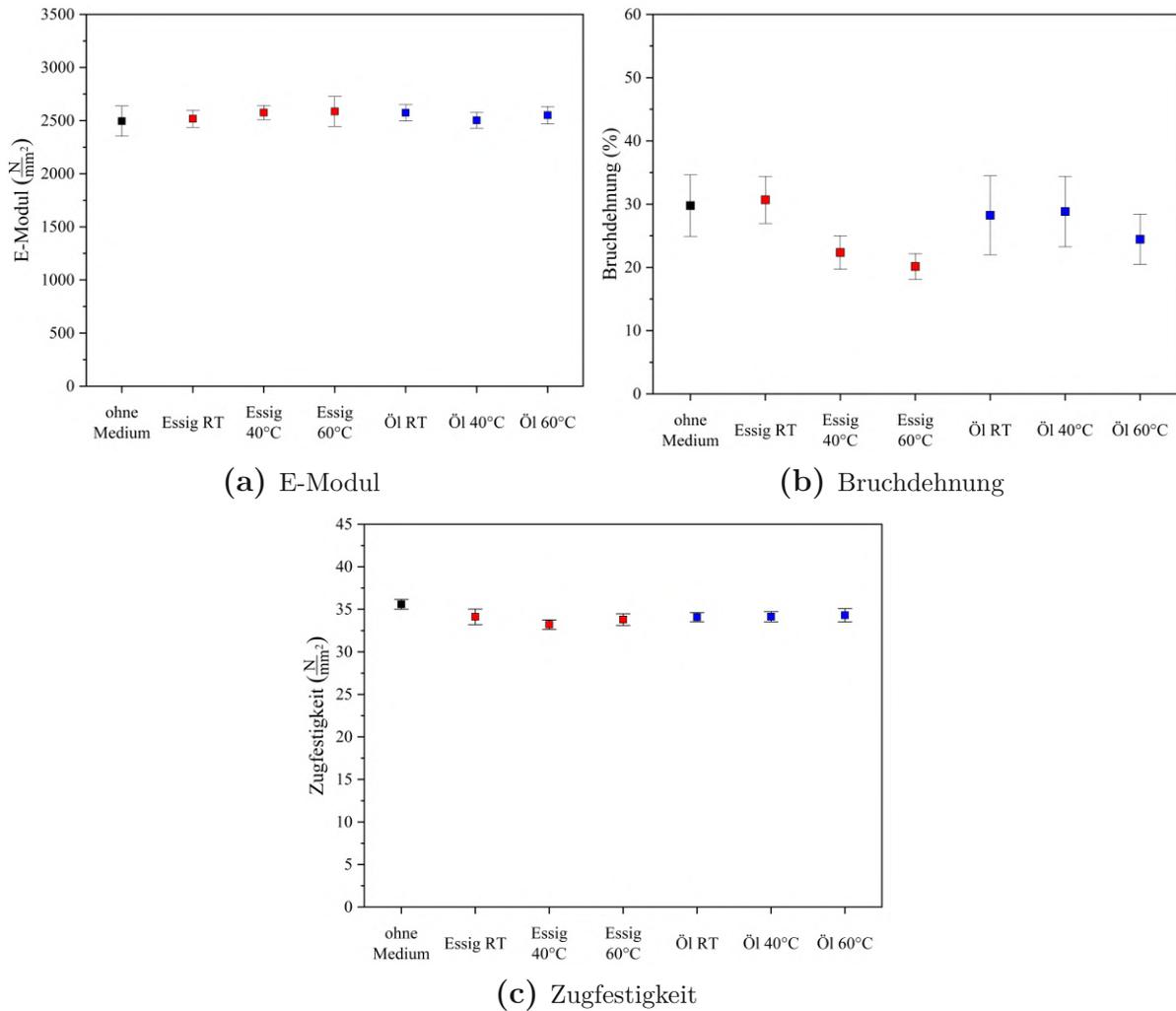


Abbildung 69 Ergebnisse des Zugversuchs für die ausgelagerten 100% rPP-Proben

Tabelle 32 Ergebnisse der mechanischen Analyse für Auslagerungsversuche des 100 %igen PP-Rezyklat

100 % rPP Auslagerungsparameter	E-Modul $\frac{N}{mm^2}$	Zugfestigkeit $\frac{N}{mm^2}$	Bruchdehnung %
Essig RT	1250 ± 80	31,3 ± 0,8	775 ± 82
Essig 40 °C	1245 ± 18	31,3 ± 0,2	646 ± 103
Essig 60 °C	1227 ± 21	30,7 ± 0,2	417 ± 163
Öl RT	1336 ± 102	31,5 ± 0,4	572 ± 193
Öl 40 °C	1362 ± 48	32,2 ± 0,5	511 ± 137
Öl 60 °C	1354 ± 37	32,3 ± 0,4	421 ± 141

Tabelle 33 Ergebnisse der mechanischen Analyse für Auslagerungsversuche des 100 %igen PS-Rezyklat

100 % rPS Auslagerungsparameter	E-Modul $\frac{N}{mm^2}$	Zugfestigkeit $\frac{N}{mm^2}$	Bruchdehnung %
Essig RT	2518 ± 81	34,1 ± 0,9	31 ± 4
Essig 40 °C	2576 ± 67	33,2 ± 0,6	22 ± 3
Essig 60 °C	2586 ± 140	33,8 ± 0,7	20 ± 2
Öl RT	2574 ± 79	79,0 ± 34,1	28 ± 6
Öl 40 °C	2554 ± 74	74,1 ± 0,6	29 ± 6
Öl 60 °C	2551 ± 82	34,3 ± 0,8	24 ± 4

4 Diskussion

4.1 Erkenntnisse in der Versuchsdurchführung

Bei den Auslagerungsversuchen zeigte sich die Problematik bei der Flüchtigkeit des Essigs. So fand die größte Verdunstung bei der 60 °C Fraktion statt, sodass diese Flüssigkeit bereits nach kurzer Zeit die Proben nicht mehr komplett bedeckten und demnach einen gleichwertigen Vergleich der Massenänderungen zwischen den Fraktionen nicht ermöglichte. Zudem war ersichtlich, dass durch Verdunstung des Essigs und anschließender Auffüllung eine erhöhte Konzentration an Restprodukten bei höheren Temperaturen erkennbar war. Auch dies führte zu einem schwereren Vergleich zwischen den Temperaturen, da die Zusammensetzung des Auslagerungsmediums sich je nach Temperatur unterschied, siehe Abbildung 70.



Abbildung 70 Auslagerungsversuche mit Essig nach 14 Tagen bei unterschiedlichen Temperaturen, links: Raumtemperatur, mitte: 40°C, rechts: 60°C

Neben der Problematik der unterschiedlichen Zusammensetzung kommt hinzu, dass nach knapp 10 Tagen bei der Essigfraktion bei Raumtemperatur eine zusätzliche Verunreinigung hinzukam. Es handelte sich um eine Art Schimmels, welcher mit voranschreitender

Zeit wuchs, siehe Abbildung 71. Dieses Erschwernis, wie auch die zunehmend unterschiedliche Zusammensetzung, führte zu der Entscheidung nach zwei Wochen das alte Medium der Essigfraktion durch frischen Apfelessig zu ersetzen.



Abbildung 71 Biologischer Rückstand nach 14 Tagen bei der Essigfraktion und Raumtemperatur

4.2 Diskussion der Ergebnisse

4.2.1 rHDPE mit PP-Verunreinigungen

In Anbetracht der Ergebnisse zu HDPE-PP Blends ist erkennbar, dass das weiße HDPE mit PP2-Verunreinigung ähnliche Charakteristika wie das bunte HDPE-Rezyklat hatte. Die verringerte Kerb-Schlagzugzähigkeit und vor allem die stark verringerte Bruchdehnung sind wichtige Parameter, welche die Nutzung des Rezyklats einschränken. Ein Grund für das sprödbrechende Verhalten liegt in der Tatsache, dass sich die beiden Kunststoffe nicht miteinander vermischen lassen, [43]. Die dadurch geringe Grenzflächenhaftung führt zur schlechteren Übertragung von Kräften und erklärt die mechanischen Ergebnisse. Zudem erhöhte sich die Viskosität mit der PP-Kontamination, welche im weiteren Verarbeitungsprozess zu beachten ist. Besonders in Hinsicht auf die mechanischen Eigenschaften zeigt sich die Wichtigkeit eines vorrangigen Sortierprozesses, um die Qualität des Rezyklats hochzuhalten.

4.2.2 rPP mit HDPE-Verunreinigungen

Bei den rPP-Gebinden zeigte die durch MB6561 kontaminierte weiße rPP-Fraktion weniger ähnliche Tendenzen im Vergleich zu dem bunten rPP. Es war erkennbar, dass der Einfluss durch HDPE-Kontamination deutlich geringer ausfiel. Die Auswirkungen durch HDPE sind den mechanischen Eigenschaften zum Großteil zugutegekommen. Es wurde eine deutliche Steigerung der Bruchdehnung beobachtet, allerdings mit einer hohen Standardabweichung. Währenddessen erfuhr der E-Modul nur eine geringe Reduktion und die Zugfestigkeit wurde wenig beeinflusst. Damit kam zum Vorschein, dass geringe HDPE-Kontaminationen sogar einen positiven Effekt haben können und in dem Fall ein genauerer Sortierungsprozess weniger wichtig ist. Ebenfalls stellte sich heraus, dass in beiden Fällen Anzeichen von Degradation in den FTIR-Spektren erkennbar waren, welche für HDPE und PP typisch sind [40, 44].

4.2.3 rPP-Joghurtbecher

Eine wichtige Erkenntnis für die mechanischen Untersuchungen der rezyklierten PP- und PS-Joghurtbecher war die starke Richtungsabhängigkeit der ausgestanzten Zugproben. Mit der Anwendung der Rezyklate als Joghurtbecher zeigte sich die empfindlichste Stelle in dem unteren Viertel der Becher in horizontaler Orientierung. In Betrachtung dieser Anwendung sind die mechanischen Werte für diesen kritischsten Fall entscheidend gewesen.

Bezogen auf die rPP-Joghurtbecher deuteten charakteristische Peaks in der IR-Spektroskopie und die Cross-Over Punkte in der Rheologie auf Degradation im Recyclingprozess durch Kettenspaltung hin [44]. Die mechanischen Ergebnisse spiegeln dies über die sinkender Zugfestigkeit wieder. Überraschend waren die Ergebnisse des Schlagzugversuchs. Allgemein steigt mit erhöhter Kettenlänge die Schlagzähigkeit [37]. In dem Fall hat jedoch das 100 %-ige Rezyklat, welches laut rheologischen Untersuchungen die geringste komplexe Viskosität der PP-Rezyklate hatte, die höchsten Schlagzugzähigkeitswerte.

Im 100 %igen PP-Rezyklat suggerierte ein Kristallisationsbereich in der Abkühlphase der DSC-Kurve, eine Verunreinigung. Dem Temperaturbereich nach zu urteilen, und als typischer Verpackungskunststoff mit ähnlicher Dichte, wäre eine plausible Möglichkeit PE. Die FTIR-Analyse konnte dies nicht bestätigen, die Überlappung der unterschiedlichen Banden, wie auch in Tabelle 19 erkennbar, erschwerte dies merkbar.

Die Joghurtbecher weisen bis zu dem 50 %igen Rezyklat nur geringe Unterschiede für die

mechanischen Eigenschaften auf. Änderungen in der Viskosität und die damit verbundenen Verarbeitungsparameter sind jedoch nur bei dem 30 und 40 %-igen PP-Rezyklat ähnlich. Ein Vergleich mit dem virginen Material würde sich als durchwegs sinnvoll erweisen.

Durch die Mehrfachextrusion verschlechterten sich die mechanischen Eigenschaften des 100 %igen rPP-Rezyklats. Die Zugfestigkeit und der E-Modul verringerten sich geringfügig, während die Bruchdehnung stark nachließ. Das Verhalten für die reduzierte Bruchdehnung für mehrere Extrusionszyklen deckt sich mit ähnlichen Studien zur Mehrfachextrusion von virginen PP [45, 46]. Die Verringerung von Zugfestigkeit und E-Modul tritt entgegen den Erkenntnissen der Studien auf. Dabei wird von einer Erhöhung dieser Werkstoffkennwerte aufgrund von steigender Kristallinität gesprochen. Die sinkende Viskosität sowie die reduzierte Molmasse decken sich wiederum mit Ergebnissen aus der Literatur [47, 48].

4.2.4 rPS-Joghurtbecher

Die rezyklierten rPS-Joghurtbecher weisen ab einem Rezyklatanteil von 30 % eine geringere Viskosität und niedrigere Molmasse sowie reduzierte Bruchdehnung auf. Dies ist für rezykliertes PS eine übliche Charakteristik [44]. Im Vergleich zum virginen Material stimmen die Materialeigenschaften des 30 %igen Rezyklats bei einem möglichst hohen Rezyklatanteil am ehesten überein. Der Masterbatch im 30 %-Rezyklat zeigt nur geringe Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften. Im Falle der rheologischen Bedingungen sind die Unterschiede nur marginal. Mit 30% rPS und der Verwendung des Masterbatches lässt sich eine gute farbliche Annäherung an das virgine Material erzielen, während PS-Rezyklat genutzt wird

Bei den 100 %igen rPS-Joghurtbechern konnten Verunreinigungen im Material mittels DSC-Analyse festgestellt werden. Hier scheint PE eine wahrscheinliche Kontamination.

Die Mehrfachextrusion der 100 % rPS-Joghurtbecher hatte nur geringe Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften. Die Reduzierung der Viskosität der rPS-Joghurtbecher nach mehreren Extrusionszyklen deckt sich mit vergleichbaren Studien [49].

4.2.5 Waschversuche

Die bedruckten Joghurtbecher aus den Waschversuchen konnten zwar mittels 2 m%iger Natronlauge großteils von der Farbe befreit werden, jedoch sind vereinzelt bedruckte Flakes erkennbar gewesen. Im Schredderprozess gestapelte Becher hafteten auch nach dem Zerkleinerungsprozess aneinander, was dazu führte das vereinzelt Stellen weniger intensiv mit der wässrigen Lösung in Kontakt kamen und somit nicht ausreichend gereinigt wurden. Die Kontamination durch Farbe würde auch im Falle der Weiterverarbeitung das Rezyklat verfärben. Hier wäre ein alternativer Ansatz, die Joghurtbecher noch feiner zerkleinert zu waschen. Neben der Bedruckung konnten Teile der Papieretiketten sowie Papier aus den In-Mould-Prozess nach dem Waschprozess mit Wasser an den geschredderten Bechern weiterhin haften. Aufgrund der niedrigen Maschenweite der Wäschenetze konnten die gelösten Papierbestandteile nicht gut abgeschieden werden. Diese würden die Qualität des Rezyklats in späterer Verarbeitung merkbar beeinträchtigen.

In den rheologischen Ergebnissen zeigte sich meist eine Senkung der Viskosität der PP- und der PS-Becher nach einem Waschvorgang. Die verdünnte Natronlauge beeinträchtigte die PP-Becher stärker als die PS-Becher, was sich in einer auffälligeren Viskositätsänderung zeigte. Dies ist bezogen auf den industriellen Maßstab, aufgrund der angepassten Verarbeitungsparameter zu beachten. Mögliche Verunreinigungen, wie Klebstoff durch geklebte Etiketten im Falle der PS Post-Consumer Becher (Obstgarten) oder den PP Post-Consumer K3-Bechern, beeinflussen die rheologischen Ergebnisse. Demnach werden nicht nur die Auswirkungen auf den reinen Kunststoff durch die Waschvorgänge betrachtet.

4.2.6 Auslagerungsversuche

Im Falle der Auslagerung in Essig führten Diffusionsprozesse in die Materialien zu einer positiven Massenänderung. Eine intensivere Aufnahme und ein quasi linearer Massezuwachs wurden bei steigender Temperatur beobachtet, was mit dem Arrhenius-Ansatz übereinstimmt, das den Einfluss der Temperatur auf die Diffusionskinetik beschreibt [50].

Bei der Auslagerung in Öl war nur für das PP-Rezyklat ebenfalls eine positive Massenänderung identifizierbar. Dabei zeigte lediglich der Auslagerungsversuch bei 60 °C einen linearen Verlauf der Massenaufnahme. Vergleichbare Auslagerungsversuche von Polypropylene in Olivenöl konnten dies ebenfalls beobachten [51]. Für PS-Rezyklat wurde

eine negative Massenänderung bei der Auslagerung in Rapsöl festgestellt, was auf eine Diffusion in das Öl hinweisen würde.

Die mechanischen Eigenschaften haben sich bei dem PP-Rezyklat beinahe durchwegs verschlechtert. Hier ist vor allem die Bruchdehnung stark davon betroffen. Die mechanischen Eigenschaften des PS-Rezyklat wurden dabei weniger stark beeinflusst. Auch bei diesem Rezyklat waren Anzeichen von Degradation mittels FTIR-Spektroskopie erkennbar. Der Einfluss der erhöhten Temperatur wurde in dem Fall lediglich im Kontext der Auslagerung in den beiden Medien betrachtet.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die materialcharakteristischen Eigenschaften von Rezyklaten der Verpackungskunststoffe HD-Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol analysiert. Zusätzlich wurden einige Einflüsse auf das Rezyklat untersucht, darunter der Kontakt mit Lebensmitteln, Mehrfachverarbeitung und Waschprozesse.

Kontaminationen von HDPE und PP durch den jeweiligen anderen Kunststoff zeigten die Wichtigkeit effizienter und präziser Sortierprozesse und, dass bereits durch geringe Kontaminationen die Eigenschaften stark beeinträchtigt werden können. Wenn bereits bei der Entstehung des Abfalls Maßnahmen zur Erzielung einer reineren Fraktion ergriffen werden, können spätere Sortierprozesse vereinfacht und eine höhere Qualität des Rezyklats erreicht werden. Die Anzeichen von Degradation sind hier weiter zu verfolgen. Eine Möglichkeit wäre, über die einfache Extrusion hinauszugehen und die Materialkennwerte nach mehreren Extrusionsvorgängen zu analysieren.

Die Eigenschaften des Rezyklats sind ausschlaggebend für dessen weitere Verwendung. Unter Berücksichtigung der Eigenschaften der PS- und PP-Rezyklate können Joghurtbecher mit bis zu 50 % Rezyklatanteil als gute Alternativen zu den virginen Varianten betrachtet werden. Auch hier zeigt sich die Wichtigkeit einer reinen Fraktion. Verunreinigungen waren vorhanden und führten zu Beeinträchtigung der Qualität. Mit Blick auf die HDPE-PP-Blends wäre auch eine Untersuchung von HDPE- oder PP-Kontaminationen im PS-Verbund für weiterführende Arbeiten interessant.

Wie aus den Waschversuchen hervorging, beeinflusst die Art der Informationsübermittlung durch Etikettierung, Bedruckung und co. die erforderlichen Waschbedingungen. Mit der steigenden Variation der Dekorationsart steigt die Anzahl der möglichen Fehlerquellen im Waschprozess. Die Arbeit hat aufgezeigt, dass bereits bei einer begrenzten Auswahl an Dekorationsarten durch denselben Prozess verschiedene Qualitätsstufen erzielt werden können. Angepasste Waschversuche mit unterschiedlichen Versuchsparametern, könnten weiter Aufschluss über die treibenden Faktoren zu Eigenschaftsbeeinflussung geben. Dabei könnten Parameter wie Waschtemperatur, Waschzeit, Partikelgröße oder auch Detergenzienart angepasst werden. Dies könnte helfen einen optimierten Prozess

für die unterschiedlichen Varianten zu verbessern und die Detergenzieneffizienz zu steigern.

Bei den Auslagerungsversuchen konnten die Rezyklate in einem Testmaßstab für spezielle Anwendungsfälle betrachtet werden. Positive und negative Massenänderungen durch Diffusionsprozesse waren das Resultat. Hier bedarf es weitere Untersuchungen, besonders in Hinsicht auf die negative Massenänderung des PS-Rezyklats durch die Auslagerung in Rapsöl. Bei möglichen Kontaminationen in Lebensmittel durch flüchtige Bestandteile kann es zu einer Beeinträchtigung des Öls führen. Ähnliche Versuche wurden hier bereits für andere pflanzliche Öle durchgeführt [52].

Weiters waren auch bei den Versuchen Degradationserscheinungen zu erkennen. Es könnte sich als sinnvoll erweisen für zukünftige Versuche Referenzproben bei den gewählten Temperaturen zu betrachten, um den Einfluss von Temperatur und Medium entkoppelt betrachten zu können.

Der Kunststoffbedarf steigt weiter an und mit dem Ziel einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft ist auch das Ziel des Recyclings von Kunststoffen weiter voranzutreiben. Neben der wissenschaftlichen Seite, die neue Erkenntnisse über die Recyclingthematik ergründet und der industriellen Seite, welche Recyclingprozesse optimiert und neue Anlagen schafft, ist der besonders auch der politische Apparat gefragt.

Regulierungen und Einschränkungen von Kunststoffverbunde, Vereinheitlichungen von Dekorationen für Kunststoffbehältnisse können den Recyclingprozess merklich verbessern. Ebenfalls könnten sich zu einem gewissen Grad, Subventionen für Firmen, die sich mit dieser Herausforderung beschäftigen, sowie höhere Investitionen in entsprechende Forschungsprojekte positiv auswirken. Auf gesellschaftlicher Ebene muss hier zusätzlich ein tieferes Verständnis und Bewusstsein für die Kreislaufwirtschaft geschaffen werden. Dabei besteht immer noch Aufklärungsbedarf hinsichtlich des Umgangs mit Abfall und dessen Wert, insbesondere im Hinblick auf die begrenzten Ressourcen.

Abschließend zeigten die Aspekte, die in dieser Forschungsarbeit dargelegt wurden, das mögliche Potential, im Bereich des Recyclings von Verpackungskunststoffen. Weitere wissenschaftliche Untersuchungen zu den Einflüssen im mechanischen Recycling könnten wertvolle Erkenntnisse für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft liefern. Vor allem bei den Sortier- und Waschprozessen gibt es noch bedeutende Chancen, den Einfluss auf die Qualität des Rezyklats zu optimieren und dessen Anwendbarkeit zu erhöhen. Die damit ansteigende Menge an Daten könnte zudem die Integration von Kunststoffrezyklaten in der Industrie weiter vorantreiben.

Abbildungsverzeichnis

1	Unterteilung der Kunststoffe [7]	4
2	Aufbau von Polyethylen [9]	5
3	Unterscheidung von Polyethylen nach unterschiedlicher Molekülstruktur [5]	6
4	Aufbau von Polypropylen[9]	8
5	Taktizitäten von Polypropylen[10]	8
6	Aufbau von Polystyrol[9]	9
7	Recycling-Codes[15]	11
8	Überblick der verwendeten Analysemethoden für die jeweiligen Materialien	17
9	Pre Consumer Becher	22
10	PP Post Consumer Becher	22
11	PS Post Consumer Becher	22
12	Überblick der Prüfkörperherstellung nach Anwendungsfall	25
13	rPS Mahlgut: aus dem Schredder (links) und der Schneidmühle (rechts) .	26
14	Joghurtbecher aus PS nach dem Stanzvorgang, horizontale (rechts) & vertikale Orientierung (links)	26
15	Prüfkörpergeometrie für den Zugversuch, Typ 5A [26]	27
16	Prüfkörpergeometrie für den Schlagzugversuch [27]	28
17	Schematischer Aufbau eines Einschneckenextruders [10]	31
18	Verwendeter Schredder und geschredderter Joghurtbecher	32
19	Versuchsaufbau der Auslagerungsversuche	34
20	Schematisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm für unterschiedliche Kunst- stoffe; a: Spröde Kunststoffe, b und c: Zähle Werkstoffe mit Streckpunkt, d: Zähle Werkstoffe ohne Streckpunkt und e: Elastomere Werkstoffe [28] .	36
21	Schematischer Aufbau der Apparatur für Schlagzugversuche [12]	38
22	Schematischer Aufbau eines FTIR [28]	39
23	Schematischer Aufbau der DSC; T_S ist die Proben temperatur, T_R die Temperatur der Referenz, \dot{Q}_P der Probe zugeführten Wärmemenge , \dot{Q}_R der Referenz zugeführten Wärmemenge [35]	43
24	Schematischer Aufbau der TGA [29]	44
25	Schematischer Aufbau eines MFR-Messgeräts [37]	46

26	Schematischer Aufbau eines Platte-Platte Rheometer [37]	47
27	Zusammenhang zwischen der Lage des cross-over-point und der Molmasse sowie der der Molmassenverteilung [37]	48
28	PP Pre Consumer bedruckt (Selsky Jogurt)	49
29	PS Pre Consumer bedruckt (Sauerrahm)	50
30	PP Post Consumer (Zott Sahne Joghurt)	50
31	PS Post Consumer (Obstgarten)	50
32	Massenänderung von 100 % rPP durch Auslagerung in Essig	51
33	Massenänderung von 100 % rPP durch Auslagerung in Öl	52
34	Massenänderung von 100 % rPS durch Auslagerung in Essig	53
35	Massenänderung von 100 % rPS durch Auslagerung in Öl	53
36	FTIR-Spektren der rHDPE-Gebinde mit PP Verunreinigung	54
37	FTIR-Spektren der rPP-Gebinde mit HDPE Verunreinigung	55
38	FTIR-Spektren der PP-Joghurtbecher	56
39	FTIR-Spektren der PS-Joghurtbecher	57
40	FTIR-Spektren der 100 % rPP Joghurtbechern nach Mehrfachextrusion .	58
41	FTIR-Spektren der 100 % rPS Joghurtbechern nach Mehrfachextrusion .	58
42	FTIR-Spektren der PP Post Consumer Joghurtbecher (NÖM Jogurt) . .	59
43	FTIR-Spektren des 100 % PP-Rezyklat nach Auslagerung in Essig	60
44	FTIR-Spektren des 100 % PP-Rezyklat nach Auslagerung in Öl	61
45	FTIR-Spektren des 100 % PS-Rezyklat nach Auslagerung in Essig	61
46	FTIR-Spektren des 100 % PS-Rezyklat nach Auslagerung in Öl	62
47	Viskositätskurven der rHDPE-Gebinde mit PP-Verunreinigungen	64
48	Frequenztests der rPP-Gebinde mit HDPE-Verunreinigung	65
49	Frequenztests der rPP-Joghurtbecher	66
50	Frequenztests der rPS-Joghurtbecher	67
51	Frequenztests der rPP-Proben (100 % Rezyklat) nach Mehrfachextrusion	68
52	Frequenztests der rPS-Proben (100 % Rezyklat) nach Mehrfachextrusion	69
53	Frequenztests der PP Pre Consumer Joghurtbecher unbedruckt (Selsky Jogurt)	70
54	Frequenztests der PP Post Consumer Joghurtbecher (NÖM Joghurt) . .	70
55	Frequenztests der PS Pre Consumer Joghurtbecher bedruckt (Sauerrahm)	71
56	Frequenztests der PS Post Consumer Joghurtbecher (Obstgarten)	71
57	Ergebnisse des Zugversuchs für die rHDPE-Gebinde mit PP-Verunreinigungen	74
58	Ergebnisse des Zugversuchs für die rPP-Gebinde mit HDPE-Verunreinigungen	75

59	Kerb-Schlagzugzähigkeit der HDPE-PP Blends	76
60	Richtungsabhängigkeit der PS-Joghurtbecher dargestellt im Spannungs- Dehnungs-Diagramm	77
61	Richtung- und Positionsabhängigkeit der PP-Joghurtbecher dargestellt im Spannungs-Dehnungs-Diagramm	78
62	Ergebnisse des Zugversuchs für die horizontal gestanzten Proben der rPS Joghurtbecher	79
63	Ergebnisse des Zugversuchs für die horizontal gestanzten Proben der rPP Joghurtbecher	80
64	Kerb-Schlagzugzähigkeit der PP und PS Joghurtbecher	81
65	Ergebnisse des Zugversuchs für die Mehrfachextrusion der 100 % rPP Joghurtbecher	83
66	Ergebnisse des Zugversuchs für die Mehrfachextrusion der 100 % rPS Joghurtbecher	84
67	Kerb-Schlagzugzähigkeit der 100 % igen rPP und rPS Joghurtbecher nach Mehrfachextrusion	85
68	Ergebnisse des Zugversuchs für die ausgelagerten 100% rPP-Proben . . .	87
69	Ergebnisse des Zugversuchs für die ausgelagerten 100% rPS-Proben . . .	88
70	Auslagerungsversuche mit Essig nach 14 Tagen bei unterschiedlichen Tem- peraturen, links: Raumtemperatur, mitte: 40°C, rechts: 60°C	90
71	Biologischer Rückstand nach 14 Tagen bei der Essigfraktion und Raum- temperatur	91
72	PP Post Consumer (NÖM Joghurt) nach der Wäsche mit 2 m% NaOH .	109
73	PS Post Consumer clever cottage cheese	109
74	FTIR-Spektren der PP Pre Consumer Joghurtbecher (Selsky)	110
75	FTIR-Spektren der PP Pre Consumer Joghurtbecher (Selsky)	110
76	FTIR-Spektren der PS Pre Consumer Joghurtbecher (Sauerrahm bedruckt)	111
77	FTIR-Spektren der PS Pre Consumer Joghurtbecher (Sauerrahm unbe- druckt)	111
78	FTIR-Spektren der PP Post Consumer Joghurtbecher (ZOTT)	112
79	FTIR-Spektren der PP Post Consumer Joghurtbecher (K3)	112
80	FTIR-Spektren der PS Post Consumer Joghurtbecher (clever cottage cheese)	113
81	FTIR-Spektren der PS Post Consumer Joghurtbecher (Obstgarten) . . .	113
82	DSC-Kurve der HDPE-Rezyklate mit PP-Verunreinigung	114

83	DSC-Kurve von rHDPE weiß	114
84	DSC-Kurve von rPP weiß	115
85	DSC-Kurve der PP-Rezyklate mit HDPE-Verunreinigung	115
86	DSC-Kurve von 100 %rPP	116
87	TGA-Kurve von 100 %rPP	116
88	DSC-Kurve von 100 %rPS	116
89	TGA-Kurve von 100 %rPS	117
90	Frequenztests der PP Pre Consumer Joghurtbecher bedruckt (Selsky Joghurt)	117
91	Frequenztests der PP Post Consumer Joghurtbecher (K3)	118
92	Frequenztests der PP Post Consumer Joghurtbecher (Zott)	118
93	Frequenztests der PS Pre Consumer Joghurtbecher unbedruckt (Sauerrahm)	119
94	Frequenztests der PS Post Consumer Joghurtbecher unbedruckt (clever cottage cheese)	119

Tabellenverzeichnis

1	rHDPE-Fraktion weiß	18
2	rHDPE-Fraktion bunt	18
3	HDPE BorePure MB6561 [24]	18
4	rPP-Fraktion weiß	19
5	rPP-Fraktion bunt	19
6	PP HC600TF (PP2) [25]	20
7	rPP-Becher	20
8	rPS-Becher	21
9	Materialien der Waschversuche	23
10	Rapsöl	24
11	Apfelessig	24
12	Natriumhydroxid	24
13	Pressprogramm der Presse für HDPE Prüfplatten	27
14	Maße des Prüfkörpers, Typ 5A aus der Abbildung 15	28
15	Prüfkörpergeometrien für den Schlagzugversuch	29
16	Pressprogramme der Presse für Rheologieproben	30
17	Temperaturprogramm des Extruders nach Material	31
18	Wichtigsten Kennwerte des Zugversuchs [26]	37
19	Übersicht der charakteristischen Absorptionsbande für HDPE, PP und PS [31]	41
20	Cross-Over Punkte der rPP-Gebinde mit HDPE-Kontamination	65
21	Cross-Over Punkte der rezyklierten PP-Joghurtbecher	66
22	Cross-Over Punkte der rezyklierten PS-Joghurtbecher	67
23	Cross-Over Punkte der 100 % rPP-Joghurtbecher nach Mehrfachextrusion	68
24	Cross-Over Punkte der 100 % rPS-Joghurtbecher nach Mehrfachextrusion	69
25	Schnittpunkte der Speicher- und Verlustmoduln für die PP-Joghurtbecher der Waschversuche	72
26	Schnittpunkte der Speicher- und Verlustmoduln für die PS-Joghurtbecher der Waschversuche	73
27	Ergebnisse der mechanischen Analyse für die rHDPE-PP-Blends	76

28	Ergebnisse der mechanischen Analyse für die rPS-Joghurtbecher	81
29	Ergebnisse der mechanischen Analyse für die rPP-Joghurtbecher	82
30	Ergebnisse der mechanischen Analyse für die Mehrfachextrusion der 100% rPP Joghurtbecher	85
31	Ergebnisse der mechanischen Analyse für die Mehrfachextrusion der 100% rPS Joghurtbecher	86
32	Ergebnisse der mechanischen Analyse für Auslagerungsversuche des 100 %igen PP-Rezyklat	88
33	Ergebnisse der mechanischen Analyse für Auslagerungsversuche des 100 %igen PS-Rezyklat	89

Literatur

- [1] „The Circular Economy for Plastics A European Analysis,“ Techn. Ber., 2024. Adresse: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-analysis-2024/>.
- [2] R. Geyer, J. R. Jambeck und K. L. Law, „Production, use, and fate of all plastics ever made,“ Techn. Ber., 2017. Adresse: <https://www.science.org>.
- [3] Heinrich-Böll-Stiftung, *Plastikatlas : Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff*. 2019, ISBN: 9783869282008.
- [4] W. W. Seidel und F. Hahn, *Werkstofftechnik : Werkstoffe - Eigenschaften - Prüfung - Anwendung* (Lernbücher der Technik), ger, 11., aktualisiert..., F. Hahn, Hrsg. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2018, ISBN: 3446456880. DOI: 10.3139/9783446456884.
- [5] H. Domininghaus, *Kunststoffe*, P. Elsner, P. Eyerer und T. Hirth, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, ISBN: 978-3-642-16172-8. DOI: 10.1007/978-3-642-16173-5. Adresse: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-16173-5>.
- [6] G. Abts, *Kunststoff-Wissen für Einsteiger : Grundlagen, Eigenschaften und Recycling polymerer Werkstoffe*, ger, 4., aktualisierte... München: Hanser, 2020, ISBN: 3446465251. DOI: 10.3139/9783446465251.
- [7] W. Kaiser, *Kunststoffchemie für Ingenieure : von der Synthese bis zur Anwendung*, ger, 5., neu bearbeite... München: Hanser, 2021, ISBN: 3446466029. DOI: 10.3139/9783446466029.
- [8] S. Koltzenburg, M. Maskos und O. Nuyken, *Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen*, ger, 2nd ed. 2024, M. Maskos und O. Nuyken, Hrsg. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Spektrum, 2024, ISBN: 3662646013. DOI: 10.1007/978-3-662-64601-4.
- [9] *HDPE, LDPE, PP, PS, PU, PVC... und was sich dahinter verbirgt*, Zugriffsdatum: 16/07/2024. Adresse: <https://blog.ratioform.at/hdpe-ldpe-pp-pvc-und-was-sich-dahinter-verbirgt-eine-materialkunde/>.

- [10] Eyerer Peter, *Polymer Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-72419-3.
- [11] B. Arnold, „Thermoplastische Kunststoffe,“ ger, in *Werkstofftechnik für Wirtschaftsingenieure*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 233–263, ISBN: 9783662545478. DOI: 10.1007/978-3-662-54548-5{_}10.
- [12] E. Baur, G. Harsch und M. Moneke, *Werkstoff-Führer Kunststoffe : Eigenschaften - Prüfungen - Kennwerte*, ger, 11., aktualisiert..., G. Harsch und M. Moneke, Hrsg. München: Hanser, 2019, ISBN: 3446460675. DOI: 10.3139/9783446460676.
- [13] R. Francis, *Recycling of polymers : methods, characterization and applications*, ger, 1st ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2017, ISBN: 3527689095.
- [14] J.-P. Lange, „Managing Plastic Waste Sorting, Recycling, Disposal, and Product Redesign,“ eng, *ACS sustainable chemistry & engineering*, Jg. 9, Nr. 47, S. 15 722–15 738, 2021, ISSN: 2168-0485. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c05013.
- [15] *Plastic recycling symbols | what the numbers mean*. Adresse: <https://www.sustainabilitypathways.com.au/plastic-recycling-symbols/>.
- [16] B. D. Vogt, K. K. Stokes und S. K. Kumar, „Why is Recycling of Postconsumer Plastics so Challenging?“ eng, *ACS applied polymer materials*, Jg. 3, Nr. 9, S. 4325–4346, 2021, ISSN: 2637-6105. DOI: 10.1021/acsapm.1c00648.
- [17] C. Neubauer, B. Stoiff, M. Tesar und P. Thaler, *REPORT REP-0744 Wien 2021, 2. korrigierte Auflage SORTIERUNG UND RECYCLING VON KUNSTSTOFFABFÄLLEN IN ÖSTERREICH: STATUS 2019*, ISBN: 9783990045657. Adresse: <http://www.umweltbundesamt.at/>.
- [18] Rudolph Natalie, *Einführung Kunststoffrecycling*. München: Carl Hanser Verlag München, 2020.
- [19] *Plastikmüll und Recycling in der EU: Zahlen und Fakten | Themen | Europäisches Parlament*. Adresse: <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20181212ST021610/plastikmull-und-recycling-in-der-eu-zahlen-und-fakten>.
- [20] G. Ragonnaud, „Revision of the Packaging and Packaging Waste Directive,“
- [21] Beuth-Verlag, *DIN SPEC 91446, Klassifizierung von Kunststoff-Rezyklaten durch Datenqualitätslevels für die Verwendung und den (internetbasierten) Handel*, Dez. 2021.

- [22] Deutsches Institut für Normung, *DIN 50035 Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien-Polymere Werkstoffe*, 2012. Adresse: www.din.de.
- [23] N. Niessner, *Recycling of plastics*, eng, 1st ed., N. Niessner, Hrsg. Munich, Germany: Hanser, 2022, ISBN: 1569908575.
- [24] Borealis AG, „Datenblatt BorPure MB6561,“ Techn. Ber., 2016.
- [25] Borealis AG, „Datenblatt HC600TF,“ Techn. Ber., 2019.
- [26] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 527 Bestimmung der Zugeigenschaften*, 2019.
- [27] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 8256 Kunststoffe Bestimmung der Schlagzugähigkeit*, 2005.
- [28] W. Grellmann und S. Seidler, *Kunststoffprüfung*, ger, 2. Aufl., S. Seidler, Hrsg. München: Hanser, 2011, ISBN: 3446429700.
- [29] P. Eyerer, H. Schüle und P. Elsner, *Polymer Engineering 3: Werkstoff- und Bauteilprüfung, Recycling, Entwicklung*, ger, 2nd ed. 2020, P. Eyerer, H. Schüle und P. Elsner, Hrsg. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Vieweg, 2020, ISBN: 3662598396. DOI: 10.1007/978-3-662-59839-9.
- [30] S. Thomas, Y. Grohens, P. Jyotishkumar und M. M. Abolhasani, *Characterization of polymer blends : miscibility, morphology and interfaces*, eng, 1st ed., S. Thomas, Y. Grohens, P. Jyotishkumar und M. M. Abolhasani, Hrsg. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2015, ISBN: 3527645616.
- [31] M. R. Jung u. a., „Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms,“ *Marine Pollution Bulletin*, Jg. 127, S. 704–716, Feb. 2018, ISSN: 18793363. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.12.061.
- [32] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 11357-1 Kunststoffe - Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) - Teil 1: Allgemeine Grundlagen*, Juni 2023.
- [33] Deutsches Institut für Normung, *DIN 51007 Thermische Analyse(TA)-Differenz-Thermoanalyse (DTA) und Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)*, Apr. 2019.
- [34] G. W. Ehrenstein, G. Riedel und P. Trawiel, *Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen*, ger, 2., völlig überar..., G. Riedel und P. Trawiel, Hrsg. München: Hanser, 2003, ISBN: 3446223401.

- [35] A. Frick, C. Stern und V. Muralidharan, *Practical testing and evaluation of plastics*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2019, S. 227, ISBN: 9783527334117.
- [36] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 1133-1 Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR)*, 2022.
- [37] T. Schröder, *Rheologie der Kunststoffe : Theorie und Praxis*, ISBN: 9783446461512.
- [38] E. Commission, J. R. Centre, A. Mieth, C. Simoneau und E. Hoekstra, *Guidance for the identification of polymers in multilayer films used in food contact materials – User guide of selected practices to determine the nature of layers*. Publications Office, 2016. DOI: doi/10.2788/10593.
- [39] A. Mieth, E. Hoekstra und C. Simoneau, *Guidance for the identification of polymers in multilayer films used in food contact materials : user guide of selected practices to determine the nature of layers*. Publications Office, 2016, S. 69, ISBN: 9789279575617.
- [40] A. Rjeb u. a., „IR spectroscopy study of polypropylene natural aging,“ *Journal of Applied Polymer Science*, Jg. 77, Nr. 8, S. 1742–1748, Aug. 2000, ISSN: 00218995. DOI: 10.1002/1097-4628(20000822)77:8<1742::AID-APP11>3.0.CO;2-T.
- [41] H. Zhang, J. Ma, Y. Miao, T. Tuchiya und J. Y. Chen, „Analysis of carbonyl value of frying oil by fourier transform infrared spectroscopy,“ *Journal of Oleo Science*, Jg. 64, Nr. 4, S. 375–380, März 2015, ISSN: 13473352. DOI: 10.5650/jos.ess14201.
- [42] A. Jansson, K. Möller und T. Hjertberg, „Chemical degradation of a polypropylene material exposed to simulated recycling,“ *Polymer Degradation and Stability*, Jg. 84, Nr. 2, S. 227–232, Mai 2004, ISSN: 01413910. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2003.10.016.
- [43] E. Karaagac, T. Koch und V. M. Archodoulaki, „The effect of PP contamination in recycled high-density polyethylene (rPE-HD) from post-consumer bottle waste and their compatibilization with olefin block copolymer (OBC),“ *Waste Management*, Jg. 119, S. 285–294, Jan. 2021, ISSN: 18792456. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.10.011.
- [44] Z. O. Schyns und M. P. Shaver, *Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review*, Feb. 2021. DOI: 10.1002/marc.202000415.
- [45] G. Guerrica-Echevarria, J. I. Eguiazaibal und J. Nazaibal, „Effects of reprocessing conditions on the properties of unfilled and talc-filled polypropylene,“ *Techn. Ber.*, S. 19–27.

- [46] J. Aurrekoetxea, M. A. Sarrionandia, I. Urrutibeascoa und M. LI MASPOCH, „Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic polypropylene,“ *Techn. Ber.*
- [47] H. M. Da Costa, V. D. Ramos und M. C. Rocha, „Rheological properties of polypropylene during multiple extrusion,“ *Polymer Testing*, Jg. 24, Nr. 1, S. 86–93, Feb. 2005, ISSN: 01429418. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2004.06.006.
- [48] C. Spicker, N. Rudolph, I. Kühnert und C. Aumnate, „The use of rheological behavior to monitor the processing and service life properties of recycled polypropylene,“ *Food Packaging and Shelf Life*, Jg. 19, S. 174–183, März 2019, ISSN: 22142894. DOI: 10.1016/j.fpsl.2019.01.002.
- [49] 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*, Jg. 96, Nr. 8, S. 1489–1496, 2011, ISSN: 01413910. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2011.05.005.
- [50] P. W. Atkins, C. A. Trapp und J. de Paula, *Physikalische Chemie : Arbeitsbuch. Arbeitsbuch physikalische Chemie : Lösungen zu den Aufgaben / Peter W. Atkins ; Charles A. Trapp. Übers. u. bearb. v. Michael Zillgitt*, ger, 2. Aufl., C. A. Trapp, P. W. Atkins und J. de Paula, Hrsg. Weinheim: Wiley-VCH, 1996, ISBN: 3527293183.
- [51] A. M. Riquet, N. Wolff, S. Laoubi, J. M. Vergnaud und A. Feigenbaum, „Food and packaging interactions: Determination of the kinetic parameters of olive oil diffusion in polypropylene using concentration profiles,“ *Food Additives and Contaminants*, Jg. 15, Nr. 6, S. 690–700, 1998, ISSN: 14645122. DOI: 10.1080/02652039809374699.
- [52] M. S. Tawfik und A. Huyghebaert, „Interaction of packaging materials and vegetable oils: oil stability,“ *Food Chemistry*, Jg. 64, Nr. 4, S. 451–459, März 1999, ISSN: 0308-8146. DOI: 10.1016/S0308-8146(97)00202-1.

6 Anhang

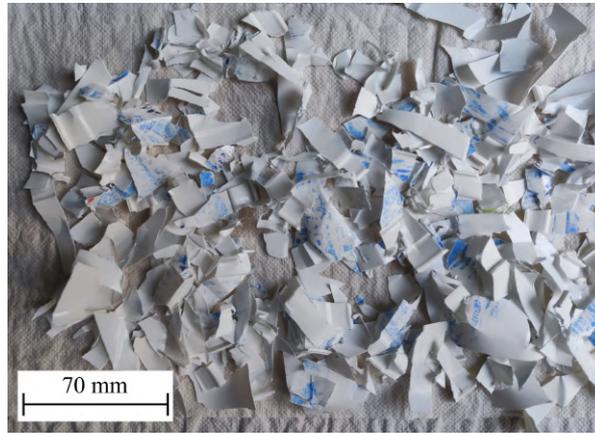


Abbildung 72 PP Post Consumer (NÖM Joghurt) nach der Wäsche mit 2 m% NaOH



(a) vor der Wäsche



(b) nach der Wäsche mit 2 m% NaOH

Abbildung 73 PS Post Consumer clever cottage cheese

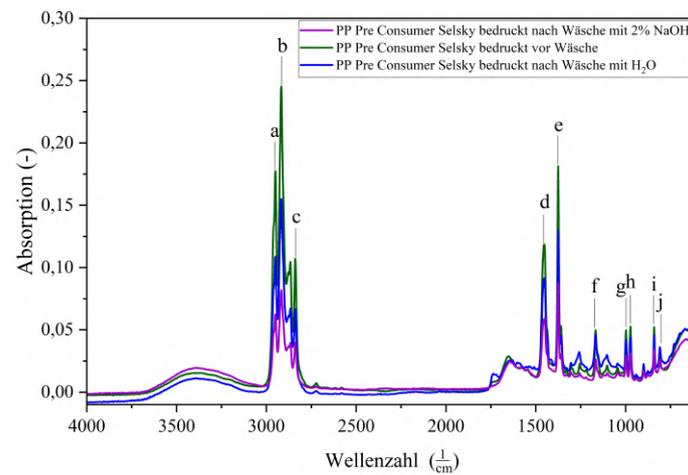


Abbildung 74 FTIR-Spektren der PP Pre Consumer Joghurtbecher (Selsky)

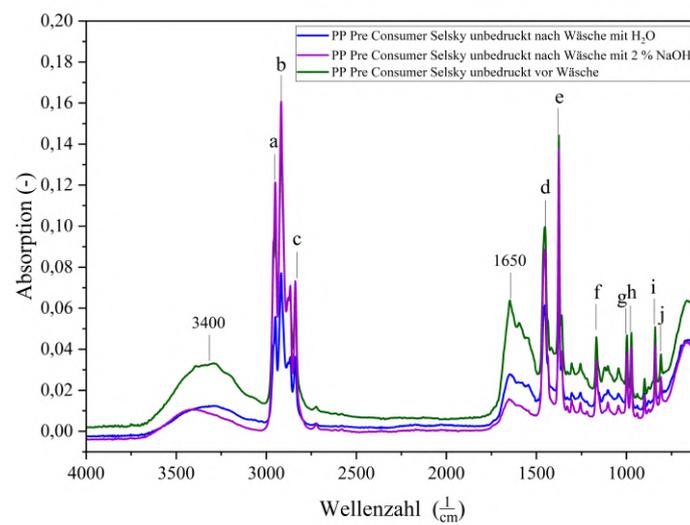


Abbildung 75 FTIR-Spektren der PP Pre Consumer Joghurtbecher (Selsky)

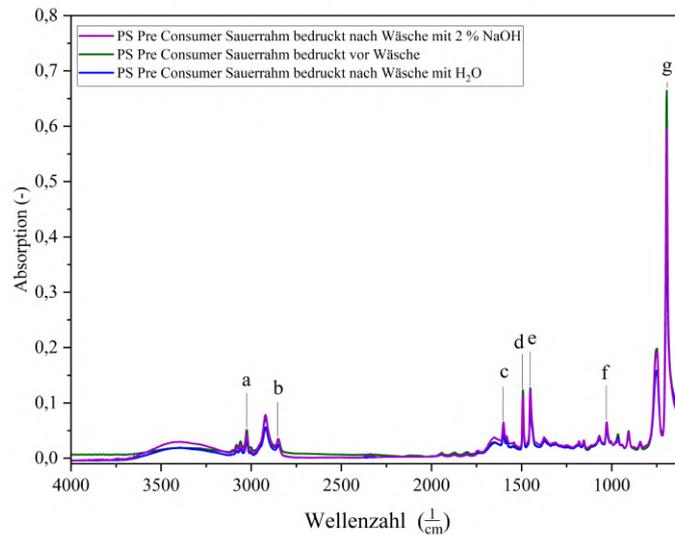


Abbildung 76 FTIR-Spektren der PS Pre Consumer Joghurtbecher (Sauerrahm bedruckt)

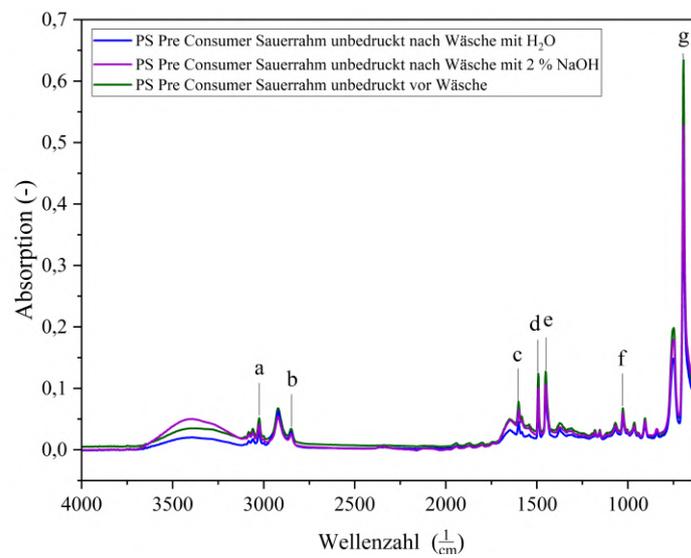


Abbildung 77 FTIR-Spektren der PS Pre Consumer Joghurtbecher (Sauerrahm unbedruckt)

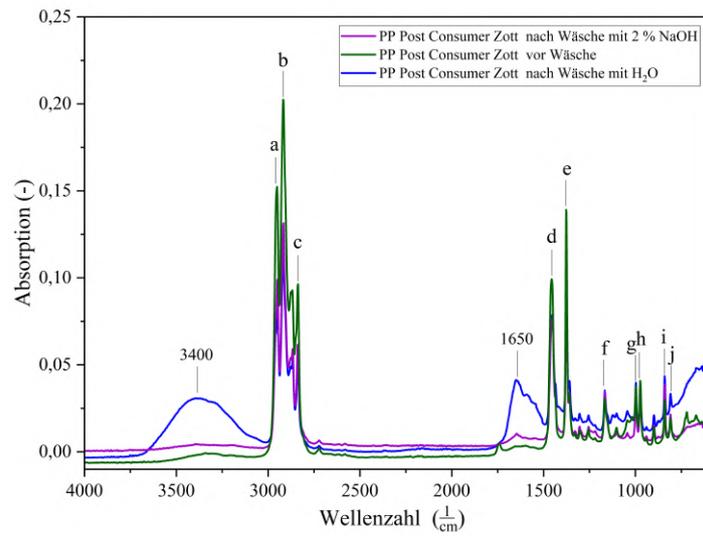


Abbildung 78 FTIR-Spektren der PP Post Consumer Joghurtbecher (ZOTT)

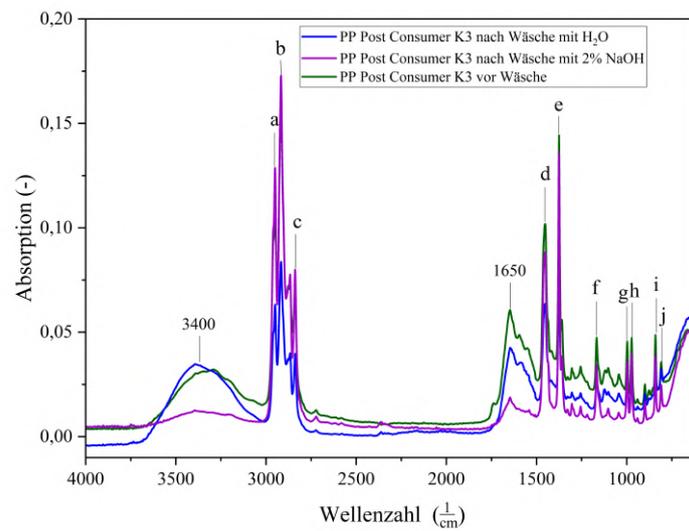


Abbildung 79 FTIR-Spektren der PP Post Consumer Joghurtbecher (K3)

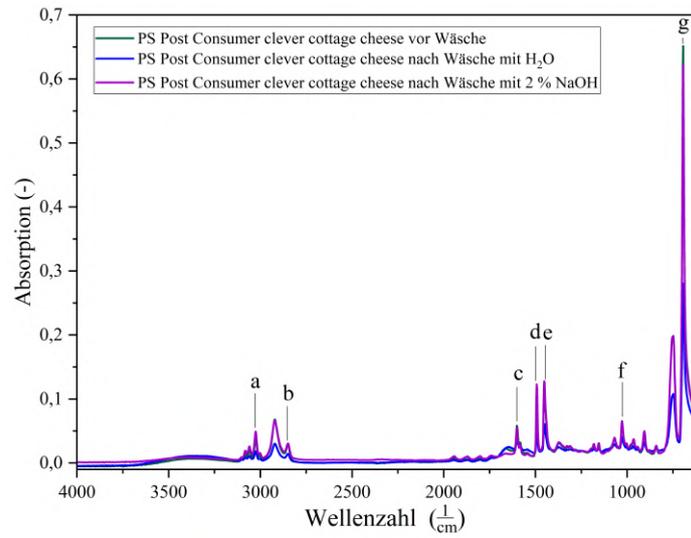


Abbildung 80 FTIR-Spektren der PS Post Consumer Joghurtbecher (clever cottage cheese)

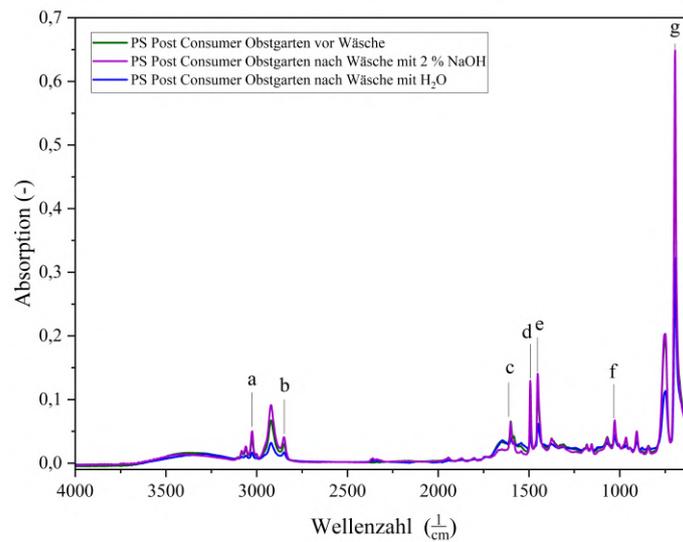


Abbildung 81 FTIR-Spektren der PS Post Consumer Joghurtbecher (Obstgarten)

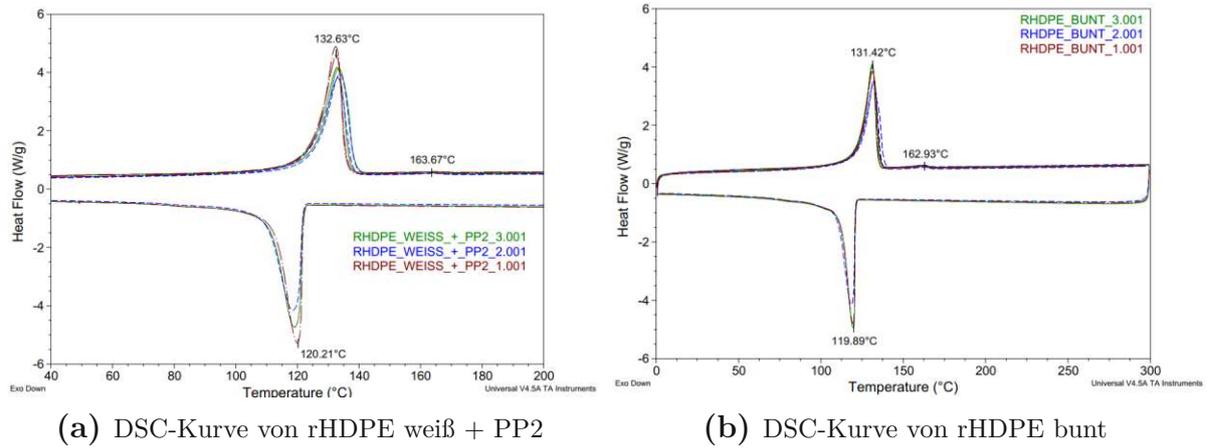
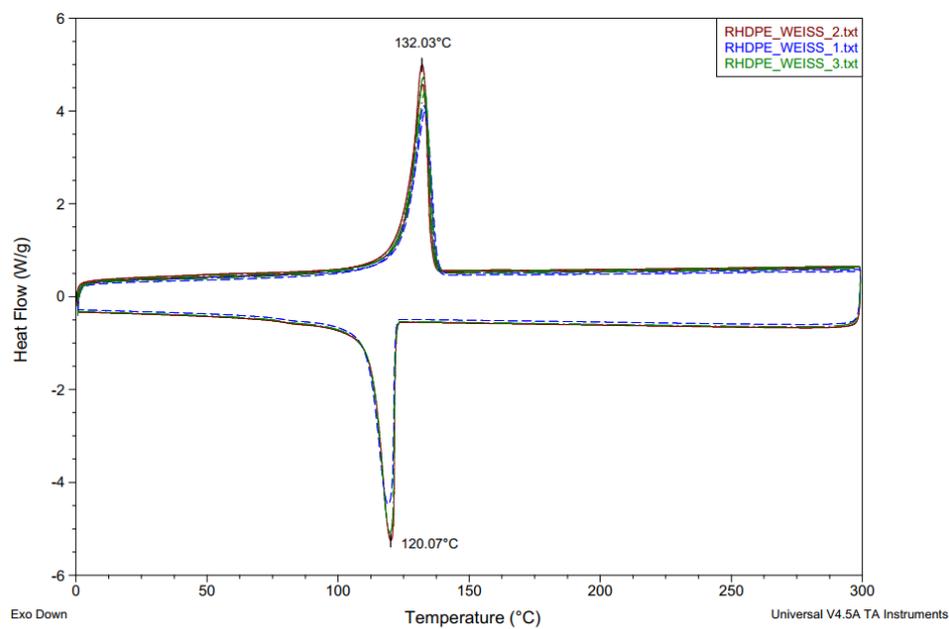


Abbildung 82 DSC-Kurve der HDPE-Rezyklate mit PP-Verunreinigung



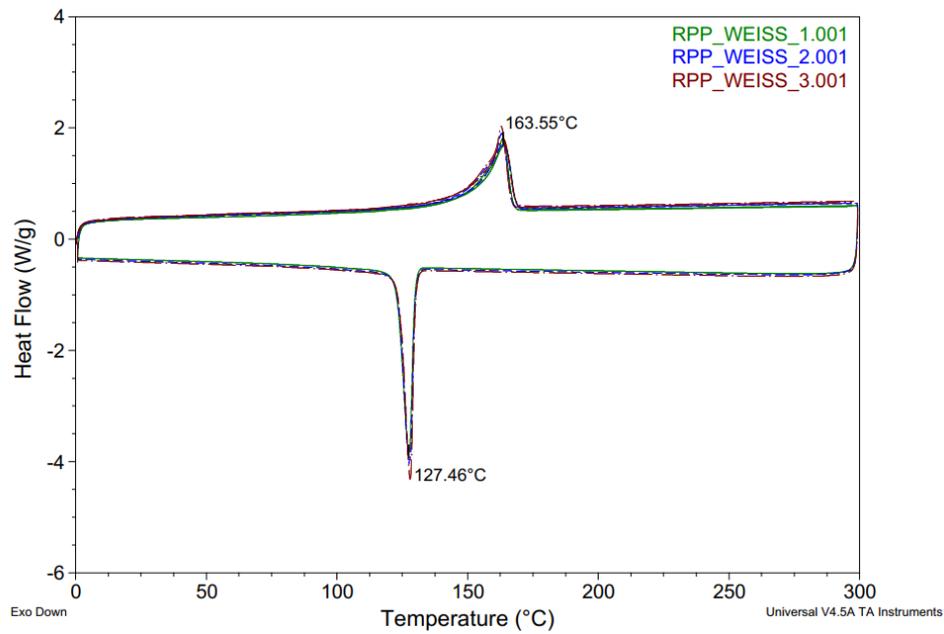
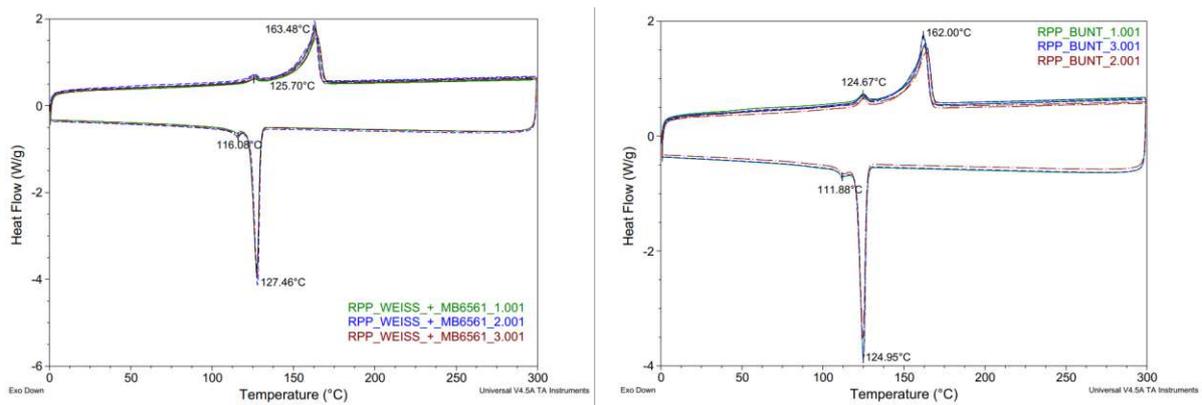


Abbildung 84 DSC-Kurve von rPP weiß



(a) DSC-Kurve von rPP weiß + MB6561

(b) DSC-Kurve von rPP bunt

Abbildung 85 DSC-Kurve der PP-Rezyklate mit HDPE-Verunreinigung

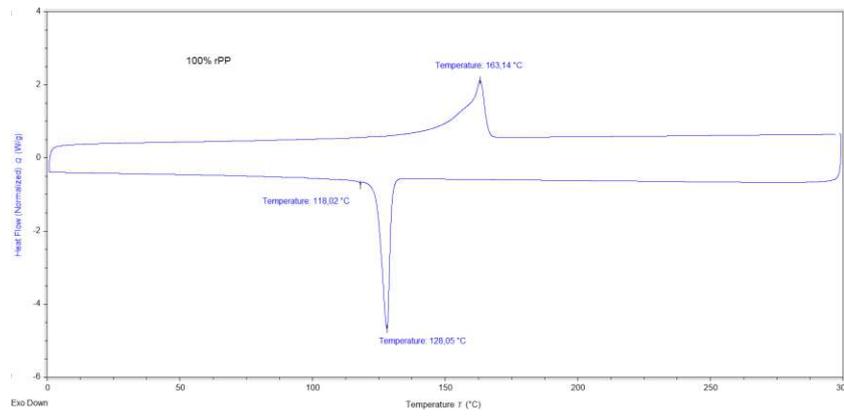


Abbildung 86 DSC-Kurve von 100 %rPP

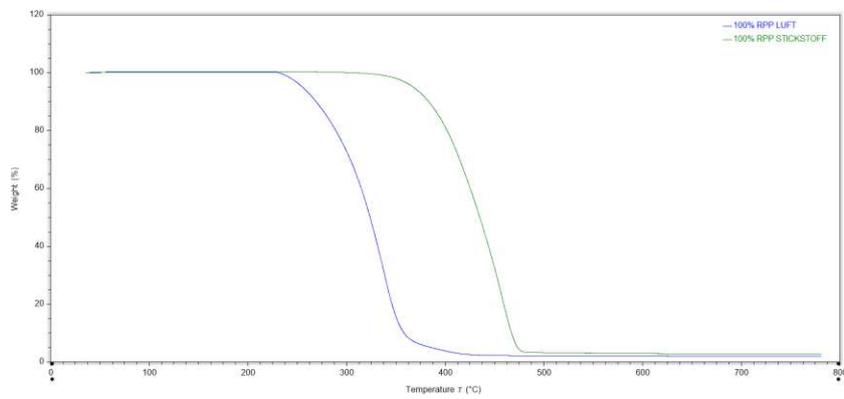


Abbildung 87 TGA-Kurve von 100 %rPP

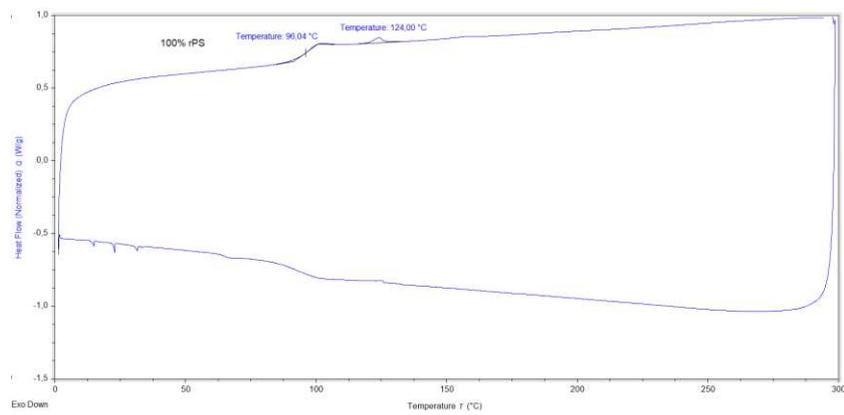


Abbildung 88 DSC-Kurve von 100 %rPS

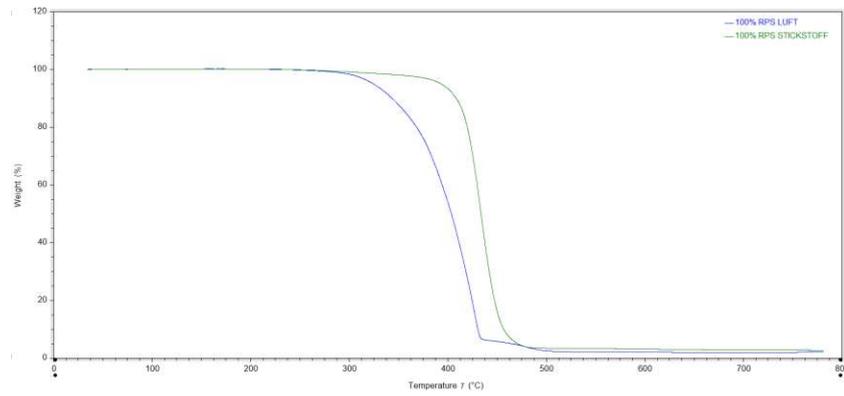
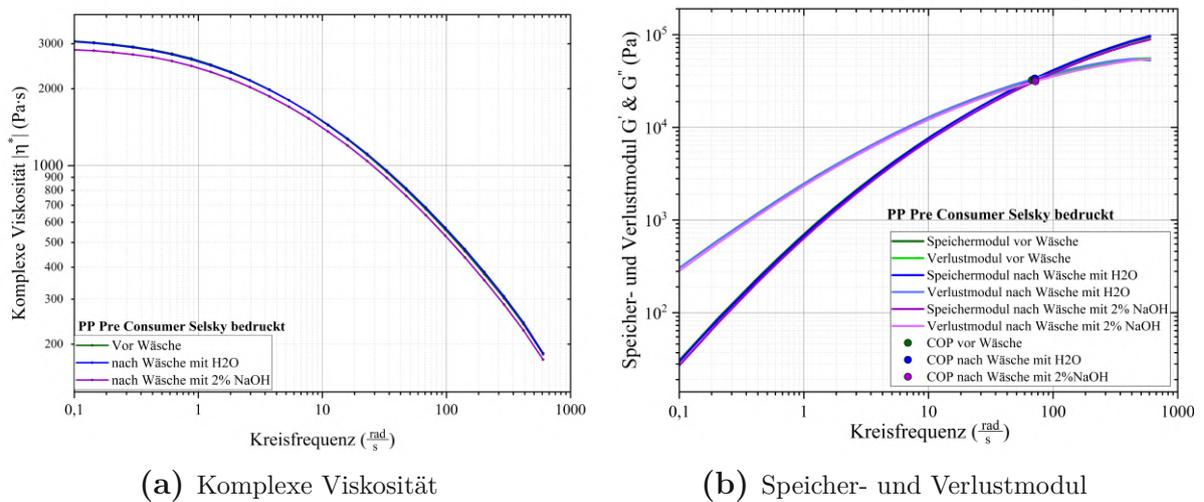


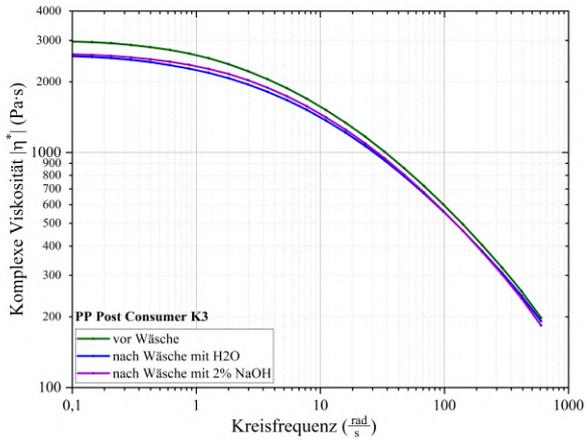
Abbildung 89 TGA-Kurve von 100 %rPS



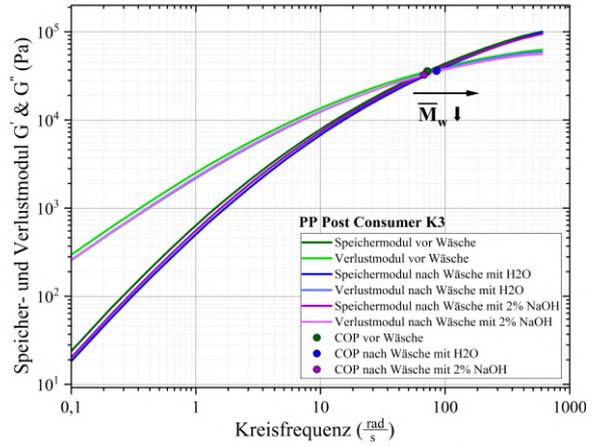
(a) Komplexe Viskosität

(b) Speicher- und Verlustmodul

Abbildung 90 Frequenztests der PP Pre Consumer Joghurtbecher bedruckt (Selsky Jogurt)

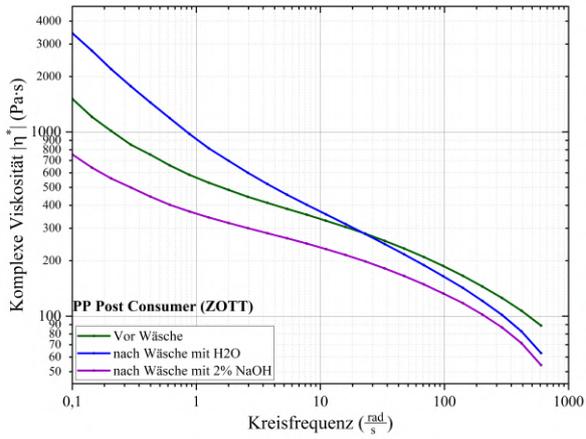


(a) Komplexe Viskosität

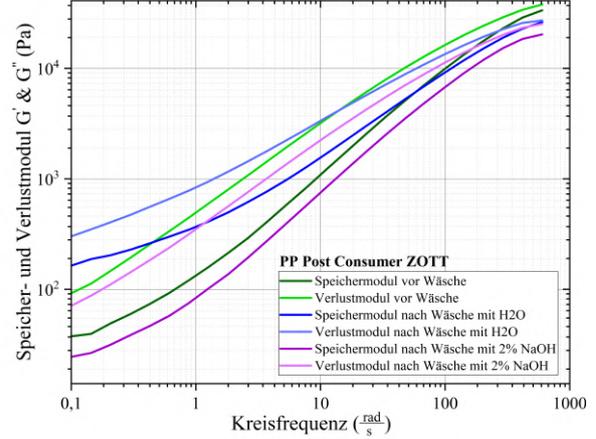


(b) Speicher- und Verlustmodul

Abbildung 91 Frequenztests der PP Post Consumer Joghurtbecher (K3)

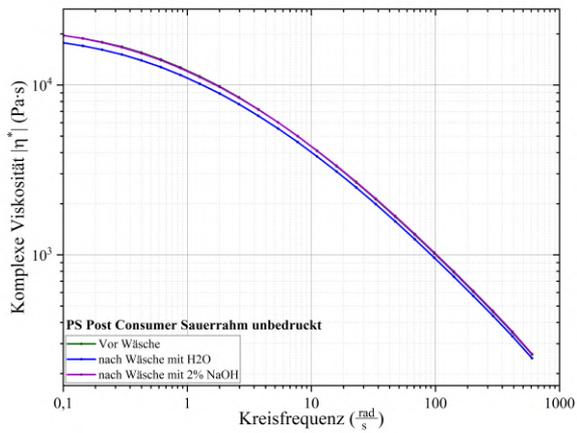


(a) Komplexe Viskosität

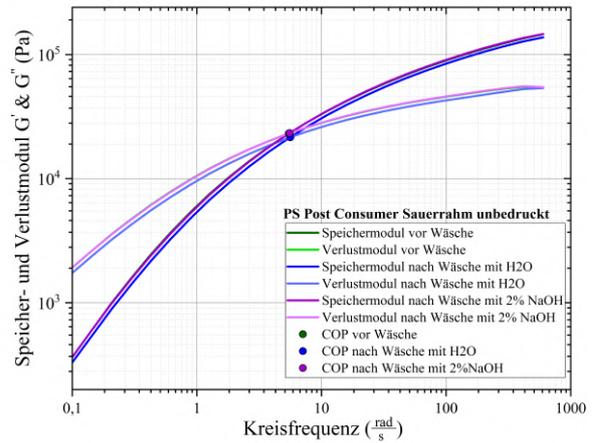


(b) Speicher- und Verlustmodul

Abbildung 92 Frequenztests der PP Post Consumer Joghurtbecher (Zott)

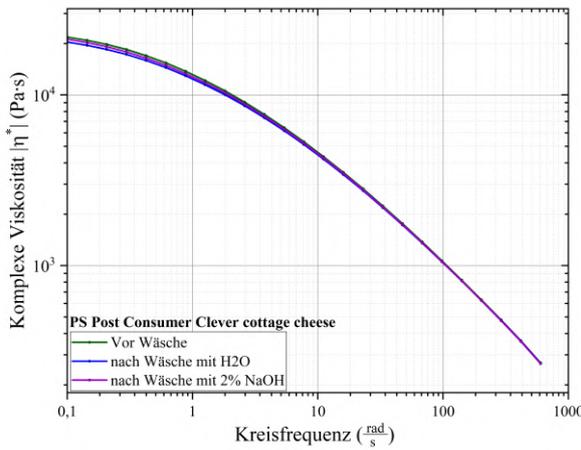


(a) Komplexe Viskosität

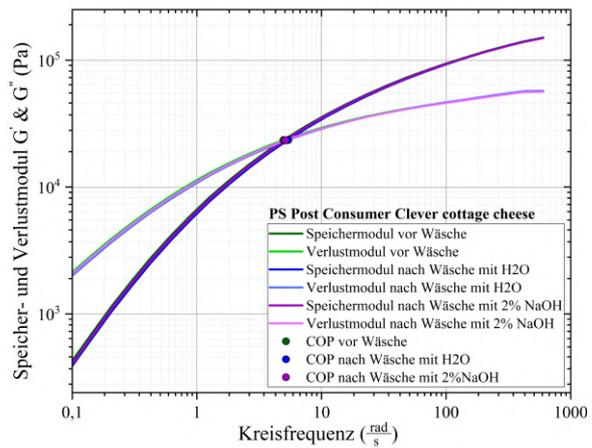


(b) Speicher- und Verlustmodul

Abbildung 93 Frequenztests der PS Pre Consumer Joghurtbecher unbedruckt (Sauerrahm)



(a) Komplexe Viskosität



(b) Speicher- und Verlustmodul

Abbildung 94 Frequenztests der PS Post Consumer Joghurtbecher unbedruckt (clever cottage cheese)