Diplomarbeit

Mechanisches Recycling von Polystyrol - Herausforderungen und Möglichkeiten

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

unter der Leitung von

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

und mitbetreut von

Projektass. Dipl.-Ing. Martina Seier

Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, E308

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Fabian Bittner, BSc

01526113

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Eidesstattliche Erklärung

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

Diplomarbeit

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

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland einem_einer Beurteiler_in zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der von den Begutachter_innen beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Datum, Ort

Unterschrift

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Kurzfassung

Kurzlebige Verpackungen wie z.B. Joghurtbecher werden abwechselnd aus Polystyrol oder Polypropylen gefertigt. Die Verpackung landet am Ende ihrer Lebensdauer vermischt im Müll und erschwert somit die Wiederverwertung der Kunststoffe. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Recycelbarkeit von PS und PP. Hierfür wird das Alterungsverhalten und das Potential der Blendbildung untereinander mit Kompatibilisierungsmittel untersucht. Die Alterung wird im Ofen bei 80 °C bei normaler Atmosphäre über 50 Tage oder durch zehnmaliges Extrudieren bei 200 °C und anschließendes Mahlen simuliert. Es werden reine Blends und Blends mit den Kompatibilisierungsmitteln Lucofin und Polystyrol-block-polyisopren-block-polystyrol hergestellt. Um die Eigenschaften der Proben quantitativ zu erfassen, kommen Zugversuch, Schlagzugversuch, MFR-Messung und Viskositätsmessung am Rheometer zum Einsatz. Abschließend wird eine Versuchsreihe mit Material aus recycelten Joghurtbechern durchgeführt um die Ergebnisse dieser Arbeit zu validieren. Während der Arbeit wurde festgestellt, das High Impact Polystyrol den verwendeten Alterungsmethoden am besten widersteht und sich aus verunreinigtem recycelten Material Blends mit vergleichbaren Eigenschaften wie Reinmaterialien erzeugen lassen. Aufgrund der Alterungsbeständigkeit von HIPS sollte dieses zukünftig für kurzlebiges Verpackungsmaterial eingesetzt werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Abstract

Short-life packaging such as yoghurt pots are alternately made of polystyrene or polypropylene. At the end of its life, the packaging ends up mixed in the rubbish, making it difficult to recycle the plastics. This paper deals with the recyclability of PS and PP. For this purpose, the ageing behaviour and the potential of blending among each other is investigated with compatibilising agents. Ageing is simulated in an oven at 80 °C in a normal atmosphere for 50 days or by extrusion ten times at 200 °C and subsequent grinding. Pure blends and blends with the compatibilisers Lucofin and Polystyrene-block-polyisoprene-block-polystyrene are prepared. Tensile tests, impact tensile tests, MFR measurements and viscosity measurements on the rheometer are used to quantitatively determine the properties of the samples. Finally, a series of tests is carried out with material from recycled yoghurt pots to validate the results of this work. During the work it was found that High Impact Polystyrene resists the ageing methods used best and that blends with comparable properties to pure materials can be produced from contaminated recycled material. Due to the ageing resistance of HIPS, it should be used in the future for short-life packaging materials.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Zielsetzung . . . 1

1.2 Ursprung der Kunststoffe . . . 2

1.3 Einteilung von Kunststoffen . . . 3

1.4 Alterung von Kunststoffen . . . 5

1.4.1 Thermische und thermo-oxidative Alterung . . . 5

1.4.2 Alterung durch mechanische Energie . . . 6

1.5 Polystyrol (PS) . . . 7

1.5.1 Alterung von PS . . . 8

1.6 Polypropylen (PP) . . . 9

1.6.1 Alterung von PP . . . 10

1.7 Mischungen von Polymeren . . . 10

1.7.1 Copolymer . . . 11

1.7.2 Blends . . . 11

1.8 Recycling von Kunststoffen . . . 11

1.8.1 Recyclingkreisläufe . . . 13

1.8.2 Arten von Kunststoffrecycling . . . 14

1.8.3 Werkstoffliches Recycling . . . 15

1.8.4 Rohstoffliches Recycling . . . 15

1.8.5 Thermische Verwertung . . . 17

1.8.6 Recycling in Österreich und der EU . . . 18

2 Werkstoffe und Methoden **22**

2.1 Werkstoffe . . . 22

2.1.1 Synthos PS GP 152 'PSGP' . . . 22

2.1.2 Synthos PS HI 562E 'HIPS' . . . 23

2.1.3 Borealis Polypropylene HC600TF 'PP2' . . . 23

2.2 Kompatibilisierungsmittel . . . 24

2.2.1 Lucofin 1492M HG 'LUCO' . . . 24

2.2.2 Polystyrol-block-polyisopren-block-polystyrol 'SIS' . . . 24

2.3 Versuchsübersicht . . . 25

2.3.1 Ofenalterung . . . 25

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

2.3.2 Mehrfachextrusion . . . 26
2.3.3 Blendversuche . . . 27
2.3.4 Versuche mit recyceltem Material . . . 28
2.4 Probenherstellung . . . 29
2.4.1 Extrusion und Spritzguss mit Haake Mini Lab II und Mini Jet II . . . 29
2.4.2 Mehrfachextrusion mit EXTRON EX 18-26-1.5 . . . 30
2.4.3 Mühle Pulverisette 19 . . . 30
2.4.4 Presse Collin P 200 P . . . 31
2.5 Messmethoden . . . 32
2.5.1 Zugverusch . . . 32
2.5.2 Schlagzugversuch . . . 34
2.5.3 Scherrheologie . . . 35
2.5.4 Fourier-Transform-Infrarotspektrometer 'FTIR' . . . 36
2.5.5 Schmelzflussrate 'MFR' . . . 37
2.5.6 Thermogravimetrische Analyse 'TGA' . . . 39

3 Ergebnisse **41**
3.1 Ergebnisse der Alterungsversuche . . . 41
3.1.1 Vergleich der Ergebnisse von Rheologie und MFR . . . 41
3.1.2 Rheologie: Komplexe Viskosität . . . 42
3.1.3 Rheologie: Crossover-Punkte . . . 46
3.1.4 Zugversuch . . . 50
3.1.5 Schlagzugversuch . . . 56
3.1.6 FTIR . . . 59
3.1.7 Schmelzflussrate MFR . . . 62
3.1.8 Thermogravimetrische Analyse 'TGA' . . . 65
3.2 Blendversuche . . . 68
3.2.1 Viskosität und MFR . . . 68
3.2.2 Zugversuch . . . 71
3.2.3 Schlagzugversuch . . . 74
3.3 Versuche mit erweitertem SIS-Anteil . . . 76
3.3.1 Viskosität und MFR . . . 77
3.3.2 Zugversuch . . . 78
3.3.3 Schlagzugversuch . . . 78
3.4 Versuche mit recyceltem Material . . . 79
3.4.1 Viskosität und MFR . . . 79
3.4.2 Zugversuch . . . 80
3.4.3 Schlagzugversuch . . . 81

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4 Zusammenfassung **83**

5 Ausblick **86**

A Anhang **87**

A.1 Abkürzungen 87

A.2 Messergebnisse 89

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es die Rezyklierbarkeit von Polystyrol und Polypropylen zu untersuchen und diese miteinander zu vergleichen. Dies ist dadurch motiviert, dass kurzlebige Verpackungsprodukte alternierend aus Polystyrol und Polypropylen hergestellt werden. Im Müll liegen diese Verpackungen gemischt vor. Dies verkompliziert das Recycling der Verpackungsmaterialien. Abhilfe soll ein Verbot von Polystyrol für kurzlebige Verpackungen schaffen. In dieser Arbeit wird untersucht ob das Verbot sinnvoll ist oder ob Polystyrol doch der bessere Werkstoff für Verpackungen ist.

Um das Alterungsverhalten der beiden Werkstoffe zu vergleichen, werden Alterungstests durchgeführt. Die Alterung wird mittels Ofen (80 °C, 50 Tage, normale Atmosphäre) und Mehrfachextrusion (165-200-200 °C, 10 mal) künstlich simuliert. Die Mischbarkeit der Werkstoffe wird durch Blends überprüft. Es werden reine Blends und Blends mit zwei Kompatibilisierungsmitteln hergestellt. Am Ende der Arbeit werden noch Versuche mit Material aus recycelten Joghurtbechern durchgeführt.

Die mechanischen Eigenschaften der Proben werden mittels Zug- und Schlagzugversuch ermittelt. Die viskosen Eigenschaften werden mittels Schmelzflussrate und Scherrheologie untersucht. Bei den gealterten Proben werden zusätzlich Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie und Thermogravimetrische Analysen durchgeführt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

1.2 Ursprung der Kunststoffe

Das Wort Kunststoff wird für Stoffe verwendet, die künstlich aus einem natürlich vorhandenen Material hergestellt werden. Der neu erstellte Stoff besitzt gänzlich andere Eigenschaften als sein Ausgangsmaterial. Wörter wie Plaste und Plastik, welche in anderen Sprachen verbreitet sind, leiten sich von der unter bestimmten Bedingungen möglichen plastischen Formgebung des Werkstoffes ab. All die angeführten Bezeichnungen eignen sich nicht um die gemeinten Materialien von anderen Werkstoffen abzugrenzen. Viele andere Werkstoffe werden künstlich hergestellt oder sind plastisch verformbar [1].

Seit Urzeiten nutzt der Mensch bereits Kunststoffe. Durch Trockendestillation wurde aus Birkenrinde Birkenpech abgesondert und dieses Pech wurde als Klebstoff eingesetzt [2] [3]. Das erste überlieferte Rezept zur Kunststoffherstellung wurde 1530 niedergeschrieben. Als Entdecker gilt der Schweizer Bartholomäus Schobinger. Es beschreibt die Herstellung von Kunsthorn aus Ziegenkäse. Während einer längeren Kochprozedur sondert sich eine milchige Flüssigkeit ab, bis ein durchsichtiges formbares Harz übrigbleibt [4]. Aus diesem Rezept entwickelte sich Ende des 19 Jahrhunderts der Kunststoff Galalith oder auch Milchstein genannt. Zu dieser Zeit wurden von Agrarwirten bereits hinreichende Milchüberschüsse produziert, um die Milch für industrielle Prozesse abzugeben. Die ersten Milchsteinprodukte stellten verhältnismäßig einfache Produkte wie Knöpfe und Gürtelschließen dar. Später wurde der Werkstoff für Kämme und Schmuck verwendet, bis es 1933 zum großen Aufrüsten für den zweiten Weltkrieg kam. Milchstein besitzt hervorragende elektrische Isolierfähigkeiten. Daher wurde der Werkstoff für elektrische Installationen der neusten Waffensysteme dieser Zeit benötigt [5].

Nach dem zweiten Weltkrieg begann der Wechsel von Kohle auf Öl für Heizzwecke und es kam zu einer massiven Zunahme an Kraftfahrzeugen. Dies hatte zur Folge, dass die Förderung von Erdöl massiv anstieg. Beim Raffinieren von Erdöl zu Heizöl und Treibstoff fallen zusätzlich Stoffe wie Ethylen und Propylen als Nebenprodukte an. Zu dieser Zeit waren bereits Prozesse zur Polymerisation von Polyolefinen erfunden. Die chemische Industrie in England und Italien nutzte die Gunst der Stunde und begann mit der Produktion von Polyethylen und Polypropylen. Der Wachstumsboom dieser Industrie führte dazu, dass die zuerst als Nebenprodukt anfallenden Gase bald Mangelware waren. Abbildung 1.1 zeigt die Entwicklung der globalen jährlichen Kunststoffproduktion von 1950 bis 2010 [6].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

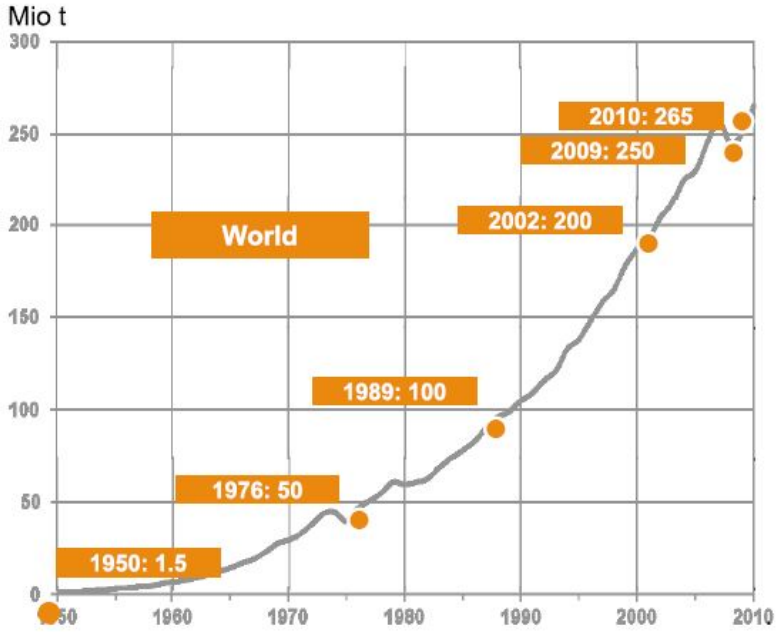

Abb. 1.1: Weltweite Kunststoffproduktion in Mio. Tonnen im Zeitraum von 1950 bis 2010 [6]

In der Grafik ist ersichtlich, dass die erste Erdölkrise im Jahr 1973 zu einem Wachstumsrückgang der Kunststoffproduktion führte. Mit der zweiten Erdölkrise 1982 kam es zudem zu den ersten Forderungen Kunststoffe zu recyceln. Die vermehrte Entsorgung von Lebensmittelverpackungen aus Kunststoff an dafür nicht vorgesehenen Plätzen führte dazu, dass eine Art Ablehnung gegen Kunststoffe entstand. Vor den beiden Krisen betrug das jährliche Wachstum ca. 10 %. Nach den Krisen reduzierte sich das Wachstum auf 4 % [6].

Die globale Kunststoffproduktion betrug 2017 fast 350 Mio Tonnen weltweit. 65 Mio. Tonnen hiervon wurden in Europa produziert und 50 Mio. Tonnen wurden auf diesem Kontinent verbraucht. Die Hälfte der in Europa konsumierten Polymere wird von Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol gebildet [7].

1.3 Einteilung von Kunststoffen

Kunststoffe bestehen wie viele Stoffe die in der Natur vorkommen, wie zum Beispiel Kautschuk und Zellulose, aus Makromolekülen. Ein Molekül besteht aus mindestens zwei Atomen. Ein H_2 Molekül besteht aus zwei Wasserstoffatomen und ist wohl einer der kleinsten Vertreter der Moleküle. Ein Molekül ist ein Makromolekül wenn es aus mindestens 1000 Atomen besteht. Kunststoffe sind also Werkstoffe der organischen Chemie, welche aus Makromolekülen aufgebaut sind [4] [8].

Produkte, welche aus Kunststoff gefertigt werden, bestehen im seltensten Fall nur aus

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Makromolekülen einer Type. Meist werden unterschiedliche Arten von Makromolekülen gemischt und zusätzlich Stoffe eingebracht, die nicht zwangsweise Kunststoffe sind. Dies sind sogenannte Additive und Füllstoffe. Additive werden dem Kunststoff in geringem Maße beigemengt um gewisse Eigenschaften zu modifizieren. Beispiele hierfür sind Alterungsschutzmittel, welche die Alterungserscheinungen der Kunststoffe hinauszögern, oder Kompatibilisierungsmittel, welche die Verträglichkeit von Kunststoff-Blends verbessern. Additive werden für gewöhnlich vom Grundwerkstoff gelöst. Füllstoffe hingegen werden vom Grundwerkstoff nicht gelöst. Der Hauptgrund Füllstoffe hinzuzufügen ist die benötigte Menge an Grundwerkstoff zu reduzieren und diesen durch den Füllstoff zu substituieren. Die Zugabe von Füllstoffen kann die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Werkstoffes manipulieren [4] [8].

In einem ersten Schritt lassen sich Kunststoffe in vernetzte und unvernetzte Polymere einteilen. Bei unvernetzten Polymeren werden die Hauptketten untereinander durch Nebenvalenzkräfte zusammengehalten. Durch die Zugabe von thermischer Energie kommt es in Folge von Atomschwingungen zum Abbau dieser Anziehungskräfte und damit zu einer plastischen Verformbarkeit. Dieser Formgebungsprozess ist theoretisch unbegrenzt möglich. Bei vernetzten Polymeren sind die Hauptketten durch kovalente Atombindungen miteinander verbunden. Diese Bindungen sind im Vergleich zu den Nebenvalenzbindungen deutlich stärker und durch Erwärmen nicht vor dem Brennpunkt erreichbar. Daher ist es nicht möglich Kunststoffe mit Vernetzungen thermisch umzuformen. Die Unterscheidung von vernetzt und unvernetzt bezieht sich also auf das thermische Verhalten [4] [8].

Üblich ist es die Kunststoffe nach ihren thermisch-mechanischen Eigenschaften einzuteilen:

- Thermoplaste und thermoplastische Elastomere
- Elastomere
- Duroplaste

Thermoplaste werden des Weiteren nach ihrem Ordnungszustand in amorphe und teilkristalline Typen eingeteilt [4] [8]. Abbildung 1.2 zeigt eine zweidimensionale schematische Darstellung des Aufbaus der unterschiedlichen Kunststoffarten.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

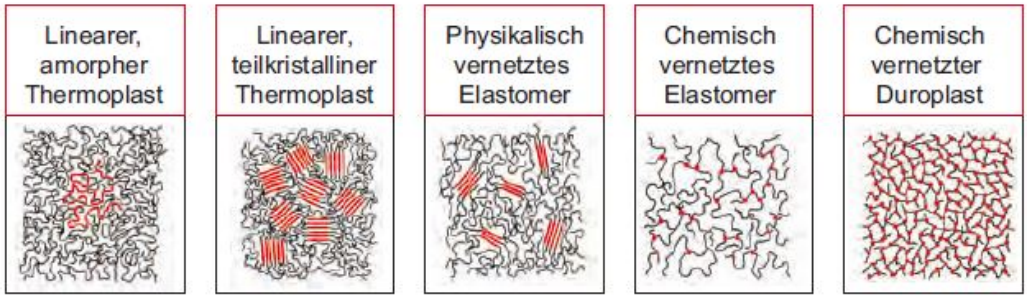

Abb. 1.2: Schema der Kunststoffarten [4]

1.4 Alterung von Kunststoffen

Die Alterung von Kunststoffen beschreibt alle irreversibel ablaufenden Vorgänge die im Laufe der Zeit in einem Polymer stattfinden. Diese Vorgänge können von chemischer als auch von physikalischer Natur sein. Unterschieden wird zwischen inneren und äußeren Ursachen für die Alterung. Innere Ursachen für die Alterung von Polymeren sind Relaxationserscheinungen und thermodynamisch instabile Zustände im Polymer. Als äußere Einflüsse zählen chemische und physikalische Einwirkungen der Umgebung auf das Polymer, wie Wärme, Feuchte, Sauerstoff, Ozon, Chemikalien, UV-Strahlung, ionisierende Strahlung, mechanische Spannungen und biologisch aktive Medien. Die Alterung kann zu allen Lebensphasen, wie der Isolierung, Trocknung und Lagerung auftreten. Überwiegend tritt die Alterung während der Verarbeitung und Anwendung auf. Bei den Alterungsprozessen werden drei Reaktionen unterschieden:

Abbaureaktionen: Der Polymerisationsgrad reduziert sich, weil Polymerketten aufgespalten werden

Vernetzungsreaktionen: Der Polymerisationsgrad nimmt zu

Änderung chemischer Grundbausteine: Änderungen der chemischen Struktur, wie Abscheidung von Wasser oder CO.

Bei Alterungsprozessen treten meist zwei oder alle drei der angeführten Reaktionen gleichzeitig auf [9].

1.4.1 Thermische und thermo-oxidative Alterung

Die thermische Alterung von Polymeren beschreibt alle Änderungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Polymeres, verursacht durch steigende Temperatur oder thermische Energie. Die Dissoziationsenergie ist die Energie die notwendig ist um Spaltungen der chemischen Verbindung der Atome entlang der Hauptkette oder in den

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Seitenketten einzuleiten. Die Energie wird von den verbundenen Atomen und der Bindungsart bestimmt. In den Makromolekülketten von Kunststoffen sind überwiegend C-C, C-H, C-O und O-O Bindungen vertreten. Um die notwendige Energie in diese Molekülketten zu bringen, ist es erforderlich, die Kunststoffproben auf 300 °C bis 400 °C zu erwärmen. Daher tritt bei üblichen Anwendungsbedingungen keine signifikante Alterung auf. Hierfür sind längere Zeiträume im Bereich von Monaten und Jahren notwendig [9].

Bei der thermischen Alterung kommt es zur Verflüchtigung von niedermolekularen Bestandteilen im Polymer. Dies sind Makromoleküle mit geringerer Molmasse als der mittleren Molmasse der Makromoleküle des Kunststoffes. Hilfsmittel wie Weichmacher und Stabilisatoren aber auch Feuchtigkeit und Restmonomere, die nicht Teil der Polymerisation wurden, sind typische Bestandteile die sich durch thermische Alterung verflüchtigen [9].

Die Verflüchtigung führt zu Versprödung und Änderungen der Farbe. Ist die eingebrachte Energie größer als die Dissoziationsenergie, beginnen sich Atome aus ihrer kovalenten Bindung loszureißen. Dadurch beginnt die Abspaltung von Atomen aus der Seitenkette und der Hauptkette. Zweiteres wird Depolymerisation genannt und führt zu einer Reduktion der mittleren Molmasse. Die zusätzliche Energie kann aber auch Auslöser für Vernetzungsreaktionen sein und so Hauptketten über ihre Seitenketten oder direkt aneinander kovalent zu binden. Wird die Energie des Moleküls noch weiter gesteigert, beginnt die völlige Zersetzung und anschließende Oxidation der Fragmente. Die chemische Veränderung durch Wärme und Sauerstoff wird als thermo-oxidative Alterung bezeichnet. Der Sauerstoff ist entweder bereits im Polymer gelöst oder diffundiert von außen ein. Die Alterungserscheinungen von Kunststoffen werden durch das Vorhandensein von Sauerstoff signifikant beschleunigt [9]. Die Autoren von [10] und [11] haben mit ihren Versuchen gezeigt, dass Polymere ohne das Vorhandensein von Sauerstoff kaum thermisch altern. Bei Experimenten, in denen die Proben unter Schutzgasatmosphäre untersucht wurden, wurde festgestellt, dass die Zersetzung der Proben unter Sauerstoffabschluss erst bei deutlich höheren Temperaturen beginnt [12].

1.4.2 Alterung durch mechanische Energie

Beim Verarbeiten von Polymeren durch Mahlen, Granulieren oder bei der thermoplastischen Verarbeitung durch Scherung der Polymerschmelze wird mechanische Energie in den Werkstoff transferiert. Hierdurch kann es zum Bruch von C-C Bindungen in der Hauptkette kommen. Die Zugspannung ist inhomogen über die Hauptketten des Polymeres verteilt. Daher gibt es besonders stark beanspruchte C-C Bindungen. Ist die anliegende Zugspannung größer als die Dissoziationsenergie, so kommt es zum Bruch der kovalenten Atombindung. Scherspannungen entlang der Hauptkette führen zu einer maximalen Zugspannung in den Mitten der Hauptketten und diese Lagen der Span-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

nungsmaxima führen zu einem Bruch an genau diesen Stellen. Durch den Bruch werden Elektronen freigesetzt. Die Atome mit nun freien Elektronen werden Radikale genannt. Diese Radikale können nun mittels Wasserstoffabstraktion mit den anderen Hauptketten chemisch reagieren und so weitere Spaltungen zur Folge haben. Dieser Vorgang wird mechanochemische Alterung genannt und führt zu Mikrorissen im Kunststoff. Das Aufbringen von mechanischer Spannung am Polymer führt zur Erhöhung der inneren Energie und begünstigt so die thermische, photochemische und chemische Alterung des Werkstoffes. Das Vorhandensein von Sauerstoff beschleunigt den Alterungsprozess [9].

1.5 Polystyrol (PS)

Polystyrol ist mengenmäßig der am drittmeisten eingesetzte Thermoplast. Der Kunststoff wird aus Styrol polymerisiert. Styrol ist eine klare, niederviskose Flüssigkeit mit süßlichem leuchtgasähnlichen Geruch und wurde 1839 in Berlin vom Apotheker Eduard Simon entdeckt. Durch Wasserdampfdestillation eines Balsams gegen Krätze wurde eine ölige Flüssigkeit abgesondert. Diese wurde von ihrem Entdecker Styrol genannt. Dieser beobachtete eine langsame Verfestigung der Flüssigkeit zu einer zähen transparenten Masse und deutete dies fälschlicherweise als einen Oxidationsprozess. Styrol besitzt einen Siedepunkt bei 146 °C und ist sehr reaktionsfähig [4].

Die Polymerisation setzt bereits bei Raumtemperatur ein. Abbildung 1.3 zeigt links die chemische Verbindung Styrol. Bedeutend für die Polymerisation von Styrol ist die Doppelbindung zwischen den Kohlenstoffatomen. Die Eigenschaften des erzeugten Polystyrols werden besonders durch den rot gezeichneten Benzolring geprägt. Üblicherweise ist PS ataktisch angeordnet, der Benzolring ist unregelmäßig angeordnet. Dies verhindert die Bildung von Kristallen und führt dazu das ataktisches PS amorph ist. Allerdings existiert auch syndio- und isotaktisches PS, welches zur Kristallisation fähig ist [4].

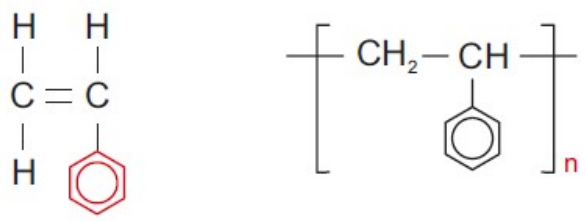

Abb. 1.3: links Styrol, rechts Polystyrol [4]

Ataktisches Polystyrol ist in reiner Form amorph, glasklar und besitzt einen brillanten Oberflächenglanz. Der Glasübergang findet bei 90 °C statt. Daher ist das Material bei Raumtemperatur spröde und die Oberfläche hart. Die Dichte beträgt 1,05 g/cm³. Polystyrol ist bis auf organische Lösungsmittel, wie Benzin und Benzol, lösungsmittelfrei. Des

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Weiteren nimmt es sehr wenig Wasser auf und ist nicht gegen Feuchtigkeit empfindlich. PS besitzt einen hohen elektrischen Widerstand und ist daher ein guter Isolator. Als Schmelze weist PS ein besonders gutes Fließverhalten auf. Beim Abkühlen besitzt PS ein geringes Schwindmaß. Dadurch werden Spritzgussteile besonders formgenau. Diese Gründe zeichnen PS als Spritzgusswerkstoff aus [1] [8] [13] [4].

1.5.1 Alterung von PS

Das Leben von Einwegprodukten aus PS ist von zwei Beanspruchungsphasen, die sich in Hinblick auf die Belastungsart unterscheiden, geprägt. Zum einen gibt es die Phase der Verarbeitung zum Produkt. In dieser Phase ist der Werkstoff hohen Temperaturen, Sauerstoff und mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt. Zum anderen gibt es die Phase der Produktnutzung. Hier ist das PS im Vergleich zur ersten Phase weniger extremen Belastungen ausgesetzt. Die erste Phase dauert nur wenige Sekunden wohingegen die zweite Phase mehrere Tage bis Jahre dauern kann. In der zweiten Phase kann das PS durch den Einfluss von Licht, Feuchtigkeit, atmosphärische Verunreinigungen und Niederschlag über lange Zeit gealtert werden. Als Folge dieser Einflüsse auf den Werkstoff kommt es zu Farbänderungen, Rissbildung und Abfall der mechanischen Eigenschaften [14].

Die kurzzeitige Anwendungstemperatur von reinem PS-Bauteilen ohne mechanische Belastungen liegt zwischen 75 bis 95 °C. Der Temperaturbereich für Langzeitanwendungen ohne mechanische Belastungen beträgt 60 bis 80 °C. Der Temperaturbereich ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Viskosität von PS-Typen. Eine geringe Viskosität des Werkstoffs erlaubt eine geringere Temperatur für den Gebrauch. Wird der Werkstoff zusätzlich mechanisch belastet so muss die Anwendungstemperatur deutlich niedriger gewählt werden. Wird PS thermisch in einer Schutzatmosphäre ohne Sauerstoff belastet, so ist eine Abnahme der Lösungsviskosität zu beobachten. Die Zugabe von Sauerstoff beschleunigt den Abbau von PS. Bis zu einer Temperatur von 100 °C kann bei PS keine signifikante Änderung der Eigenschaften festgestellt werden. Die Abbaueffekte nehmen im Temperaturbereich 100 bis 200 °C zu. Bei Temperaturen höher 200 °C verläuft die Alterung des Polymeres in kurzer Zeit und es ist eine Braunfärbung zu beobachten [14].

PS ohne UV-Stabilisierung zählt zu den Kunststoffen mit vergleichsweise geringer Witterungsbeständigkeit. Das UV-Licht von direkter Sonneneinstrahlung oder Beleuchtungskörper wie Fluoreszenzleuchten führt in gewöhnlicher Atmosphäre bei PS zu Vergilbung, Rissbildung und Verschlechterung mechanischer und dielektrischer Eigenschaften. Die Zugabe von Lichtschutzmitteln und Antioxidantien ist empfohlen, damit die PS-Werkstoffe ihre Eigenschaften lange Zeit behalten [14].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

1.6 Polypropylen (PP)

Polypropylen ist mengenmäßig der am zweit häufigsten verwendete Standardkunststoff [8]. Der Werkstoff gehört zu den Polyolefinen. Olefine beschreibt einfache und ungesättigte chemische Verbindungen, die nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff aufgebaut sind, sowie eine Kohlenstoffdoppelbindung besitzen. Als Ausgangsstoff für PP dient Propylen, welches die chemische Bezeichnung Propen besitzt. Die Strukturformel von Propylen ist in Abbildung 1.4 abgebildet [4].

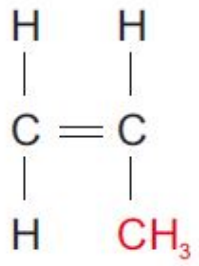

Abb. 1.4: Strukturformel von Propylen [4]

Propylen ist ein farbloses Gas, welches bei -48 °C in den flüssigen Zustand kondensiert und als Nebenprodukt der Erdölindustrie erzeugt wird. Ungefähr zwei Drittel des anfallenden Propylens wird für die Synthese von PP verwendet. PP gibt es in unterschiedlichen Taktizitäten. Die Taktizität der Makromoleküle des PP beeinflusst die Fähigkeit zur Kristallisation und ist somit maßgebend für die Eigenschaften des Werkstoffes. Die drei Taktizitäten bei PP werden in Abbildung 1.5 dargestellt [4].

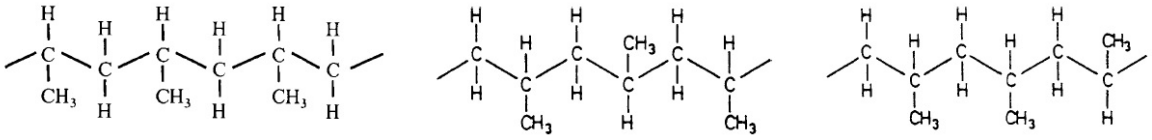

Abb. 1.5: Taktizitäten von PP; links isotaktisch, mittig syndiotaktisch, rechts ataktisch [8]

Isotaktisches PP weist das größte Potential zum Kristallisieren auf, wohingegen ataktisches PP bis auf vernachlässigbare kristalline Bereiche amorph ist [4]. Beim Einsatz von isotaktischem PP in industriellen Fertigungsprozessen lassen sich Kristallisationsgrade von 30 bis 60 % einstellen. Mit anwachsendem Anteil von isotaktischem PP steigen der Kristallisationsgrad, Schmelzbereich, die Zugfestigkeit, Steifigkeit und Härte des Werkstoffes [8]. Ataktisches PP ist überwiegend amorph und daher gummiähnlich weich sowie getrübt durchsichtig. Es findet Anwendung als Dichtstoff, Beschichtung und Schmelzklebestoff [4].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die Dichte von rein PP liegt im Bereich von 0,9 bis 0,915 g/cm³. Die Glasübergangstemperatur findet sich bei 10 °C. Bei geringer mechanischer Belastung ist PP bis 100 °C dauerhaft einsetzbar. Uneingefärbt und frei von Füllstoffen ist es milchig und nicht transparent [13]. Kurzzeitig ist der Werkstoff bis 150°C einsetzbar. PP hat ausgezeichnete dielektrische Eigenschaften und ist chemisch beständig, abgesehen von starken Oxidationsmitteln. Verarbeitet wird es überwiegend durch Spritzguss, Extrusion, Spritzstreckblasformen und Pressen. Hauptsächlich wird PP im Verpackungssektor und als Chemiefaser verwendet. Aber auch Möbel, Haushaltsgeräte und Rohrleitungen werden aus PP gefertigt [4].

1.6.1 Alterung von PP

Die Zersetzung von Polyolefinen, zu denen PP gehört, beginnt unter Sauerstoffabschluss erst bei 280 °C. PP besitzt die geringste Wärmebeständigkeit dieser Gruppe. Das Vorhandensein von Sauerstoff und UV-Strahlung führt zu einem Abbau des PP bei geringeren Temperaturen. Die Alterung wird durch Witterungseinflüsse wie Feuchtigkeit und Luftverunreinigungen ebenfalls beschleunigt. Die Autoren von [14] geben an, dass sie in Besitz von Haushaltsgegenständen sind, die aus dem ersten erhältlichen PP 1958 hergestellt wurden. Sie schreiben, dass die besagten Artefakte 1999 noch in gutem Zustand sind und keine offensichtliche Alterung bemerkbar ist. Die Langzeiteinsatztemperatur von PP als Homopolymer wird mit 100 °C angegeben. Die kurzzeitige Temperaturgrenze wird mit 130 °C attestiert. Die Lebensdauer von PP-Bauteilen wird durch Wanddicke, Anwendungstemperatur, Morphologie, mechanische Belastung und Witterungseinflüsse bestimmt. Die Alterung findet vorerst nur oberflächlich statt durch Glanzverlust, Verfärbung und Rissbildung. Je größer die Wanddicke umso länger dauert es bis die inneren Bereiche gealtert werden. Es benötigt sehr viel Zeit bis das Innere des Werkstoffes oxidiert und die mechanischen Eigenschaften des Bauteiles nachlassen. Eine erhöhte Oberflächentemperatur begünstigt die Oxidation der PP-Schicht. Versuche [14], welche den Einfluss der Kristallinität von PP auf deren Alterung untersuchen, kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen darüber, ob die Kristallinität die Oxidationsbeständigkeit erhöht.

1.7 Mischungen von Polymeren

Mehrere Polymere können als Copolymer oder als Blend eingesetzt werden. Beim Copolymer werden die Monomere chemisch verbunden. Die Monomere der Blends werden durch Nebenvalenzbindungen zusammengehalten [6].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

1.7.1 Copolymer

Copolymere bestehen aus zumindest zwei unterschiedlichen Arten von Monomeren die gemeinsam in die selbe Polymerkette eingebunden sind. Dies kann bei der Herstellung aus Monomeren durch Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition geschehen. Bei Pfropfcopolymeren besteht die Hauptkette nur aus Monomeren derselben Art. Entlang der homogenen Haupkette binden sich Monomere der zweiten Sorte an [6]. High-Impact Polystyrol (HIPS) ist ein Pfropfcopolymer bei dem Polystyrol mit 3 bis 5 mol % Polybutadien modifiziert wird [15].

1.7.2 Blends

In einem Blend werden mehrere Polymersorten vermischt. Die Makromoleküle der unterschiedlichen Kunststoffsorten haften aufgrund der Nebenvalenzbindung aneinander. Das Mischen von Blends wird in Schneckenextrudern durchgeführt. Abbildung 1.6 gibt die Verträglichkeit der gängigsten Kunststoffe für die Blendbildung wieder. Um die Verträglichkeit zu verbessern können Kompatibilisierungsmittel eingesetzt werden [6].

		PE	PP	PS	PVC	PET	PC	PA	PBT
Zumischwerkstoff	PE	1	3–4	4	4	4	4	2–4	4
	PP	2–4	1	4	4	4	4	2–4	4
	PS	4	4	1	4	3	2–4	3–4	3–4
	PVC	4	4	2–4	1	4	3–4	4	4
	PET	4	4	4	4	1	1	3–4	4
	PC	4	4	2–4	4	1	1	3–4	1
	PA	4	4	3–4	4	3	4	1	3
	PBT	4	4	2–4	4	4,3	1	3–4	1

1 = gut verträglich; 2 = mischbar bis ca. 20 %; 3 = mischbar bis ca. 5 %; 4 = unverträglich

Abb. 1.6: Verträglichkeitsmatrix gängiger Kunststoffsorten für die Blendbildung [16]

1.8 Recycling von Kunststoffen

Wie bereits erwähnt besitzen Kunststoffe herausragende Eigenschaften verglichen mit anderen Werkstoffen. Allerdings wirken sich diese Eigenschaften teilweise ungünstig auf die Nutzbarkeit nach ihrem Lebenszyklus aus [4].

Kunststoffabfälle lassen sich in Haushalts- und Industriemüll einteilen. Die erste Gruppe besteht überwiegend aus kurzlebigen Verpackungsartikeln. Dazu zählen Lebensmittel-, Pharma- und Waschmittelverpackungen. Ein weiterer großer Teil dieses Sektors wird von

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

dünnen Folien gebildet, welche nicht sortenrein zu Verpackungen von Softdrinks, Lebensmittel und Kosmetika eingesetzt werden. Der gesamte Kunststoffabfall wird überwiegend durch fünf Kunststoffsorten gebildet. Tabelle 1.1 zeigt die Zusammensetzung des Haushaltsmülls in Gewichtsprozent. Die Zusammensetzung kann aufgrund von regionalen Gegebenheiten und der Saison schwanken. Die Organisation der regionalen Müllsammlung wirkt sich ebenfalls auf die Verteilung der Abfälle aus [4].

Tab. 1.1: Anteil der Kunststoffsorten nach Gewicht im Haushaltsmüll [17]

Kunststoffart	**Anteil im Haushaltsmüll (Gew. %)**
PE	39 %
PVC	22 %
PET	19 %
PS	8 %
PP	12 %

Kunststoffabfälle aus dem industriellen Umfeld bestehen überwiegend aus mittel- bis langlebigen Produkten. Das größte Problem dieser Abfälle ist, dass die Produkte aus vielen unterschiedlichen Kunststoffen bestehen. Ein Automobil, zum Beispiel, besteht heute in etwa zu 20 % aus Kunststoff. Da jede Komponente eines Automobils unterschiedlichste Aufgaben verfolgt, ist ein großes Spektrum an Kunststoffen und Additiven erforderlich. Der Ausbau und die sortenreine Trennung der Komponenten ist mit unverhältnismäßigen Kosten verbunden, weshalb meist nur die metallischen Werkstoffe des Automobils recycelt werden [17]. Abbildung 1.7 zeigt den Anwendungsbereich der Kunststoffe in Deutschland im Jahr 2019. Das Diagramm verdeutlicht, dass der größte Teil der eingesetzten Kunststoffe für Verpackungen verwendet wird, welche meist nur eine sehr kurze Lebensdauer aufweisen.

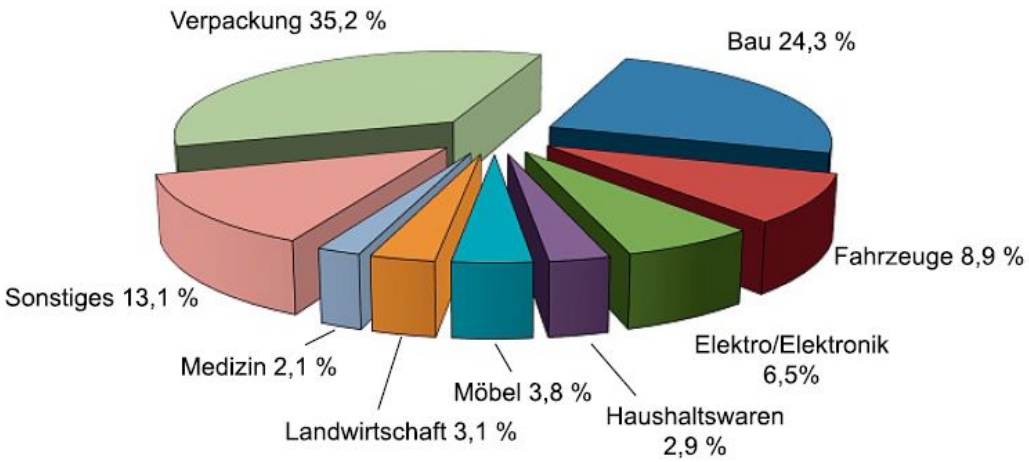

Abb. 1.7: Einsatzgebiet der Kunststoffe in Deutschland im Jahr 2019 [6]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

1.8.1 Recyclingkreisläufe

Abbildung 1.8 veranschaulicht die einzelnen Recyclingkreisläufe, welche an die Produktlebensphasen angefügt wurden. Die Lebensphasen des Produkts bestehen aus den vier Phasen Rohstoff, Produktion, Produktgebrauch und Deponie. Der Rohstoff wird der Produktion zugeführt, diese wiederum erzeugt ein Produkt, welches während der Produktgebrauchsphase genutzt wird und am Ende der Nutzbarkeit landet es auf einer Deponie. So sieht es aus, wenn Kunststoffe als reine Wegwerfprodukte eingesetzt werden und am Ende ihrer Nutzungsdauer auf einer Deponie gelagert werden. Wegen der geringen Dichte von Kunststoffen benötigen diese viel Schüttvolumen auf Deponien. Daher sollte die Deponierung von Kunststoffen vermieden werden. Des Weiteren sind viele Kunststoffe witterungsbeständig und können durch Umwelteinflüsse nur sehr langsam abgebaut werden. Ein weiteres Argument gegen die Ablagerung von Kunststoffen auf Deponien ist der hohe Brennwert von diesen. Wenn sie schon nicht in physischer Form wiederverwendet werden, so sollten sie in Form von thermischer Nutzung zur Gewinnung von Elektrizität oder Wärme verbrannt werden. Um Kunststoffabfälle auch abseits der thermischen Nutzung wiederzuverwerten, werden folgende vier Recyclingkreisläufe an die Produktlebensphasen angefügt:

Primärkreis: Innerbetriebliches Sammeln und Wiederverwenden von Produktionsabfällen [4]. Dieser Recyclingkreis wird angewandt, wenn der Abfall in reiner Form und unkontaminiert vorliegt. Des Weiteren lassen sich nur Thermoplaste unbehandelt wieder in den Prozess einbringen. Die Anwendung dieses Kreislaufes führt zu einer Verschlechterung der Produkt- und Prozesseigenschaften [17].

Sekundärkreis: Wiedernutzung eines gebrauchten Produkts für den gleichen oder einen anderen Zweck

Tertiärkreis: Der zu recycelnde Werkstoff wird durch Verfahren wiederaufbereitet und als Sekundärwerkstoff wird ein völlig neues Produkt erzeugt. Diese Stufe wird auch werkstoffliches Recyceln genannt.

Quartärkreis: Der Recyclingkunststoff wird in andere chemische Produkte zerlegt, um diese für die neuerliche Kunststofferzeugung oder andere Prozesse einzusetzen. Dieser Kreis wird in der Literatur oft rohstoffliches Recycling genannt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

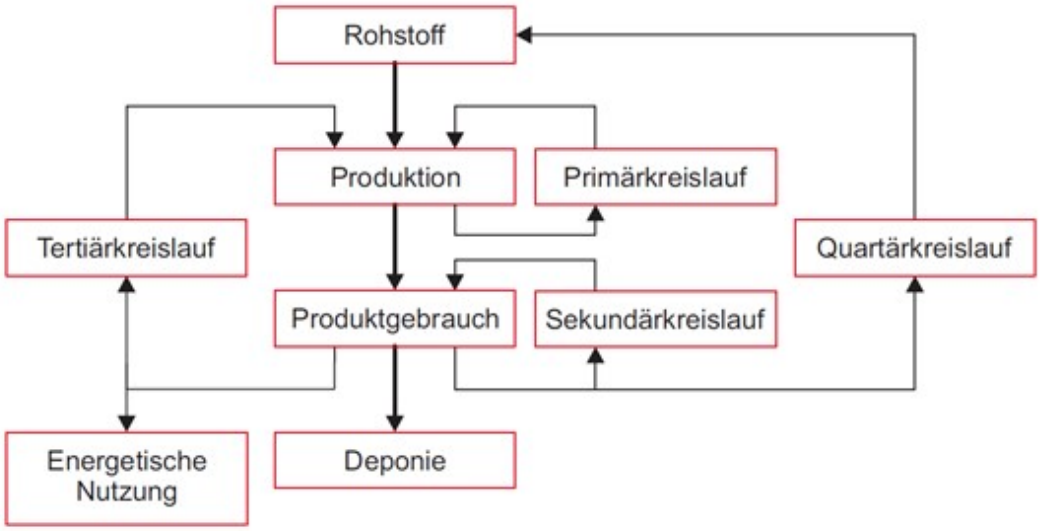

Abb. 1.8: Recyclingkreisläufe angefügt an die Produktlebensphasen [4]

Idealerweise sollte Kunststoff entweder durch einen der vier Recyclingkreisläufe wieder in eine Produktlebensphase gebracht werden oder thermisch verwertet werden [4].

1.8.2 Arten von Kunststoffrecycling

Abbildung 1.9 zeigt die drei Arten der Nutzung von Kunststoffabfällen. Die drei Arten werden in den folgenden Unterkapiteln genauer beschrieben.

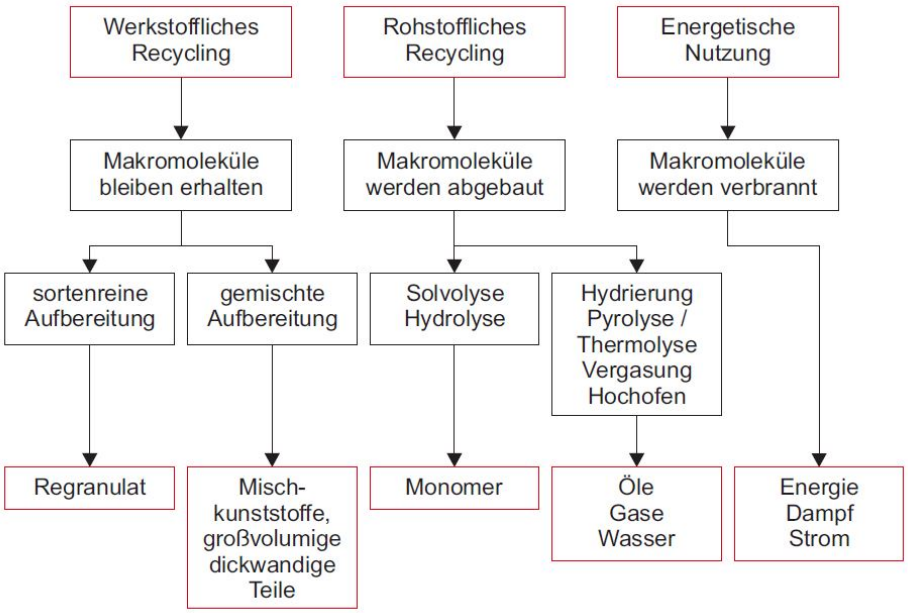

Abb. 1.9: Arten von Recycling [4]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

1.8.3 Werkstoffliches Recycling

Das werkstoffliche Recycling zeichnet sich dadurch aus, dass die makromolekulare Struktur des Kunststoffes theoretisch erhalten bleibt. Der Kunststoff wird sortenrein gesammelt oder nach Sorte getrennt. Die homogene Kunststoffansammlung wird anschließend umgeschmolzen oder gemahlen. Für das Umschmelzen kommen nur Thermoplaste in Frage, da Elastomere und Duromere nicht schmelzbar sind. Beim Aufmahlen können auch vernetzte Kunststoffe, die nicht schmelzbar sind, wiederverwertet werden. Polyurethane könne zum Beispiel als Pulver gemahlen mit Bindemittel zu Folien und Platten verarbeitet werden [4].

Bei dieser Art des Recyclings ist das Alterungsverhalten von Thermoplasten zu beachten. Durch physikalische und chemische Einflüsse kommt es über mehrere Lebenszyklen zu einer abnehmenden Qualität bei den Materialeigenschaften. Um diesem Downcycling vorzubeugen, wird es empfohlen dem Rezyklat Stabilisierungsadditive beizumengen. Des Weiteren ist es gängige Praxis Rezyklat mit neuem Kunststoff zu vermischen [4]. Um ähnliche Eigenschaften wie bei neuen Kunststoffen zu generieren, hat es sich bewährt bis zu 30 Masse-% an Rezyklat hinzuzugeben.

Trennverfahren des werkstofflichen Recyclings lassen sich in Nass- und Trockenverfahren einteilen. Nassverfahren besitzen im Vergleich zu der zweiten Verfahrensgruppe deutlich höhere Trennschärfen sowie eine feinere Selektivität. Zu den Trockenverfahren zählen Windschichtung, ballistische Separation und sensorbasierte Selektion mittels Infrarot. Letztgenanntes Verfahren erreicht mit den Nassverfahren vergleichbare Trennschärfen. Das Trennverfahren stößt allerdings bei dunklen Oberflächen an seine Grenzen und kann den Werkstoff in einem solchen Fall nicht zuordnen. Bei den Nassverfahren ist die Farbe des zu recycelnden Materials nicht von Bedeutung, da für die Unterscheidung bei fast allen Verfahren die Dichte des Materials ausschlaggebend ist. Die häufigsten Vertreter der Nasstrennverfahren sind Schwimm-Sink-Trennung und Schichtungstrennung [18].

1.8.4 Rohstoffliches Recycling

Beim rohstofflichen Recycling werden die makromolekularen Kunststoffansammlungen in niedermolekulare Stoffe aufgespalten. Im Vergleich zum werkstofflichen Recycling, bei dem physikalische Prozesse im Vordergrund stehen, treten hier sowohl physikalische als auch chemische Prozesse auf. Diese Art des Kunststoffrecyclings eignet sich besonders für die Wiederverwendung von nicht sortenreinen und stark verunreinigten Kunststoffansammlungen [4].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Petrochemische Verfahren

Petrochemische Verfahren sind typische Vertreter der Gruppe des rohstofflichen Recyclings. Hierbei werden die Hauptketten des Kunststoffes in kleinere Kettenmoleküle aufgespalten. Nach dem Prozess liegt das Ausgangsmaterial in niedermolekularen gasförmigen oder flüssigen Stoffen vor. Endprodukte des Prozesses sind Gase, Öle, Koks und Teer. Häufige petrochemische Verfahren sind die Pyrolyse und die Hydrierung [4].

Bei der Pyrolyse wird das Polymer unter Sauerstoffabschluss erhitzt, bis die thermische Zersetzung eintritt. Üblicherweise findet dieser Spaltungsprozess in einem Drehrohrofen bei 400 bis 700 °C statt. Mittels Wirbelschichtreaktor kann das Verfahren ebenfalls angewendet werden [4].

Bei der Hydrierung werden die Kunststoffabfälle unter Druck und in einer wasserstoffreichen Atmosphäre thermisch zersetzt. Frei werdende Radikale gehen mit den Wasserstoffatomen eine stabile Verbindung ein. Dadurch entstehen Benzin und Mittelöle [4].

Kunststoffabfälle vermengt mit Braunkohle, Wasserdampf und Sauerstoff bei Temperaturen von 1300 bis 1650 °C zerfallen zu CO und H_2. Aus den beiden Gasen kann in weiterer Folge Methanol synthetisiert werden. Das Verfahren wird Synthesegas-Verfahren genannt [4].

Solvolytische Verfahren

Eine weitere Verfahrensgruppe des rohstofflichen Recyclings sind die solvolytischen Verfahren. Diese Verfahren verfolgen das Ziel die Polymere wieder in Monomere oder zumindest in Stoffe mit geringerer Molmasse als der Ausgangsstoff zu zerlegen. Für die Anwendbarkeit ist es entscheidend, dass die Polymere eine gewisse chemische Beschaffenheit aufweisen. Das ist besonders bei Polymeren, welche durch Polykondensation erzeugt wurden der Fall [4]. Polymere welche durch Polyaddition erzeugt wurden, sind ebenfalls für das Verfahren geeignet. Polyaddition und -kondensation sind Gleichgewichtsprozesse. Daher kann das Polymer bei hohen Temperaturen und durch Zugabe von entsprechenden Substanzen wieder in seine Monomere zerfallen [16].

Die Unterscheidung der solvolytischen Verfahren wird nach der eingesetzten Spaltchemikalie getroffen. Verfahren bei denen mit chemischen Verbindungen der Gruppe Alkohol gearbeitet wird, werden Alkoholyse genannt. Anwendung finden Glykol und Methanol. Die Spaltung mit Hilfe von Wasser wird als Hydrolyse bezeichnet. Acidolyse werden die Verfahren genannt die zum Aufspalten Säuren verwenden. Tabelle 1.2 gibt eine Übersicht über die in der Praxis relevanten solvolythischen Verfahren. Des Weiteren wird gezeigt welche Polymere zu welchen Recyclingprodukten aufgespalten werden [4].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tab. 1.2: Übersicht der technisch relevanten Solvolytischen Verfahren [4]

Polymer	Verfahren	Produkte
Polyethylenterephthalat (PET)	Glykolyse Methanolyse Hydrolyse	Bishydroxethylterephthalat (BHET) und Oligomere Dimethylterephthalat (DMT) und Ethylenglykol (EG) Terephthalsäure (TS)
Polyamid 6 (PA 6)	Thermolyse Hydrolyse	Oligomere ε-Caprolactam und Oligomere
Polyoxymethylen (POM)	Acidolyse	Formaldehyd und Trioxan
Polyurethan (PUR)	Hydrolyse Glykolyse	Polyol und Amine Polyol
Polymethylmethacrylat (PMMA)	thermische Depoly-merisation	Methylmethacrylat (MMA)

1.8.5 Thermische Verwertung

Die thermische Verwertung kommt für sehr stark durchmischte oder nicht recycelbare Kunststoffe in Betracht. Hierbei wird der, im Vergleich zu anderem Restmüll, hohe Brennwert von Polymeren genutzt. Abbildung 1.10 stellt einen Vergleich des Brennwerts von Kunststoffen mit üblichen Brennstoffen auf. Der Stand der Technik ermöglicht es sämtliche Abgase bis zur Umweltvertäglich zu filtern. Aus dem Kunststoffmüll kann neben Wärme zum Heizen auch Dampf und damit in weiterer Folge elektrische Energie hergestellt werden. Von den jährlich weltweit geförderten Erdölmengen werden lediglich 4 % zu Kunststoff weiterverarbeitet. 85 % des Öls wird als fossile Energie direkt verbrannt [4].

Hausmüll	2,5–12,0	Kohle	25,0–35,0	Polypropylen	44,0
Polyethylenterephthalat (PET)	4,2	Polyamid (PA)	31,0	Polyethylen	46,1
Papier	17,0	Erdgas	32,0–45,0	Propan	46,3
Holz	18,0	Polystyrol	40,2	Methan	50,0
Polyvinylchlorid (PVC)	18,0	Erdöl	42,8	Wasserstoff	120,0

Abb. 1.10: Brennwert unterschiedlicher Energieträger in MJ/kg [7]

Der Verbrennungsprozess der thermischen Verwertung wird in vier Teilphasen unterteilt: Trocknung, Entgasung, Vergasung und vollständige Oxidation. Diese Teilphasen können räumlich und zeitlich gleichzeitig stattfinden. Die Trocknung verfolgt das Ziel den enthaltenen Wassergehalt vor der eigentlichen Verbrennung zu minimieren. Dafür

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

wird der Kunststoff bis 200 °C erwärmt, um enthaltenes Wasser zu verdampfen. Bei der Entgasung wird Pyrolyse angewandt um endotherme Zersetzungsreaktionen zu provozieren. Bei Temperaturen von 150 bis 650 °C und ohne Vergasungsmittel entstehen Gase und Koks. Bei der Vergasung wird mittels Vergasungsmittel bei Temperaturen von 650 bis 900 °C fester Kohlenstoff in Kohlenstoffmonoxid umgewandelt. Im Oxidationsschritt, dem eigentlichen Verbrennen, werden alle verbleibenden Bestandteile bei Temperaturen von 750 bis 1100 °C in Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf umgesetzt. Nach dem Oxidationsschritt kann es noch zu Sekundärreaktionen kommen. Abbildung 1.11 stellt die Phasen der thermischen Verwertung dar und gibt auch die einzelnen chemischen Reaktionen wieder [16].

Trocknung:	Verdampfung des Wassers bis 200 °C	
Entgasung/Pyrolyse:	Endotherme Zersetzungsreaktionen ohne Vergasungsmittel bei 150 - 650 °C:	
	Organ. Verbindungen ↔ Pyrolysegas + Pyrolysekoks	
		$\Delta H > 0$ kJ/mol
Vergasung:	Umsetzung von festem Kohlenstoff durch partielle Oxidation durch ein Vergasungsmittel bei 650 - 900 °C:	
	$C + ½ O_2 \rightarrow CO$	$\Delta H = -123$ kJ/mol
Verbrennung:	Umsetzung aller gasförmigen Verbindungen durch vollständige Oxidation zu CO_2 und Wasserdampf bei 750 - 1.100 °C:	
	$C + ½ O_2 \rightarrow CO$	$\Delta H = -123$ kJ/mol
	$CO + ½ O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H = -283$ kJ/mol
	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H = -406$ kJ/mol
Sekundärreaktionen:	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	$\Delta H = 119$ kJ/mol
	$C + CO_2 \leftrightarrow 2\ CO$	$\Delta H = 162$ kJ/mol
	$C + 2\ H_2 \leftrightarrow CH_4$	$\Delta H = -87$ kJ/mol
	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	$\Delta H = -42$ kJ/mol
	$CO + 3\ H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	$\Delta H = -206$ kJ/mol

Abb. 1.11: Phasen der thermischen Verwertung [16]

Bei der Verbrennung von Kunststoffen in Kraftwerken werden Wirbelschicht- und Staubfeuerung eingesetzt. Das Polymer wird durch Umschmelzen oder Zermahlen zu kleinen Partikeln auf das Verbrennen vorbereitet. Kohlestaub wird bei der Staubfeuerung zugesetzt. Für die thermische Verwertung von Kunststoffabfällen in Müllverbrennungsanlagen ist der Feuchte- und Aschegehalt für die Umsetztbarkeit von Bedeutung. Bei einem Feuchtigkeitsgehalt kleiner 50 % und einem Aschegehalt kleiner 60 % ist bei einer Energiegewinnung von etwa 3,4 MJ/kg mit einer selbstständigen Verbrennung zu rechnen [16].

1.8.6 Recycling in Österreich und der EU

Abbildung 1.12 zeigt die Situation des Kunststoffverbrauchs und -recyclings im Jahr 2009 in Österreich. Auf der linken Seite werden die Quellen des Kunststoffmülls des Jahres 2009 jeweils in Prozent angegeben. Auf der rechten Seite wird aufgeschlüsselt wie

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

dieser Müll verwertet wurde. Laut der Grafik wurden etwa 25 % der Kunststoffabfälle entweder mechanisch oder rohstofflich recycelt. Hiervon wurde der Großteil mechanisch recycelt. Lediglich drei Prozent des Kunststoffabfalles im Jahr 2009 wurden deponiert und fast 73 % der Gesamtmenge wurden in irgendeiner Form energetisch verwertet [19].

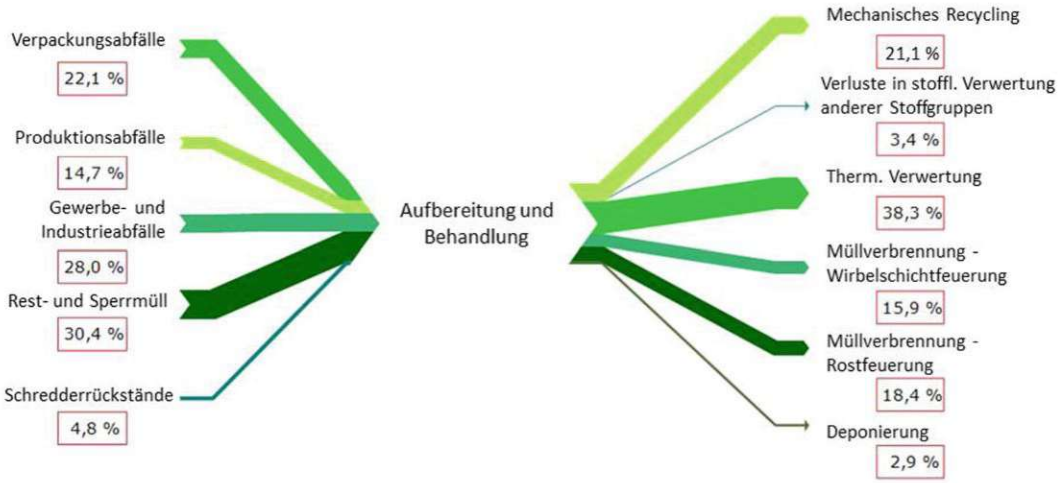

Abb. 1.12: Kunststoffrecycling in Österreich [19]

Abbildung 1.13 zeigt die Arten des Kunststoffrecyclings der einzelnen Länder Europas im Jahr 2018. Hierbei handelt es sich um ein Dreiecksdiagramm. In dem Diagramm wird werkstoffliches und rohstoffliches Recycling als Stoffliches Recycling zusammengefasst. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass Österreich das nationale stoffliche Recyceln in neun Jahren auf ca. 34 % erhöht hat. Die Deponierung der Kunststoffabfälle belaufen sich laut Diagramm auf etwa einen Prozent und der verbleibende Rest wird durch thermisches Recycling energetisch verwertet. Im Juli 2018 wurden von der europäischen Union Recyclingziele für 2025 und 2030 definiert. Hiernach sollen 50 % bzw. 55 % der Kunststoffabfälle aus Verpackungsmaterial stofflich recycelt werden. Die Ziele der EU für 2030 sind als hellblaue Fläche im oberen Bereich des Diagramms markiert [7].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

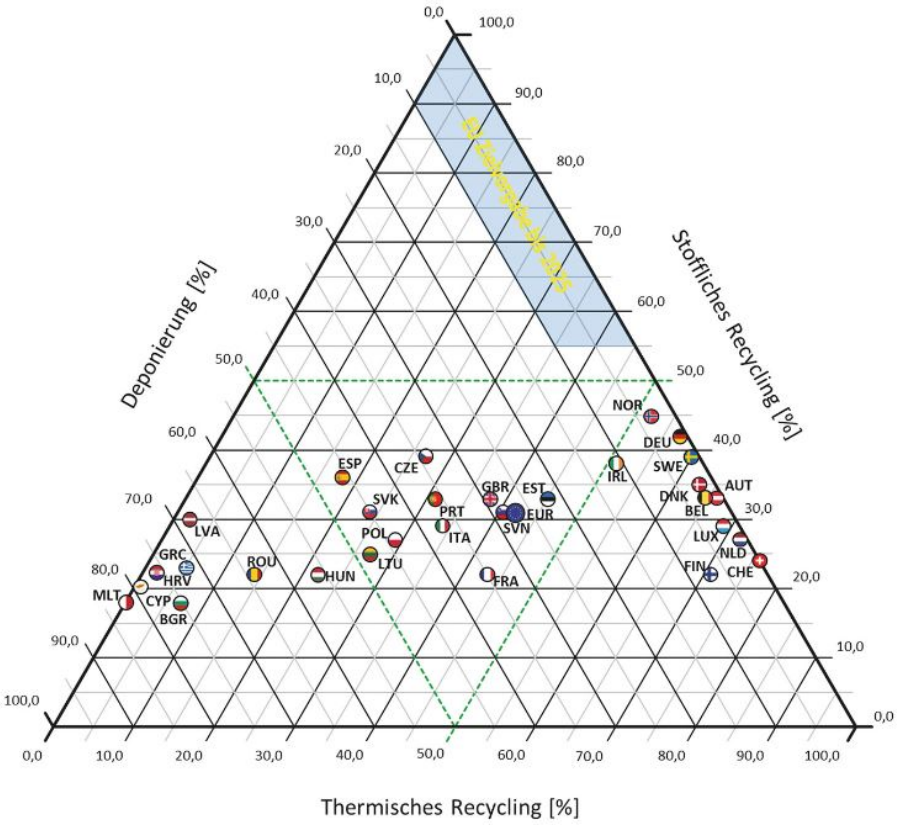

Abb. 1.13: Kunststoffrecycling in Europa im Jahr 2018 [7]

Im Diagramm ist des weiteren ersichtlich, dass sich zwei Lager mit unterschiedlichen Verwertungsstrategien gebildet haben. Im rechten Bereich des Diagramms liegt das Lager mit den Staaten die besser entwickeltes Recycling System besitzen. Hier werden die Abfälle durch stoffliches und thermisches Recycling verwertet. Aus dem zu recycelnden Kunststoff werden also Sekundärrohstoffe erzeugt oder sie werden als Energieträger genutzt. Das andere Lager bilden die Staaten links im Diagramm. Besagte Staaten benötigen für einen großen Teil ihrer Kunststoffabfälle Deponien. Die dritte Gruppierung bilden die Staaten in der Mitte des Diagramms mit einem in etwa gleichmäßigen Mix aus Deponierung, stofflichem und thermischem Recycling [7]. Abbildung 1.14 zeigt eine Prognose darüber wie der zukünftige weltweite Kunststoffbedarf aussehen könnte. Beim helleren Balken wird ein Pro-Kopf-Verbrauch von 60 kg angenommen. Der dunklere Balken ergibt sich mit einem Verbrauch von 90 kg/Kopf [6]. Die Prognose deutet darauf hin, dass es in Zukunft wohl sehr viel Kunststoff zu recyceln gibt!

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

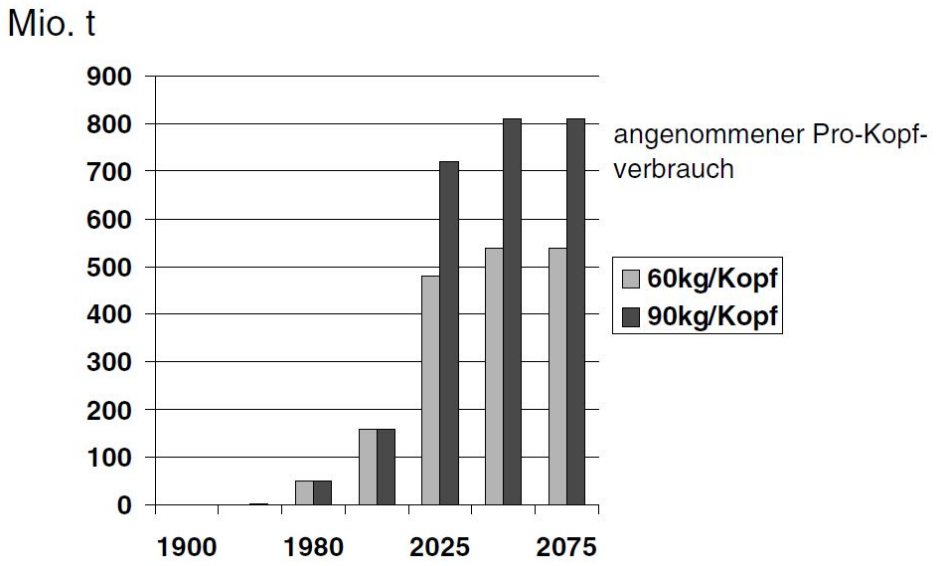

Abb. 1.14: Prognose des zukünftigen Weltweiten Kunststoffbedarfs [6]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

2 Werkstoffe und Methoden

Dieses Kapitel beschreibt die verwendeten Materialien und Methoden. Als Erstes werden die Werkstoffe und Additive sowie deren Eigenschaften vorgestellt. Anschließend werden die Versuchsreihen erklärt und abschließend werden die verwendeten Maschinen und Messvorrichtungen für die Probenpräparation und die Versuchsdurchführung erläutert.

2.1 Werkstoffe

Für die experimentellen Versuche dieser Arbeit wird Kunststoffgranulat von drei thermoplastischen Werkstoffen verwendet. Dabei handelt es sich um Polypropylen von der Firma Borealis sowie zwei Polystyrol Typen von der Firma Synthos PS. Es wird General Purpose und High-Impact Polystyrol verwendet. Die Bezeichnungen der Hersteller für die Kunststoffe werden in dieser Arbeit als Kürzung geführt. Tabelle 2.1 setzt die Herstellerbezeichnungen für die Kunststoffarten in Verbindung mit den verwendeten Kurzbezeichnungen.

Tab. 2.1: Abkürzungen für die Kunststoffnamen

Kunststoffname	
Herstellerbezeichnung	**Kürzung**
Synthos PS GP 152	PSGP
Synthos PS HI 562E	HIPS
HC600TF	PP2

Nach Abschluss der Versuche mit reinem Granulat werden Versuche mit Granulat aus recycelten Joghurtbechern durchgeführt.

2.1.1 Synthos PS GP 152 'PSGP'

PSGP ist ein thermoplastischer, farbloser Kunststoff für allgemeine Anwendungen. Das Datenblatt der verwendeten Type beschreibt den Werkstoff mit ausgezeichneten opti-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

schen Eigenschaften, Oberflächenglanz und erhöhter Temperaturbeständigkeit. PSGP wird für Verpackungen in der Nahrungsmittelindustrie verwendet. Tabelle 2.2 dokumentiert die Herstellerangaben für die Eigenschaften von PSGP [20].

Tab. 2.2: Herstellerangeben zu PSGP [20]

PSGP

Methode	Datenblatt	Standard	Anmerkung
MFR	2,5 - 3,5 g/10min	ISO 1133	200 °C; 5 kg
Charpy impact strength	16 kJ/m^2	ISO 179/1eU	23 °C
Vicat softening temperature	91 °C	ISO 306/B50	50 °C/h; 50 N

2.1.2 Synthos PS HI 562E 'HIPS'

HIPS ist ein thermoplastischer opaker Kunststoff mit höherer Schlagzähigkeit als PSGP. Es wurde für die thermoplastische Umformung entwickelt. HIPS wird für Verpackungen in der Nahrungsmittel- und Milchindustrie eingesetzt. Tabelle 2.2 dokumentiert die Herstellerangaben für die Eigenschaften von HIPS [21].

Tab. 2.3: Herstellerangeben zu HIPS [21]

HIPS

Methode	Datenblatt	Standard	Anmerkung
MFR	2,5 - 5 g/10min	ISO 1133	200 °C; 5 kg
Charpy impact strength	130 kJ/m^2	ISO 179/1eU	23 °C
Vicat softening temperature	88 °C	ISO 306/B50	50 °C/h; 50 N

2.1.3 Borealis Polypropylene HC600TF 'PP2'

PP2 ist ein thermoplastischer Kunststoff, welcher speziell für thermoplastisch geformte Verpackungen entwickelt wurde. Tabelle 2.4 dokumentiert die Herstellerangaben für die Eigenschaften von PP2 [22].

Tab. 2.4: Herstellerangeben zu PP2 [22]

PP2

Methode	Datenblatt	Standard	Anmerkung
MFR	2,8 g/10min	ISO 1133	230 °C; 2,16 kg
Charpy impact strength	130 kJ/m^2	ISO 179/1eU	23 °C
Vicat softening temperature A50	154 °C	ISO 306	50 °C/h; 50 N
Schmelztemperatur (DSC)	164 °C	ISO 11357-3	
Kristallisationstemperatur (DSC)	164 °C	ISO 11357-3	

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

2.2 Kompatibilisierungsmittel

PS und PP werden oft alternierend als Verpackungsmaterial für dasselbe Produkt eingesetzt. So finden sich im Einzelhandel Joghurtbecher des gleichen Herstellers abwechselnd aus PS oder PP. Diese werden gemeinsam im Restmüll entsorgt und liegen letztendlich in gemischter Form vor. Die beiden Materialien sind aufgrund ihrer unterschiedlichen Dichte einfach trennbar, allerdings sind geringe Verunreinigungen nicht auszuschließen. PS und PP sind nicht als Blend kompatibel [16]. Eine Mischung der beiden Materialien zieht eine signifikante Verschlechterung der Werkstoffeigenschaften mit sich. In dieser Arbeit werden zwei Kompatibilisierungsmittel eingesetzt um zu untersuchen, ob die Eigenschaften von PS-PP Blends verbessert werden können. Für die Namen der Kompatibilisierungsmittel werden ebenfalls Abkürzungen verwendet. Tabelle 2.5 dokumentiert die verwendeten Kurznamen.

Tab. 2.5: Abkürzungen für die Kompatibilisierungsmittel

Kompatibilisierungsmittel	
Herstellernamen	**Kürzung**
Lucofin	LUCO
Polystyrol-block-polyisopren-block-polystyrol	SIS

2.2.1 Lucofin 1492M HG 'LUCO'

Lucofin wird angewendet um die Zähigkeitseigenschaften spröder Kunststoffe zu verändern und um die Verträglichkeit inkompatibler Blendpartner zu erhöhen. Das Kompatibilisierungsmittel besitzt im Vergleich zum Basispolymer eine erhöhte Polarität, daher erzielt dieses Additiv gute Haftungsergebnisse mit polaren Stoffen. LUCO besitzt nur eine geringe Beständigkeit gegen Wasser, wässrige Lösungen und Salze. Für die Anwendung als Verpackungsmaterial ist LUCO nicht unbedenklich, da es organoleptisch wahrnehmbar ist [23]. Tabelle 2.6 dokumentiert die Richtwerte des Herstellers.

Tab. 2.6: Herstellerangeben zu LUCO [23]

LUCO			
Methode	Datenblatt	Standard	Anmerkung
MFR	2,0 - 5,0 g/10 min	ISO 1133	190 °C; 2,16 kg
Pfropfungsgrad	0,7 - 1,0 m.%	IR-Spektroskopie	Maleinsäureanhydrid (gebunden)

2.2.2 Polystyrol-block-polyisopren-block-polystyrol 'SIS'

SIS ist ein Kompatibilisierungsmittel, das als Inhaltsstoff von Schmelzklebstoffen, Dichtungsmitteln, Asphalt und Ölgelen Verwendung findet. Des Weiteren wird es als Mo-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

difizierungsmittel für Thermoplaste, Duroplaste und Kautschukmischungen eingesetzt. Weitere Anwendungsbereiche sind Bauteile für den Automobilsektor, Sportprodukte, Schuhwerk und Folienmaterialien, welche durch Direktformung oder Extrusion hergestellt werden. Das Kompatibilisierungsmittel zeichnet sich durch eine hohe Festigkeit und geringe Viskosität aus. Diese Eigenschaften ermöglichen einfache Schmelz- und Lösungsverarbeitung. Die stark ausgeprägte Temperaturdegradation führt zur Vernetzung der Materialien. Der Glasübergang findet bei -65°C statt. SIS besitzt zudem einen hohen elektrischen Widerstand und ist beständig gegen Säuren und Laugen [24]. Tabelle 2.7 zeigt die Herstellerangaben von SIS.

Tab. 2.7: Herstellerangeben zu SIS [25]

SIS			
Methode	Datenblatt	Standard	Anmerkung
MFR	3 g/10 min		200 °C; 5 kg
Dichte	0,93 g/m^3		25 °C
Bruchdehnung	1200%	ASTM D 412	

2.3 Versuchsübersicht

In dieser Arbeit werden drei Versuchsreihen mit reinem Granulat durchgeführt. Zwei Versuchsreihen untersuchen die Alterung von PS und PP. Diese Versuchsreihen sind die Ofenalterung und die Mehrfachextrusion. Bei der Ofenalterung wird reines Granulat über 50 Tage bei konstant 80 °C thermisch-oxidativ gealtert. Bei der Mehrfachextrusion werden zehn Verarbeitungszyklen, bestehend aus Extrudieren und Mahlen, durchgeführt. Hierbei werden die Proben thermisch-oxidativ und mechanisch gealtert. Die dritte Versuchsreihe beschäftigt sich mit der Polymerblendbildung von PP und PS. Hierfür werden unterschiedliche Mengen an Kompatibilisierungsmitteln zu den Blends hinzugefügt und die Eigenschaften mit Blends ohne Kompatibilizer verglichen.
Abschließend werden noch zwei weitere Versuche mit Blends und Kompatibilisierungsmittel ausgeführt. Aus dem für das Recycling besser geeignetem Polystyrol und dem besseren Kompatibilisierungsmittel werden erneut Blends hergestellt. Diese werden mit einer höheren Dosis Kompatibilisierungsmittel und reinem Granulat erzeugt. Welches besser geeignet ist, soll aus den drei Versuchsreihen mit reinem Granulat ermittelt werden. Abschließend wird noch eine Versuchsreihe mit recyceltem PS und PP untersucht. Das Ausgangsmaterial hierfür wird aus Post Consumer Joghurtbechern gemahlen.

2.3.1 Ofenalterung

Um die thermisch oxidative Alterung zu untersuchen, werden unbearbeitetes Granulat und Rheologieproben des Reinmaterials in einem Ofen bei konstant 80 °C für 50 Tage

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

ausgelagert. Im Ofen befindet sich natürliche Atmosphäre. Alle 10 Tage werden 100 g Granulat als Probe entnommen. Aus dem entnommenen Granulat werden Proben für die Messungen und Versuche hergestellt. Abbildung 2.1 dokumentiert die durchgeführten Versuche mit den entnommenen Granulatproben.

	Ofenalterung																	
	PSGP						HIPS						PP2					
Tage im Ofen	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50
Zugversuch	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Schlagzugversuch	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rheologie	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
FTIR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
MFR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
TGA	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	

Abb. 2.1: Versuchsreihe mit den thermisch-oxidativ gealterten Proben

2.3.2 Mehrfachextrusion

Der Abbau des Reinmaterials bei mehrmaliger Verarbeitung wird durch die Mehrfachextrusionsversuche untersucht. Hierfür wird unverarbeitetes Granulat von den Reinmaterialien im Einschneckenextruder, siehe Unterabschnitt 2.4.2, zu Strängen extrudiert. Diese Stränge werden anschließend in der Mühle, siehe Unterabschnitt 2.4.3, zu Granulat gemahlen. Das erzeugte Granulat wird im Anschluss wieder zu Strängen extrudiert und dieser Kreislauf wird zehnmal wiederholt. Nach jedem Zerkleinern werden 100 g als Probe entnommen. Dadurch ergeben sich nach Abschluss der Mehrfachextrusion 30 Proben für alle drei Reinmaterialien zusammengezählt. Abbildung 2.2 stellt eine Übersicht dar, um die durchgeführten Versuche mit dem entnommenen Granulat der Mehrfachextrusion zu veranschaulichen.

	Mehrfachextrusion																													
	PSGP										HIPS										PP2									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zugversuch			x		x		x			x			x		x		x			x			x		x		x			x
Schlagzugversuch			x		x		x			x			x		x		x			x			x		x		x			x
Rheologie			x		x		x			x			x		x		x			x			x		x		x			x
FTIR			x		x		x			x			x		x		x			x			x		x		x			x
MFR	x		x			x	x			x	x		x			x	x			x	x		x			x	x			x
TGA					x					x					x					x					x					x

Abb. 2.2: Versuchsreihe der durch Mehrfachextrusion gealterten Proben

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

2.3.3 Blendversuche

Diese Versuchsreihe soll zeigen, welchen Einfluss die Kompatibilizer auf die PS-PP Blends haben. Der Hauptbestandteil der Blends wird vom PS gebildet. Dieser beträgt entweder 95 % oder 75 % der Gesamtmasse des Granulates. Hierfür wird das PSGP und das HIPS verwendet. Die restlichen 5 % bzw. 25 % werden mit PP2 aufgefüllt. Daher ergeben sich als Referenz für die Blends mit Kompatibilisierungsmittel vier Mischungen. Von jeder dieser Mischungen ohne Additive werden 100 g erzeugt. Für die Mischungen mit Additiven werden zwei Kompatibilizer verwendet: SIS und LUCO. Zu den 100 g der vier Ausgangsmischungen werden zusätzlich 3 g des jeweiligen Additives hinzugefügt. Die Mischungen mit Additiv bestehen also aus 103 g. Abbildung 2.3 fasst die Mischungsverhältnisse der Proben noch einmal zusammen.

	Ausgangsmaterial in g		Blendpartner in g		Additiv in g		Gesamtmasse in g
1	PSGP	95	PP2	5			100
2	PSGP	75	PP2	25			100
3	HIPS	95	PP2	5			100
4	HIPS	75	PP2	25			100
5	PSGP	95	PP2	5	SIS	3	103
6	PSGP	75	PP2	25	SIS	3	103
7	HIPS	95	PP2	5	SIS	3	103
8	HIPS	75	PP2	25	SIS	3	103
9	PSGP	95	PP2	5	LUCO	3	103
10	PSGP	75	PP2	25	LUCO	3	103
11	HIPS	95	PP2	5	LUCO	3	103
12	HIPS	75	PP2	25	LUCO	3	103

Abb. 2.3: Mischungsverhältnisse der Blends in Gramm

Die Mischung wird mittels Hochpräzisionswaage in einem Kunststoffbecher dosiert. Der Becher wird anschließend abgedeckt und geschüttelt um die Granulate und Additive zu vermischen. Um die Wirkung der Additive zu untersuchen, muss die Mischung extrudiert werden. Hierfür wird der Haake Mini Lab II verwendet. Als Ausgangsmaterial für die Probenpräparation der Versuche wird Granulat benötigt. Daher ist es erforderlich die erzeugten Stränge in der Schneidmühle wieder zu Granulat zu mahlen. Dies bedeutet, dass die Proben der Blendversuche bereits einmal vorverarbeitet und damit gealtert sind. Abbildung 2.4 stellt eine Übersicht der Versuche und unterschiedlichen Polymerblendausgangsmaterialien dar.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

	Blendversuche											
	Blends ohne Kompatibilizer				SIS				LUCO			
	PSGP 95% PP2 5%	PSGP 75% PP2 25%	HIPS 95% PP2 5%	HIPS 75% PP2 25%	PSGP 95% PP2 5% SIS 3%	PSGP 75% PP2 25% SIS 3%	HIPS 95% PP2 5% SIS 3%	HIPS 75% PP2 25% SIS 3%	PSGP 95% PP2 5% LUCO 3%	PSGP 75% PP2 25% LUCO 3%	HIPS 95% PP2 5% LUCO 3%	HIPS 75% PP2 25% LUCO 3%
Zugversuch	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Schlagzugversuch	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rheologie	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
MFR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Abb. 2.4: Versuchsreihe mit den Kompatibilizer

2.3.4 Versuche mit recyceltem Material

Abbildung 2.5 zeigt die Mischungsverhältnisse der Blends aus recyceltem Material. Für die Probenherstellung wurden Joghurtbecher aus PS und PP unterschiedlicher Marken gesammelt, gereinigt und sortiert. Die Becher wurden mit passendem Werkzeug in Streifen geschnitten und anschließend in der Mühle zu Granulat gemahlen. Aus dem Granulat wurden die für die einzelnen Messverfahren notwendigen Messkörper spritzgegossen, siehe Unterabschnitt 2.4.1 und gepresst, siehe Unterabschnitt 2.4.4.

	Ausgangsmaterial in g		Blendpartner in g		Additiv in g		Gesamtmasse in g
1	PS Becher	100					100
2	PP Becher	100					100
3	PS Becher	95	PP Becher	5			100
4	PS Becher	95	PP Becher	5	SIS	3	103
5	PS Becher	95	PP Becher	5	SIS	15	115

Abb. 2.5: Mischungsverhältnisse der Blends aus Recyclingmaterial in Gramm

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

2.4 Probenherstellung

2.4.1 Extrusion und Spritzguss mit Haake Mini Lab II und Mini Jet II

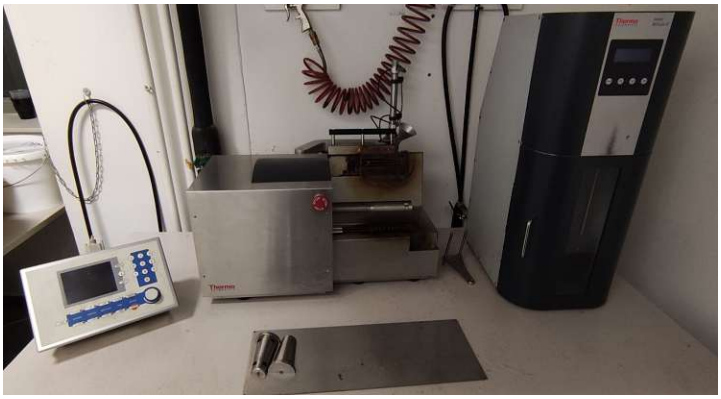

Abb. 2.6: HAAKE Mini Lab II und Mini Jet II

Abbildung 2.6 zeigt in der Mitte den Extruder HAAKE Mini Lab II und rechts die Spritzgussvorrichtung HAAKE Mini Jet II. Die erstgenannte Vorrichtung wurde zur Homogenisierung und zum Spritzgießen verwendet. Um die Granulatmischungen der Blendversuche zu homogenisieren, wurden die Mischungen aus Abbildung 2.4 mittels Waage dosiert, durchgeschüttelt und anschließend mittels Haake Mini Lab II extrudiert. Die extrudierten Stränge wurden abschließend in der Mühle zu Granulat gemahlen.

Für das Homogenisieren wurde eine Extrudertemperatur von 200 °C und eine Drehzahl 100 min^{-1} verwendet. Für die Erstellung der Proben für Zug- und Schlagzugversuche wurde diese Maschine ebenfalls verwendet. Zusätzlich wurde die angebaute Einfüllvorrichtung verwendet, die ca. 5 g Granulat fasst. Für das Spritzgießen selbst wurde die druckluftbetriebene Spritzgussvorrichtung HAAKE Mini Jet II eingesetzt. Die Schmelze wurde mittels beheizter Pistole aus dem Extruder entnommen und aus der Pistole durch einen pneumatisch angetriebenen Kolben in die zweiteiligen Spritzgussformen gedrückt. Tabelle 2.8 hält die Einstellungen für das Spritzgießen fest. Eine Werkzeugtemperatur von 105 °C musste gewählt werden, um die PSGP Proben unbeschädigt aus der Gussform entnehmbar zu machen.

Tab. 2.8: Prozessparameter beim Spritzgießen

Zylindertemperatur	200 °C
Werkzeugtemperatur	105 °C
Druck	350 bar
Zeit	10 s

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

2.4.2 Mehrfachextrusion mit EXTRON EX 18-26-1.5

Abb. 2.7: EXTRON EX 18-26-1.5

Für die Mehrfachextrusionsversuche wurde der Extruder EXTRON EX 18-26-1.5 eingesetzt (siehe Abbildung 2.7). Dieser besitzt einen deutlich größeren Materialdurchsatz als der Extruder Haake Mini Lab II. Um ausreichend Material für zehnmal 100 g Probenmaterial zu erhalten, war es erforderlich 1200 g Reinmaterial zu verarbeiten. Die zusätzlichen 200 g wurden als Verlust beim Mahlen und Extrudieren einkalkuliert. Tabelle 2.9 dokumentiert die eingestellten Parameter während der Mehrfachextrusion.

Tab. 2.9: Prozessparameter der Mehrfachextrusion

Drehzahl	70 $^{1}/$min
Temperatur Zone 1	165 °C
Temperatur Zone 2	200 °C
Temperatur Zone 3	200 °C

2.4.3 Mühle Pulverisette 19

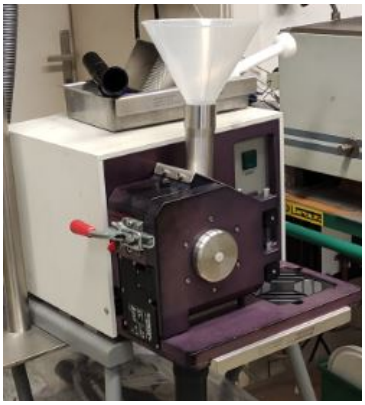

Abb. 2.8: Schneidmühle Pulverisette 19

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Um die extrudierten Stränge der Mehrfachverarbeitung und die homogenisierten Stränge der Polymerblendversuche weiter verarbeiten zu können, müssen diese zerkleinert werden. Hierfür wird die Schneidmühle Pulverisette 19 der Firma Fritsch, siehe Abbildung 2.8, eingesetzt. Das Granulat für die Versuche mit recyceltem Material wurde ebenfalls mit dieser Schneidmühle aus den gesammelten Joghurtbechern erzeugt.

2.4.4 Presse Collin P 200 P

Abb. 2.9: Presse Collin P 200 P

Abbildung 2.9 zeigt die verwendete Presse. Für die rheologischen und FTIR Messungen werden scheibenförmige Rundproben benötigt. Diese wurden aus Granulat bzw. aus einmalig extrudiertem und anschließend gemahlenem Pulver gepresst. Die Scheiben besitzen einen Durchmesser von 20 mm und eine Dicke von 1 mm. Tabelle 2.10 dokumentiert die Einstellungen an der Presse für alle zylindrischen Proben.

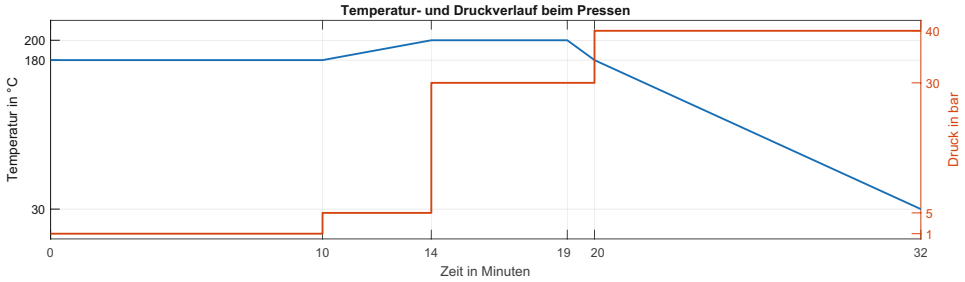

Abb. 2.10: Eingestellter Temperatur- und Druckverlauf an der Presse für die Rheologieprobenherstellung

Tab. 2.10: Prozessparameter der Presse

Temperatur [°C]	180	200	200	180	30
Zeit [min]	10	4	5	1	12
Druck [bar]	1	5	30	30	40
Heizrate [K/min]	0	0	0	0	4

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

2.5 Messmethoden

2.5.1 Zugverusch

Beim Zugversuch werden die mechanischen Eigenschaften der Probe quasi statisch und mit einachsiger Belastung ermittelt. Mit konstanter Dehngeschwindigkeit wird die eingespannte Probe gestreckt. Dabei wird die für die Dehnung notwendige Kraft gemessen. Vor dem Einspannen wird die Breite und Höhe der entgrateten Probe mittels Messschieber erfasst. Mit diesen Informationen wird auf die Spannung im Prüfquerschnitt der Probe zurückgerechnet. Die Probe wird bis zum Bruch oder bis zum Erreichen einer maximalen Spannung gedehnt. Während des Versuches wird die Längenänderung in Zugrichtung, sowie die Zugkraft gemessen. Abbildung 2.11 zeigt die verwendete Probenart. Tabelle 2.11 dokumentiert die Maße der erzeugten Zugproben. Die Zugversuchsproben wurden mittels HAAKE Mini Lab II und HAAKE Mini Jet II hergestellt.

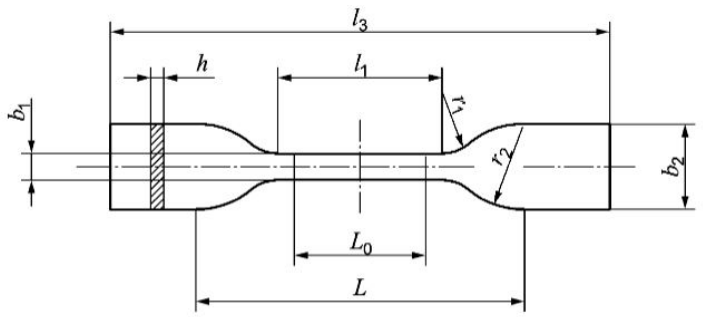

Abb. 2.11: Skizze der Zugprobenform [26]

Tab. 2.11: Maße der verwendeten Zugprobe in mm [26]

	Probenkörpertyp	**5A**
l_3	Gesamtlänge	> 75
b_2	Breite an den Enden	$12,5 \pm 1$
l_1	Länge des engen parallelen Teils	25 ± 1
b_1	Breite des engen Teils	$4 \pm 0,1$
r_1	Kleiner Radius	$8 \pm 0,5$
r_2	Großer Radius	$12,5 \pm 1$
L	Anfangsabstand der Klemmen	50 ± 2
L_0	Messlänge	$20 \pm 0,5$
h	Dicke	$2 \pm 0,2$

Verformungsfähige Proben beginnen sich im Bereich der plastischen Verformung einzuschnüren. Dies führt zu einer Reduktion des Probenquerschnittes und damit zu einer Erhöhung der tatsächlich wirkenden Spannung. In dieser Arbeit wird die technische

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Spannung ermittelt. Bei der Berechnung der technischen Spannung wird angenommen, dass der Probenquerschnitt im Bereich der Prüffläche für den Zeitraum des Versuches konstant bleibt. Für Spannungs-Dehnungs-Diagramme ist es allgemein üblich die technische Spannung zu verwenden.

Abbildung 2.12 zeigt ein schematisches Spannungs-Dehnungsdiagramm für Kunststoffe. Auf der Abszisse ist die Dehnung der Probenlänge in Prozent aufgetragen. Längenänderung durch ursprüngliche Länge ergibt die Dehnung. An der Ordinate sind die ermittelten Spannungen eingezeichnet. σ_B markiert die Bruchspannung, bei welcher die Probe versagt. σ_Y zeigt die Streckgrenze an. Nach Überschreiten dieser Spannung beginnt der Werkstoff zu fließen. [4]

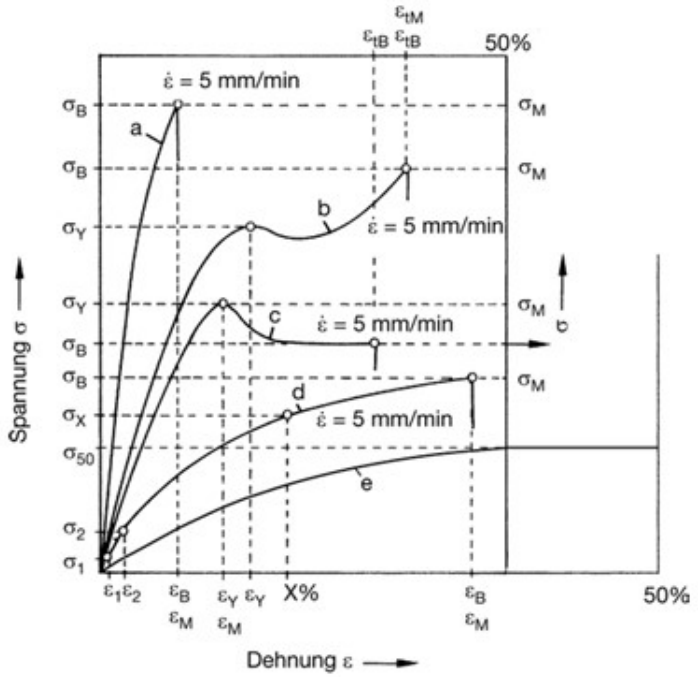

Abb. 2.12: Spannungs-Dehnungs-Diagramm [27]

(*a*) **Spröder Werkstoff:** Es findet kaum Dehnung statt bei gleichzeitig großem E-Modul. Dieses Verhalten ist bei PSGP unter der Glasübergangstemperatur zu erwarten.

(*b*) **und** (*c*) **Verstreckbare Kunststoffe:** Wobei bei (b) die Bruchspannung über der Streckgrenze liegt. Diese Verläufe weisen einen geringeren E-Modul auf als die Kurve des spröden Werkstoffes. Nach Erreichen der Streckgrenze folgt ein viskos-plastischer Bereich, indem es zu einer weiteren Erhöhung der Spannung kommen kann. Dieser Verlauf ist für die Kunststoffproben HIPS und PP2 zu erwarten.

(*d*) **Weichgemachter Kunststoff:** mit Bruchdehnung kleiner 50 %.

(*e*) **Gummiähnlicher Werkstoff:** mit Bruchdehnung größer 50 % [27].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

2.5.2 Schlagzugversuch

Die Proben für den Schlagzugversuch werden ebenfalls mittels HAAKE Mini Lab II und HAAKE Mini Jet II erzeugt. Gekerbt werden die Proben durch das Kerbgerät Caest Notch-Vist. Bei diesem Messverfahren wird die Schlagzugzähigkeit a_{tN} ermittelt. Dies ist die Energie die erforderlich ist, um den gekerbten Prüfkörper im gekerbten Bereich zu brechen. Hierfür wird ein Pendel aus einer festvorgelegten Anfangsposition fallen gelassen. Am tiefsten Punkt trifft der Kopf des Schlagpendels auf die Probe und verliert dabei einen Teil der anfänglichen kinetischen Energie. Die verbleibende Energie wird in potentielle Energie umgewandelt, da das Pendel auf der gegenüberliegenden Seite nach oben ausschlägt. Der Winkel des Ausschlags wird gemessen, um auf die verbleibende Energie nach dem Brechen der Probe rückzuschließen. Vor dem Versuch werden die Reibungsverluste im Leerlauf ohne Probe gemessen. Anhand dieser Daten kann ermittelt werden wie groß der Energieaufwand für das Brechen der Probe E_c war. Des Weiteren wird die Dicke der Probe und die Breite an der schmalsten Stelle der Kerbe mittels Messschieber erfasst um mittels Gleichung 2.1 die Schlagzugzähigkeit in kJ/mm^2 zu berechnen. x und h werden in mm eingesetzt. E_c ist in Joule einzusetzen [28].
Die Schlagzugversuche dieser Arbeit wurden nach der Norm DIN 8256 [28] durchgeführt. Für die Messung wurde das Instron Caest 9050 Pendelschlagwerk verwendet. Es wurde ein 15 g Querjoch eingesetzt mit einer Pendellänge von 231 mm und einer maximalen Schlagarbeit von 2 J. Die Reststegbreite beträgt bei allen, außer den reinen HIPS-Proben, 6 mm. Die Proben aus reinem HIPS mussten mit einer Reststegbreite von 5 mm gemessen werden, da der Fallhammer sonst nicht ausreichend Energie besitzt, um ein Versagen der Probe herbeizuführen.

$$a_{tN} = \frac{E_c}{x \cdot h} \cdot 10^3 \tag{2.1}$$

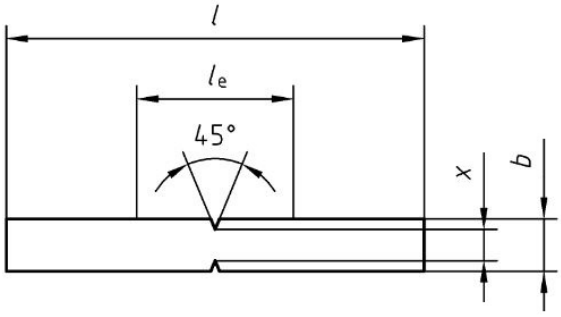

Abb. 2.13: Skizze der Schlagzugprobenform [28]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tab. 2.12: Maße der verwendeten Schlagzugprobe in mm [28]

	Probenkörpertyp	Typ 1
l	Länge	80 ± 2
b	Breite	$10 \pm 0,2$
x	Vorzugswert für das Maß	$6 \pm 0,2$
l_e	Einspannlänge	30 ± 2

2.5.3 Scherrheologie

In der industriellen Fertigung wird Kunststoffschmelze überwiegend geschert. Dieser Umstand macht die Messung scherrheologischer Eigenschaften besonders wichtig. Die Scherrheologie und Schmelzflussrate ermöglichen eine quantitative Beschreibung der Eigenschaften von Kunststoffschmelzen [6]. Bei der Scherrheologie wird komplexer Modul und komplexe Viskosität gemessen. Viskosität und mittlere molare Masse eines Kunststoffes korrelieren. Ein Stoff mit einer hohen mittleren molaren Masse besitzt eine höhere Viskosität als ein Werkstoff mit einer niedriger mittleren molaren Masse. Hohe Schmelzviskositäten werden beim Extrudieren benötigt, wohingegen sich Werkstoffe mit niedriger Schmelzviskosität für das Spritzgießen eignen [27].

Abbildung 2.14 zeigt die zwei Messkörpersysteme, welche für die Scherrheologie verwendet werden. Das Kegel-Platte-Messkörpersystem ist weiter verbreitet. Größter Vorteil ist eine vom Materialverhalten unabhängige homogene Schergeschwindigkeit im Messspalt. Die Höhe des Messspaltes direkt unter der Drehachse ist nahezu null. Wodurch es zu Verfälschungen der Messung kommen kann. Der Messkörper, welcher bei den Messungen dieser Arbeit verwendet wird, bildet ein Platte-Platte-Messkörpersystem. Bei diesem System hängt die Schergeschwindigkeit der Probe von dem Plattenabstand ab. Dies erfordert mathematische Korrekturen, ermöglicht allerdings gleichzeitig eine Erweiterung des Messbereiches. Die Probenbefüllung ist einfacher als beim Messsystem mit dem Kegel.

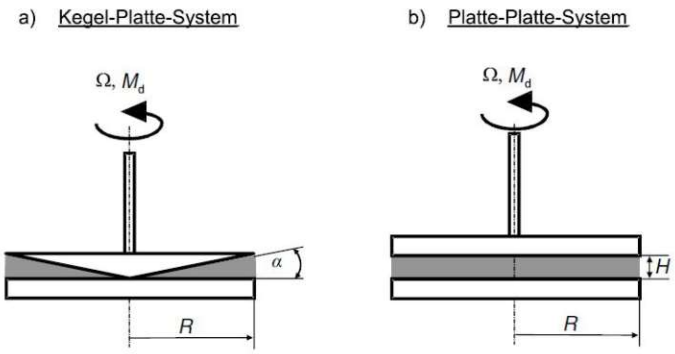

Abb. 2.14: Messkörpersysteme der Scherrheologie [6]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Der Schwingungsversuch wird in dieser Arbeit für die rheologischen Untersuchungen angewendet. Bei diesem Versuch wird der Scherwinkel zeitlich sinusförmig vorgegeben. Die bewegliche Platte des Platte-Platte Messkörpers führt also eine sinusförmige Schwingung aus.

Die Versuche in dieser Arbeit werden an einem Rotationsrheometer der Firma Anton Paar durchgeführt. Es werden Schwingversuche im Frequenzbereich von 0.1 bis 628 rad/s bei einer Temperatur von 200 °C durchgeführt. Das Drehmoment und die Winkelgeschwindigkeit des rotierenden Stempels des Rheometers werden aufgezeichnet. Aus den erhaltenen Daten werden in jedem Messpunkt die komplexe Viskosität sowie Speicher- und Verlustmodul ermittelt.

2.5.4 Fourier-Transform-Infrarotspektrometer 'FTIR'

Die Infrarotspektroskopie wird eingesetzt um die Grundzusammensetzung von organischen Stoffen zu ermitteln. Licht mit einer Wellenlänge von 750 nm bis 1 mm Wellenlänge gehört dem Infrarotspektrum an. Meist wird allerdings die Wellenzahl angegeben. Die Wellenzahl ist der Kehrwert der Wellenlänge. Die Probe wird mit Strahlung aus dem Infrarotbereich belichtet. Wird eine Atombindung von der Strahlung getroffen, so beginnt diese zu schwingen. Die Art der Schwingungen ist abhängig von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichtes. Jede Bindungsart benötigt einen anderen Teil des Infrarotspektrums. Daher wird nur Licht mit einer bestimmten Wellenlänge in Wärme- und Schwingungsenergie umgewandelt. Die Energie des absorbierten Spektrums reduziert sich nach dem Schwingungen angeregt werden. Durch einen Sensor wird ermittelt welche Wellenlängen reduziert werden. Die Reduktionen in der Wellenlänge können einzelnen Atombindungen zugeordnet werden. Die Menge der am Sensor ankommenden Strahlung wird erfasst und auf die zugehörige Wellenlänge im Diagramm aufsummiert. Die Menge der ankommenden Strahlung wird als Transmission bezeichnet. Eine 100 % Transmission deutet darauf hin, dass eine Wellenlänge von der Probe nicht beeinflusst wird und daher keine Atombindungen mit entsprechendem Absorbtionspektrum in der Probe vorhanden sind. 0 % Transmission bedeutet, dass die gesamte Strahlung absorbiert wird. Moderne Infrarotspektrometer messen alle Wellenlängen des IR-Bereichs parallel. Die Auswertung erfolgt anschließend mittels Fourier-Transformation. Daraus leitet sich die Bezeichnung des Verfahrens ab [29]. Abbildung 2.15 zeigt das Messprinzip des IR-Spektrometers.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

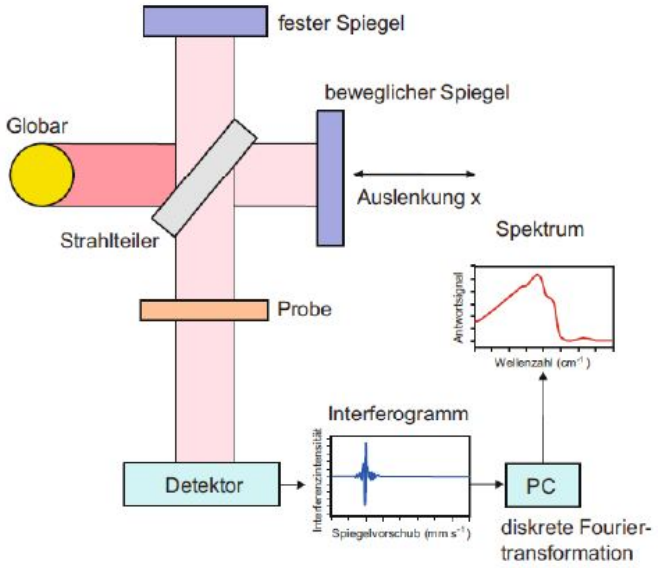

Abb. 2.15: FTIR-Messungsprinzip [29]

Für die FTIR-Messungen dieser Arbeit wurde das Spektrometer FTIR Bruker Tensor 27 eingesetzt. Das Messspektrum wurde auf 4000 - 400 cm^{-1} gestellt. Es wurde mit einer Auflösung von 4 cm^{-1} aufgezeichnet. Als Aufsatz diente DuraSampleIR II mit einfacher Reflexion.

2.5.5 Schmelzflussrate 'MFR'

Die Schmelzflussrate MFR oder auch Schmelzflussindex MFI gibt an wie viel Masse eines Prüfwerkstoffes durch eine Kapillardüse gedrückt wird. Dabei wird der Werkstoff mit einem konstanten Gewicht über einen Stempel belastet und auf eine konstante Temperatur erwärmt. Abbildung 2.16 zeigt links die Schnittansicht des Messprinzips und rechts die verwendete Vorrichtung in dieser Arbeit. Unter Zuhilfenahme einer Stoppuhr wird in konstanten Zeitintervallen mittels einer dafür angebrachten Vorrichtung, der Schmelzfluss abgetrennt. Es sollten mindestens sechs Proben in konstanten Zeitintervallen genommen werden. Anschließend werden die Massen der Proben mittels Präzisionswaage gemessen und es wird berechnet wie viel Gramm pro zehn Minuten durchschnittlich durch die Düse kommt. Dies ergibt den MFR in g/10 min.

Dieses Prüfverfahren wird überwiegend in der Produktions- und Eingangskontrolle verwendet. Die auftretenden Scherbeanspruchungen sind nicht vergleichbar mit den Schubspannungen, die bei der tatsächlichen Verarbeitung stattfinden. Dennoch ist dieses Prüfverfahren aufgrund seiner geringen Messdauer und der Einfachheit der Durchführung weit verbreitet [16].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

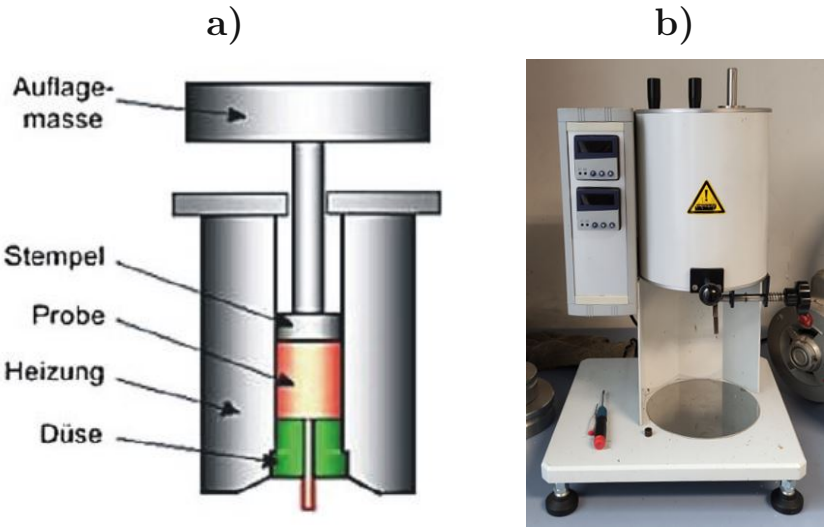

Abb. 2.16: (a) Querschnittsansicht der Messmethode [16]
(b) Verwendete Vorrichtung zum MFR messen

Bei den Versuchen dieser Arbeit wurde eine Auflagemasse von 2,16 kg verwendet. Beide Temperaturbereiche wurden auf 200 °C eingestellt. Als Messzeit wurden je nach Viskosität der Proben entweder 30 Sekunden oder eine Minute verwendet. Bei den Alterungsversuchen wurden für jede gealterte Messreihe desselben Werkstoffes dieselbe Messzeit eingesetzt. Es wurden mindestens sechs Abschläge je Probe genommen und deren Masse mittels Präzisionswaage ermittelt. Abschließend wurde in Excel der durchschnittliche MFR in g/10 min ermittelt.

Die Ergebnisse des MFR und die komplexe Viskosität lassen sich miteinander korrelieren. Der MFR ist indirekt proportional zur komplexen Viskosität. Eine kleine Schmelzfließrate entspricht einer hohen Viskosität. Eine große Schmelzfließrate deutet auf eine kleine Viskosität hin [27]. Um die MFR-Messungen mit den Viskositätsmessungen zu vergleichen, müssen diese umgerechnet werden. Hierfür wird der MVR-Wert benötigt. Dieser ist ein Maß dafür wie viel Schmelze, als Volumen gemessen, pro 10 min durch die Düse fließt [16]. MVR und MFR hängen über die Dichte gemäß Gleichung 2.2 zusammen [30]. Die Norm schreibt vor, die Dichte bei der gemessenen Temperatur zu verwenden. In dieser Arbeit werden die Schmelzdichten für die Abschätzung verwendet.

$$\mathrm{MVR} = \frac{\mathrm{MFR}}{\rho} \tag{2.2}$$

Abbildung 2.17 veranschaulicht wie die Ergebnisse der MVR-Messung in Punkte auf der komplexen Viskositätskurve umgerechnet werden können. Dem verwendeten Gewicht

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

von 2.16 kg wird eine Schubspannung von 19400 Pa zugeordnet. Die Division von Schubspannung und Scherrate ergibt die komplexe Viskosität [16]. Der Vergleich vom Umrechnungsergebnis und rheologischem Messergebnis findet sich in Unterabschnitt 3.1.1.

Düse: L = 8.00 mm, R = 1.05 mm; $D_{Zylinder}$ = 9.55 mm

Auflagemasse M / kg	x 9 →	Schubspannung τ / kPa
2.16		19.4
10.00		89.9
21.60		194.1

Scherrate:

$$\dot{\gamma} = 1.85 \cdot \frac{MVR}{cm^3/10min} s^{-1}$$

Viskosität:

$$\eta = \tau / \dot{\gamma}$$

Abb. 2.17: Umrechnung von MVR-Wert in Komplexe Viskosität und Kreisfrequenz [16]

Tabelle 2.13 dokumentiert die Werte für Schmelzdichten, welche in dieser Arbeit für die Umrechnung verwendet wurden. Die Schmelzdichte für PSGP und PP2 wurde nach [31] geschätzt. Die Schmelzdichte für HIPS wurde [32] entnommen.

Tab. 2.13: Verwendete Dichte für die Berechnung [33]

Werkstoff	Schmelzdichte in g/cm^3
PSGP	0.94
HIPS	0.95
PP2	0.76

2.5.6 Thermogravimetrische Analyse 'TGA'

Abb. 2.18: TGA 2050

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Bei der thermogravimetrischen Analyse wird die Änderung der Masse einer Polymerprobe als Funktion von Zeit oder Temperatur erfasst [34]. Die Probe liegt in einem Tegel, welcher wiederum über einen hauchdünnen Platindraht an einer Balkenwaage befestigt ist. Gewichtsänderungen in einem Bereich kleiner 10 µg können festgestellt werden [6]. Das Ergebnis der Messung ist ein Maß für die Wärmebeständigkeit, Oxidationsstabilität, Wirksamkeit von Alterungsschutzmittel und den Gehalt anorganischer Füllstoffe. Ausgasung und Zersetzung der Probe lassen sich mit dieser Messmethode untersuchen [27]. Die Messung erfolgt unter einem vorgegebenen Temperaturverlauf und einer vorgegebenen Atmosphäre. Bei Messungen mit isothermer Reaktionsführung wird die Probe auf einer fixen Temperatur gehalten und es wird aufgezeichnet, wie sich die Masse mit verstreichender Zeit ändert. Bei Messungen mit konstanten Heizraten, wird die Probe von Raumtemperatur aus auf eine Temperatur erwärmt, über der sich die Probe nicht weiter zersetzen kann. Hierbei wird die Masse als Funktion der steigenden Temperatur aufgezeichnet [34].

Abbildung 2.18 zeigt die für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche verwendete Messvorrichtung von Texas Instruments. Für die Messung wurden Massen an Prüfmaterial von 20±2 mg verwendet. Je nach Masse der unverarbeiteten Granulatkörner wurden entweder ganze Granulatkörner oder Splitter als Probe präpariert. Für Messserien des selben Werkstoffes wird darauf geachtet einen einheitlichen Probentyp zu verwenden. Während der Messung wird die Probe von Raumtemperatur auf 650 °C erwärmt. Dies geschieht bei konstanter Heizrate von 10 °C/min. Der Ofen wird mit einem Gasgemisch aus 90 ml/min Luft und 10 ml/min Stickstoff belüftet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit vorgestellt. Als erstes werden die Ergebnisse der Alterungsversuche dargestellt, anschließend die Ergebnisse der Blendversuche und danach die Ergebnisse der Blendversuche mit erhöhtem Kompatibilisierungsmittelanteil. Am Ende des Kapitels sind die Ergebnisse der Versuche mit recyceltem Material zu finden. Die Diagramme wurden in Origin 2019 erstellt. Bei den Balkendiagrammen gibt die Höhe der Balken den arithmetischen Mittelwert der Messergebnisse wieder. Am oberen Ende der Balken befindet sich ein Fehlerbalken, welcher den Standardfehler der Messwerte anzeigt.

3.1 Ergebnisse der Alterungsversuche

Als Alterungsversuche sind die Versuche der Mehrfachextrusion und der Ofenalterung zu verstehen. Die Ergebnisse beider Versuchsreihen werden im Folgenden gegenübergestellt. Links befinden sich als Bild a) die Ergebnisse der Ofenalterung und rechts als Bild b) die Messungen der mehrfach extrudierten Proben.

3.1.1 Vergleich der Ergebnisse von Rheologie und MFR

Dieses Unterkapitel demonstriert wie die Ergebnisse aus Rheologie und MFR-Messung verglichen werden können. Es ist wichtig anzumerken, dass die Werte der komplexen Viskosität beider Versuche nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Es können also nicht Punkte in den Diagrammen der Scherrheologie aus den MFR-Werten berechnet werden. Dies liegt daran, dass bei den Messungen völlig unterschiedliche Belastungen stattfinden. Bei der MFR-Messung wird die Schmelze translatorisch durch eine Düse gedrückt, während bei der Rheologie eine rotierende Schwingung in die Schmelze eingebracht wird. Aus der Umrechnung geht lediglich hervor, bei welchen Scherraten die KV-Kurven miteinander verglichen werden müssen. Aus den berechneten komplexen Viskositäten kann nur abgeschätzt werden in welchem Größenverhältnis die zugehörigen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Punkte auf den KV-Kurven in etwa liegen müssen. Abbildung 3.1 stellt die Ergebnisse der rheologischen und MFR-Messungen der Reinmaterialien gegenüber. Tabelle 3.1 zeigt die Umrechnungsergebnisse nach Unterabschnitt 2.5.5.

Die aus den MFR-Werten berechneten Scherraten aus Tabelle 3.1 wurden mit den entsprechenden Farben in Abbildung 3.1 a) eingezeichnet. Zu diesen Scherraten lässt sich ein zugehöriger Punkt auf der Linie der entsprechenden komplexen Viskosität ermitteln. Dies ist die zugehörige Viskosität der scherrheologischen Messung. Diese Werte dürfen nicht direkt miteinander verglichen werden, sondern nur relativ zueinander. In Abbildung 3.1 Bild a) ist erkennbar, dass die KV von PSGP, bei der berechneten Scherrate, höher ist als die von HIPS. Dies ist auch bei den berechneten Werten in Abbildung 3.1 der Fall. Dasselbe gilt für die berechneten Werte von PP2.

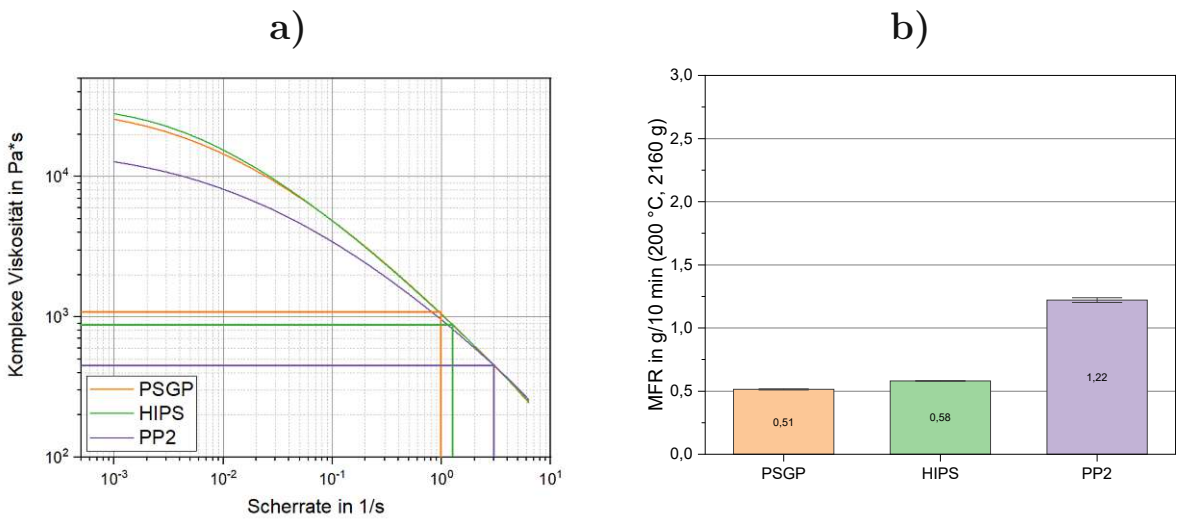

Abb. 3.1: Vergleich von a) komplexer Viskosität und b) Schmelzflussrate der Reinmaterialien aus Demonstrationszwecken

Tab. 3.1: Umrechnungsergebnisse der MFR-Werte für die Reinmaterialien

	Dichte g/cm³	MFR g/10 min	MVR cm³/10 min	Scherrate s^{-1}	KV Pa*s
PSGP	0,94	0,51	0,54	1,0	19328
HIPS	0,95	0,58	0,61	1,1	17176
PP2	0,76	1,22	1,61	3,0	6533

3.1.2 Rheologie: Komplexe Viskosität

Bei der Auswertung der scherrheologischen Untersuchungen werden zwei Arten von Diagrammen erstellt. Die erste Art stellt die komplexe Viskosität über die Scherrate dar. Bei

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

der zweiten Diagrammart werden Speicher- und Verlustmodul über die Kreisfrequenz der eingeprägten Schwingung des Messstempels aufgetragen. Dabei wird besonderer Wert auf die sogenannten Crossoverpoints gelegt. Dies sind die Punkte, an denen sich die Linien von Verlust- und Speichermodul schneiden. Besitzen die gealterten Proben Crossoverpoints an anderen Stellen als das Ausgangsmaterial, so kann aus der Information wohin sich die Punkte verschieben auf Änderungen der MM und Molmassenverteilung geschlossen werden [35]. Die Diagramme mit den Crossover-Punkten finden sich in Unterabschnitt 3.1.3 wieder.

Abbildung 3.2 gibt die komplexe Viskosität der PSGP-Proben bei unterschiedlichen Scherraten wieder. Bild a) stellt die Ergebnisse der im Ofen gealterten Proben dar. Sämtliche Viskositätskurven der über unterschiedliche Zeiträume gealterten Proben liegen praktisch übereinander. Daher ist davon auszugehen, dass sich die komplexe Viskosität der PSGP-Proben nicht durch thermisch-oxidative Alterung bei 80 °C verändert. Bild b) zeigt die Auswertung der Proben, welche durch Mehrfachextrusion gealtert wurden. Hier ist deutlich sichtbar, dass die Proben bei den kleinsten gemessenen Scherraten unterschiedliche komplexe Viskositäten zeigen. Mit steigenden Scherraten nähern sich die Kurven einander an, bis sie schließlich ineinander übergehen. Je öfter das Granulat verarbeitet wurde umso geringer wird dessen Viskosität. Durch die thermisch-mechanische Beanspruchung während der Mehrfachextrusion kommt es zu einem signifikantem Abbau der komplexen Viskosität beim PSGP. Tabelle 3.2 zeigt die umgerechneten MFR-Werte, welche für die Alterung der PSGP-Proben in Unterabschnitt 3.1.7 ermittelt wurden. In Unterabschnitt 2.5.5 ist beschrieben wie diese Umrechnung durchgeführt wurde. In Unterabschnitt 3.1.1 wird gezeigt wie die Umrechnung mit den Diagrammen der Rheologie vergleichbar ist. Die Ergebnisse stimmen sehr gut überein.

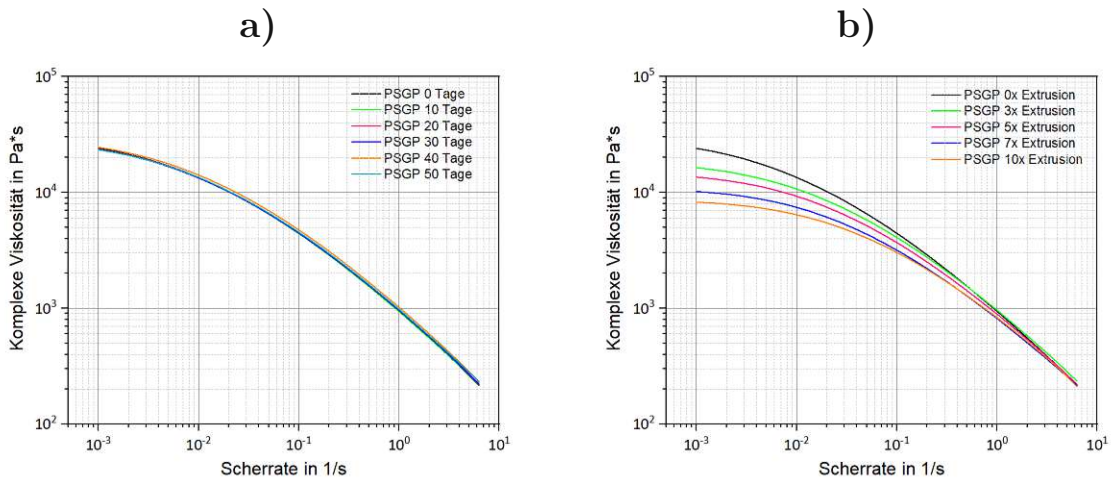

Abb. 3.2: Komplexe Viskosität der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tab. 3.2: Umrechnungsergebnisse der MFR-Werte aus Unterabschnitt 3.1.7 für PSGP

PSGP	Ofenalterung		Mehrfachextrusion		PSGP
	Scherrate 1/s	komplex. Viskosität Pa*s	Scherrate 1/s	komplex. Viskosität Pa*s	
0 Tage	1,0	19328	1,0	19328	0x Extru
10 Tage	0,9	20536	1,0	20117	1x Extru
20 Tage	0,9	20536	1,2	15899	3x Extru
30 Tage	0,9	20973	1,8	10953	6x Extru
40 Tage	1,0	19715	2,0	9857	7x Extru
50 Tage	1,0	19715	2,8	6942	10x Extru

Abbildung 3.3 zeigt die komplexen Viskositätskurven der HIPS-Proben. Die Ergebnisse der Ofenalterung in Bild a) zeigen keine Änderung der Viskosität der Proben. Bild b) hingegen belegt, dass es bei der Mehrfachverarbeitung zu einer Reduktion der Viskosität kommt. Wie schon zuvor beim PSGP gilt auch hier, dass die Proben, welche öfter verarbeitet wurden eine geringere Viskosität bei niedrigen Scherraten aufweisen. Die Abnahme der Viskosität mit der Alterung ist hier allerdings deutlich geringer als beim PSGP. Tabelle 3.3 zeigt die umgerechneten MFR-Werte der gealterten HIPS-Proben, welche sehr gut mit den rheologischen Messungen übereinstimmen.

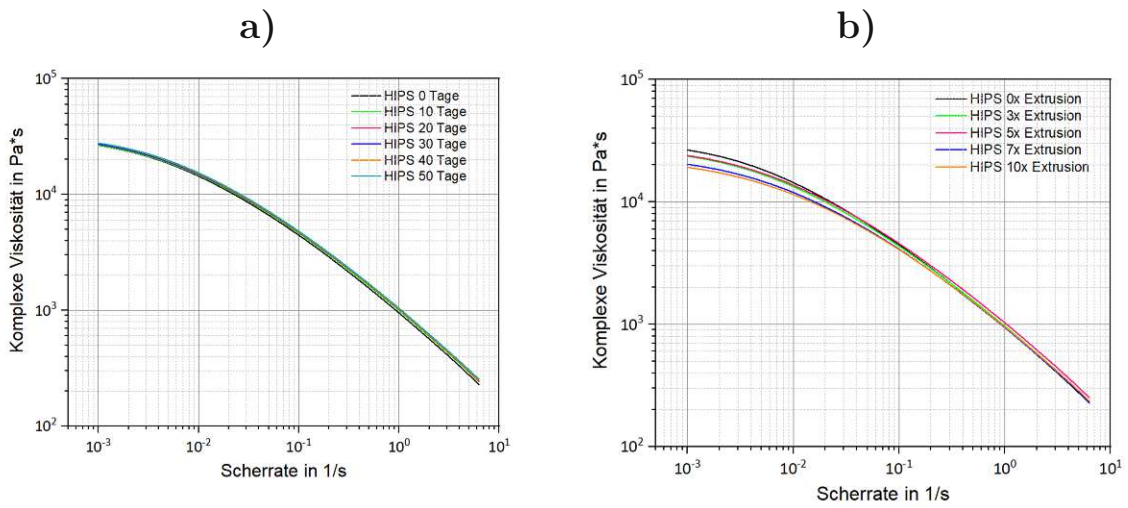

Abb. 3.3: Komplexe Viskosität der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Tab. 3.3: Umrechnungsergebnisse der MFR-Werte aus Unterabschnitt 3.1.7 für HIPS

HIPS	Ofenalterung		Mehrfachextrusion		HIPS
	Scherrate 1/s	komplex. Viskosität Pa*s	Scherrate 1/s	komplex. Viskosität Pa*s	
0 Tage	1,1	17176	1,1	17176	0x Extru
10 Tage	1,2	16604	1,4	14232	1x Extru
20 Tage	1,2	16331	1,5	12938	3x Extru
30 Tage	1,2	16604	1,6	12149	6x Extru
40 Tage	1,2	16068	1,4	13836	7x Extru
50 Tage	1,1	17176	1,9	10165	10x Extru

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Abbildung 3.4 veranschaulicht die rheologischen Messungen der PP2-Proben. Die Viskositätskurven der im Ofen gealterten Proben liegen nahe beieinander, aber nicht übereinander. Die Annahme dass die Viskosität von Proben die länger gealtert wurden geringer ist als die Viskosität von Proben die kürzer gealtert wurden, kann hier nicht getätigt werden. Da die Viskositätskurve der 50 Tage gealterten Probe über der der 0 Tage gealterten Probe liegt und gleichzeitig die Kennlinie der 20 Tage gealterten Probe unter der der 0 Tage gealterten Probe liegt. Bis 30 Tage scheint die Viskosität mit zunehmender Alterung geringer zu werden. In den folgenden 20 Tagen findet eine Trendumkehr statt und die Viskosität beginnt wieder zu steigen. Die Viskosität der am längsten gealterten Probe ist gering höher als die Viskosität des ungealterten Materials. Die Ergebnisse der mehrfach extrudierten Proben in Bild b) zeigen im Vergleich zu den im Ofen gealterten Proben aus Bild a) eine deutlich größere Reduktion der Viskosität. Des Weiteren ist hier auch ein Trend zu beobachten. Je öfter das Material verarbeitet wurde, umso geringer ist dessen komplexe Viskosität. Dieses Verhalten ist bei allen mehrfach extrudierten Proben zu beobachten. Tabelle 3.4 dokumentiert die umgerechneten MFR-Werte von PP2. Die Ergebnisse stimmen hervorragend überein.

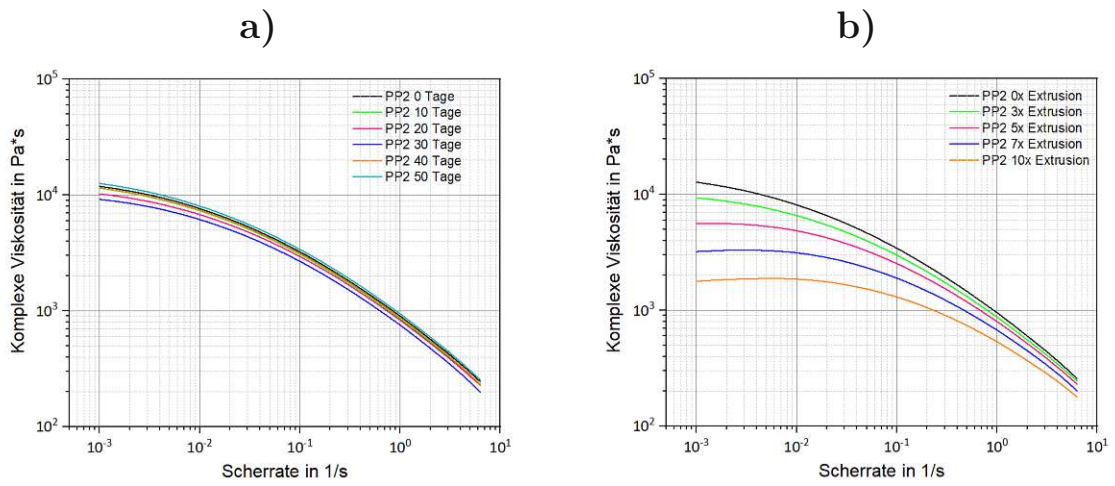

Abb. 3.4: Komplexe Viskosität der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Tab. 3.4: Umrechnungsergebnisse der MFR-Werte aus Unterabschnitt 3.1.7 für PP2

	Ofenalterung		Mehrfachextrusion		
PP2	Scherrate 1/s	komplex. Viskosität Pa*s	Scherrate 1/s	komplex. Viskosität Pa*s	**PP2**
0 Tage	3,0	6479	3,0	6479	0x Extru
10 Tage	3,1	6325	4,0	4801	1x Extru
20 Tage	3,1	6178	4,7	4129	3x Extru
30 Tage	3,3	5948	6,5	3007	6x Extru
40 Tage	3,1	6325	10,5	1853	7x Extru
50 Tage	2,9	6697	13,8	1406	10x Extru

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tabelle 3.5 vergleicht die komplexen Viskositäten der Proben bei einer Scherrate von 0,001 1/s. Dieser Punkt wurde gewählt, da dort der größte Unterschied zwischen den Messwerten vorliegt. Es werden nur die Ergebnisse der Mehrfachextrusion herangezogen, da sich bei der Ofenalterung kaum Änderungen ergeben. Anhand dieses Bildes soll objektiv beurteilt werden, bei welcher Probe sich die größte Änderung der Viskosität ergibt. Verglichen wird die komplexe Viskosität des Ausgangsmaterials mit dem zehnfach extrudierten Material. Die Auswertung ergibt, dass die Viskositätsänderung von HIPS durch die Mehrfachextrusion am geringsten ist. Den PP2-Proben widerfährt die deutlichste Reduktion der Viskosität. Die Viskosität der PSGP-Probe sinkt auf mehr als die Hälfte der ursprünglichen Viskosität und liegt mit ihrer Änderung zwischen den beiden anderen Werkstoffen.

Tab. 3.5: Änderung der komplexen Viskosität bei 0.001 1/s

Probe	Zahl der Verarbeitungszyklen	Komplexe Viskosität bei 0.001 1/s in Pa*s	Änderung in %
PSGP	0 x extrudiert	23996	66%
	10 x extrudiert	8246	
HIPS	0 x extrudiert	26580	28%
	10 x extrudiert	19173	
PP2	0 x extrudiert	12771	86%
	10 x extrudiert	1781	

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Alterung der Proben im Ofen keine, bis minimale, Veränderungen der Viskosität mit sich bringt. Die Mehrfachextrusion hingegen führt bei allen untersuchten Werkstoffen zu einer Verringerung der komplexen Viskosität mit zunehmender Anzahl der Verarbeitungszyklen. Beim HIPS fällt die Veränderung am geringsten aus. PSGP altert unter den selben Bedingungen etwas schneller und PP2 verringert seine komplexe Viskosität am deutlichsten.

3.1.3 Rheologie: Crossover-Punkte

In diesem Kapitel werden die Speicher- und Verlustmodul-Kurven der gealterten Proben untersucht. Der Fokus liegt dabei auf den Schnittpunkten der beiden Kurven. Dieser wird auch Crossover-Punkt genannt. Aus der Verschiebung der Punkte relativ zueinander durch die Alterungsprozesse kann ermittelt werden wie sich die mittlere Molmasse (MM) und die Verteilung der mittleren Molmasse (MMV) im Probenkörper verändert [35]. Die Skalierung der Diagramme ist nicht von Bedeutung. Abbildung 3.5 zeigt wie die relative Lage der Crossover-Punkte zueinander zu deuten ist.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

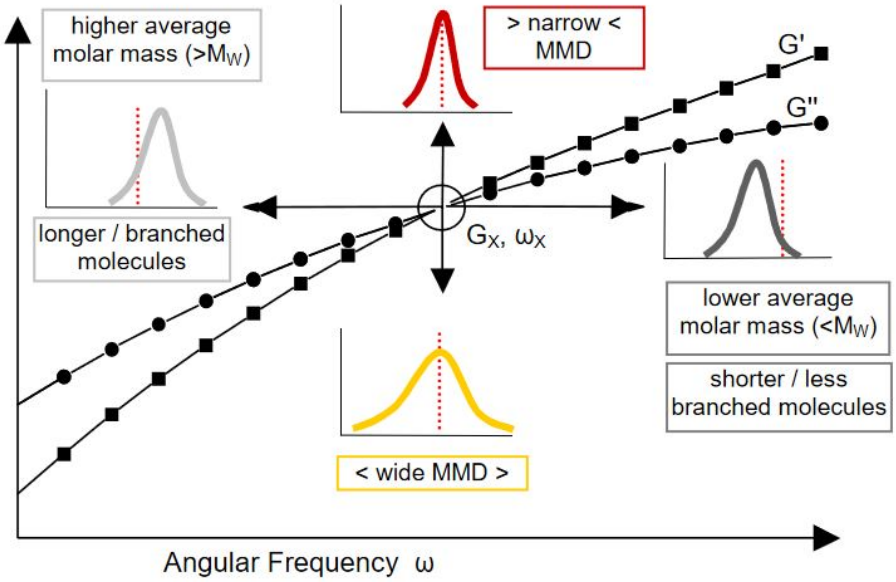

Abb. 3.5: Interpretationsschema der Crossover-Punkte [35]

Abbildung 3.6 zeigt die Schnittpunkte der Speicher- und Verlustmodulkurven der PSGP-Proben. Das linke Diagramme zeigt die Crossover-Punkte der im Ofen gealterten PSGP-Proben. Die Schnittpunkte liegen sehr nahe beieinander und es ist kein Trend zu erkennen. Daher ist anzunehmen, dass sich die mittlere MM und MMV kaum durch die Alterung im Ofen verändert. Die verstreute Lage der Punkte kann mit Messungenauigkeiten begründet werden. Bei den Crossover-Punkten der Proben, welche durch mehrmaliges Extrudieren und Mahlen gealtert wurden, ist ein eindeutiger Trend erkennbar. Die Punkte wandern mit zunehmender Anzahl an Verarbeitungszyklen nach rechts oben. Daraus ist zu schließen, dass bei der Mehrfachverarbeitung eine Reduktion der mittleren MM und der MMV auftritt.

Diese Beobachtungen stimmen teilweise mit [36] überein. In dem Paper wurde PS im Ofen und mittels Rheometer gealtert. Die mittlere MM der im Ofen gealterten Proben des Papers ändert sich auch bei 164 °C kaum. Dies stimmt sehr gut mit den Ergebnissen der Ofenalterung bei 80 °C in dieser Arbeit überein. Die Autoren des Papers geben an durch die Alterung im Rheometer eine Reduktion der mittleren MM bei gleichzeitiger Verschmälerung der MMV erhalten zu haben. Dies stimmt nur teilweise mit den Ergebnissen in dieser Arbeit überein.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

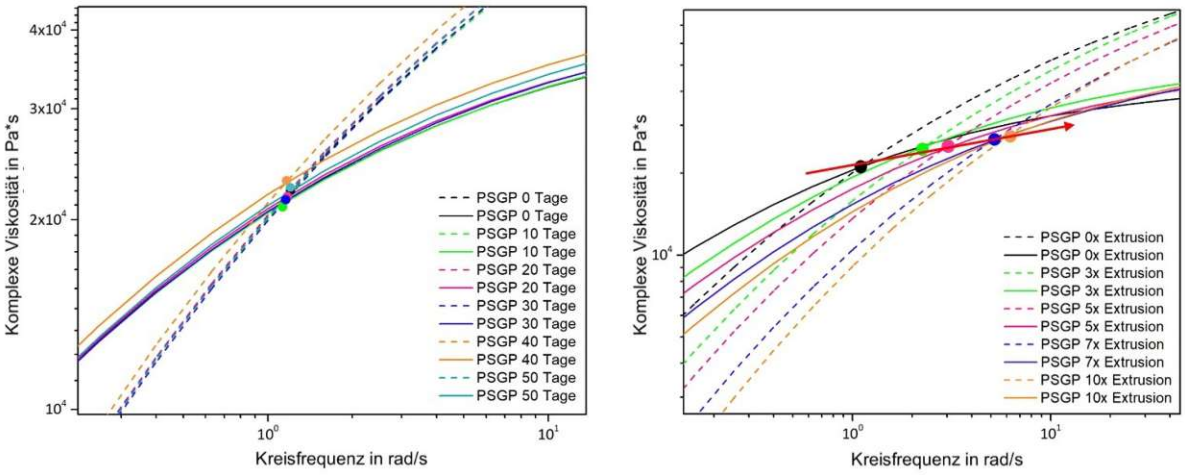

Abb. 3.6: Crossover-Punkte der **PSGP**-Proben, links Ofenalterung, rechts Mehrfachextrusion

Abbildung 3.7 zeigt die Ergebnisse der Speicher- und Verlustmodulmessung der gealterten HIPS-Proben. Die Schnittpunkte der Ofenalterung werden im linken Diagramm dargestellt. Die Crossover-Punkte zeigen den Trend einer Verschiebung nach rechts oben mit zunehmender Anzahl an gealterten Tagen. Allerdings ist hervorzuheben, dass die horizontale Bewegung der Punkte im Vergleich mit der vertikalen kaum nennenswert ist. Die Kreisfrequenz aller Schnittpunkte liegt sehr nahe beieinander. Dies impliziert den Schluss, dass die MMV enger wird, bei gleichbleibender mittlere MM. Die Makromoleküle der im Ofen gealterten HIPS-Proben gleichen ihre mittlere MM also bei zunehmender Alterung aneinander an. Die Messungen der mit Mehrfachextrusion gealterten Proben werden im rechten Diagramm gezeigt. Hier ist eindeutig zu erkennen, dass die Schnittpunkte sich nach rechts oben verschieben. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Ofenalterung findet hier eine deutlichere horizontale Verschiebung der Schnittpunkte statt. Der Trend der Verschiebung der Punkte bedeutet, dass die mittlere MM und die Breite der MMV der HIPS-Proben sich durch die Mehrfachextrusion reduzieren. Dies stimmt mit den Ergebnissen aus Abbildung 3.3 überein. Bei der Ofenalterung ist praktisch keine Änderung der Viskosität erkennbar, während bei der Mehrfachextrusion eine Reduktion stattfindet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

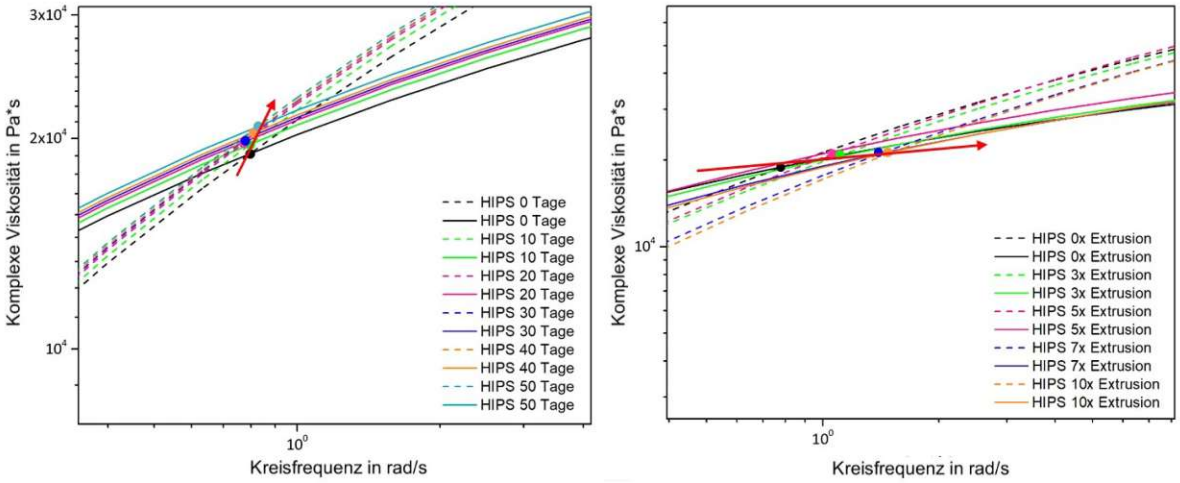

Abb. 3.7: Crossover-Punkte der **HIPS**-Proben, links Ofenalterung, rechts Mehrfachextrusion

Abbildung 3.8 dokumentiert die Ergebnisse der Speicher- und Verlustmoduluntersuchungen der gealterten PP2-Proben. Bei den Crossover-Punkten der Ofenalterung ist derselbe Trend wie in Abbildung 3.4 Bild a) zu beobachten. Die Punkte der ersten 30 Tage im Ofen bewegen sich nach links unten, danach bewegen sich die Punkte in die entgegengesetzte Richtung und der Punkt der 50 Tage gealterten Probe kommt über dem Punkt des ungealterten Materials zu liegen. Die MMV scheint durch die thermo-oxidative Alterung in den ersten 30 Tagen breiter zu werden. Durch weitere Auslagerung über die ersten 30 Tage hinaus, beginnt die MMV schmäler zu werden. Nach 50 Tagen Alterung ist die MMV geringer als die MMV des ungealterten Materials. Die Schnittpunkte der Mehrfachextrusion in Bild b) zeigen einen deutlicheren Trend. Hier wandern die Schnittpunkte nach rechts oben, was wiederum auf eine Reduktion der mittleren MM und einer Verschmälerung der MMV schließen lässt.

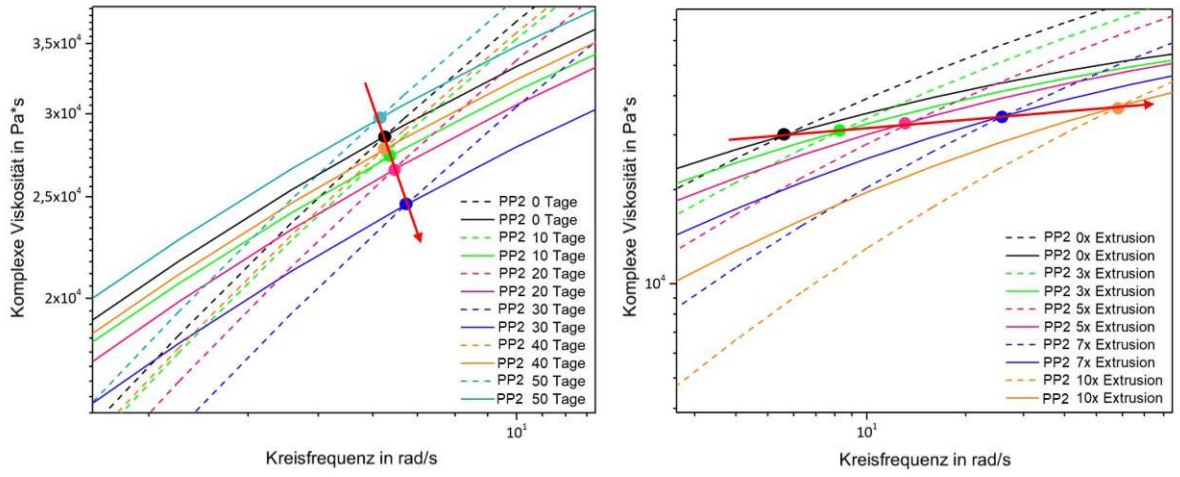

Abb. 3.8: Crossover-Punkte der **PP2**-Proben, links Ofenalterung, rechts Mehrfachextrusion

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

In [8] steht geschrieben, dass nieder molekulare Thermoplaste dazu neigen geringere mechanische Eigenschaften und Viskositäten zu besitzen. Demnach sollte eine Verschiebung der Crossover-Punkte nach rechts mit einer Reduktion der Viskosität und der mechanischen Eigenschaften korrelieren. Bei den Ergebnissen der Mehrfachextrusion sollte dies am deutlichsten sichtbar sein. In Tabelle 3.5 wurde eine Reduktion der Viskosität durch die Alterungsmethode Mehrfachextrusion bei allen Werkstoffen festgestellt. In Unterabschnitt 3.1.4 wurde bei den Werkstoffen PSGP und PP2 eine Verringerung des E-Moduls nachgewiesen. In Unterabschnitt 3.1.5 wurde für PSGP und PP2 eine Abnahme der Schlagzugzähigkeit detektiert. Beim HIPS änderten sich die mechanischen Eigenschaften durch die Alterungsmaßnahmen kaum. Die bisherigen Ergebnisse korrelieren sehr gut miteinander.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Ofenalterung einen geringen Einfluss auf die Veränderung der mittleren MM und MMV hat. Die Mehrfachextrusion führt bei den Proben dazu, dass die mittleren Molmassen geringer werden und die Breite der MMV schmäler werden. Diese Beobachtungen wurden bei allen Proben gemacht.

3.1.4 Zugversuch

Abbildung 3.9 zeigt die gemessenen Werte für die Elastizitätsmodule während des Zugversuchs für die PSGP-Proben. Die Balken stellen den Mittelwert von mindestens fünf gemessenen Proben dar. Die gemessenen Werte der Ofenalterung zeigen keinen offensichtlichen Trend. Die Elastizitätsmodule liegen mit 5 % Standardabweichung um einen gemeinsamen Mittelwert von 2840,5 MPa verteilt. Daher ist anzunehmen, dass die Alterung im Ofen bei 80 °C keinen signifikanten Einfluss auf den E-Modul von PSGP hat. Bei der Mehrfachextrusion scheint der Abbau erst zwischen dem siebenten und zehnten Verarbeitungszyklus stattzufinden. Bis zum siebenten Verarbeitungszyklus scheinen die Werte im geringen Maße abzunehmen. Der E-Modul nach zehnmaliger Extrusion beträgt Zweidrittel des E-Moduls des ungealterten Ausgangsmaterials.

Die gemessenen Werte für das ungealterte PSGP stimmen sehr gut mit der Literatur überein [27].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

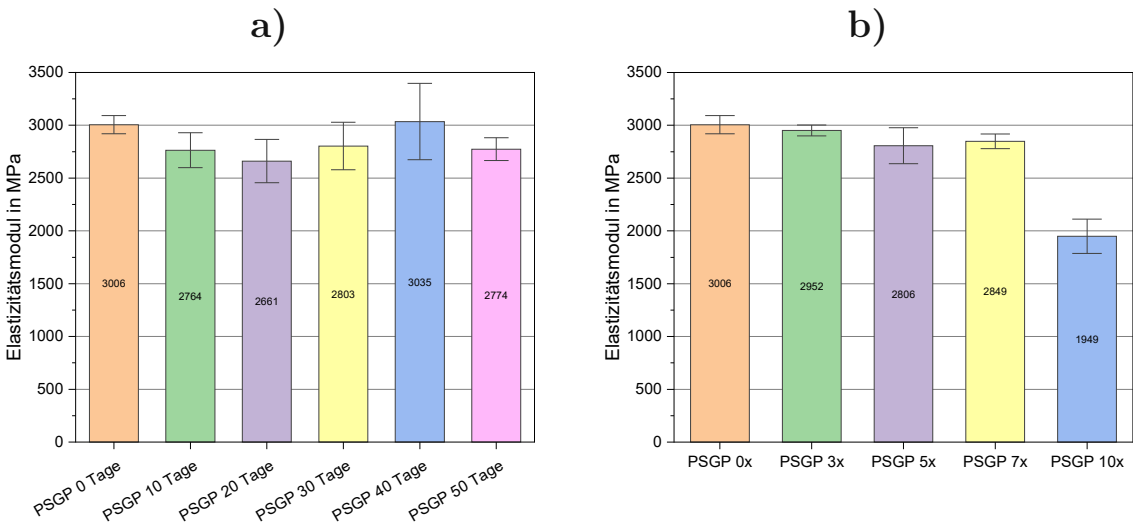

Abb. 3.9: Elastizitätsmodule der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Abbildung 3.10 dokumentiert die Bruchdehnung der PSGP-Proben während des Zugversuchs. Die Bruchdehnungswerte der Ofenalterung liegen mit einer Standardabweichung von 13 % um einen gemeinsamen Mittelwert von ca. 3 % verteilt. Auch hier ist anzunehmen, dass keine trendhafte Änderung der Bruchdehnung durch die Alterung im Ofen stattfindet und die Bruchdehnung in etwa konstant bleibt. Die Messungen der Mehrfachextrusion lässt ebenfalls vermuten, dass es scheinbar keinen Abbau der Bruchdehnung gibt. Die Messwerte liegen mit einer Standardabweichung von 11 % um einen gemeinsamen Mittelwert von 3,3 % verteilt.

Die Literatur [27] stimmt mit den gemessenen Bruchdehnungen der ungealterten Proben überein. Durch die Alterungsmaßnahmen kommt es teilweise zu einer gering höheren Bruchdehnung als laut dem zitierten Buch zu erwarten wäre.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

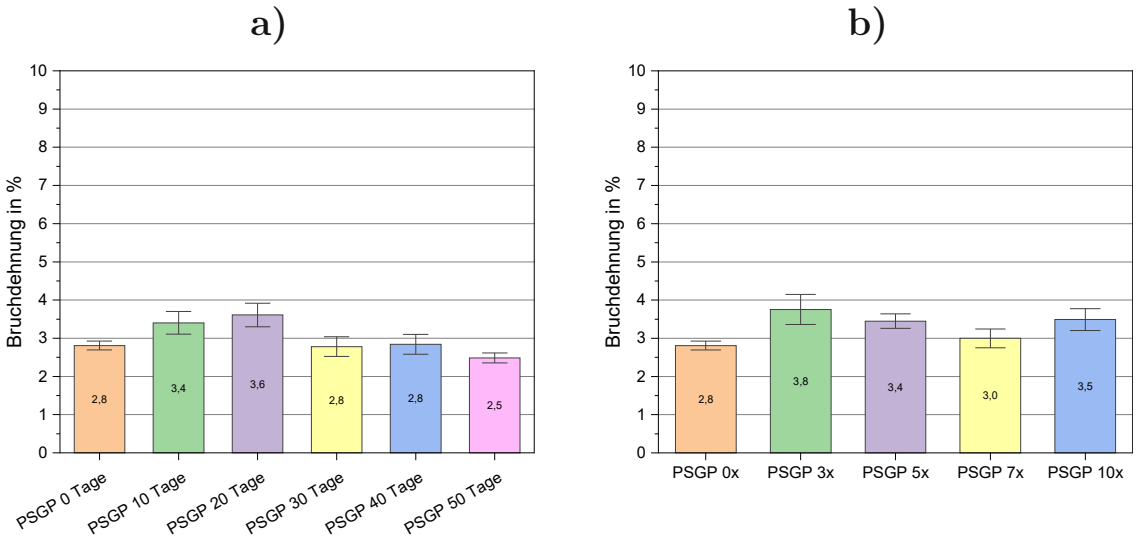

Abb. 3.10: Bruchdehnung der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Abbildung 3.11 zeigt die Ergebnisse der Elastizitätsmodule der HIPS-Proben. Hier kann bei beiden Versuchen davon ausgegangen werden, dass kein offensichtlich erkennbarer Abbau des Elastizitätsmoduls stattfindet. Die Messwerte bleiben näherungsweise konstant und schwanken um einen gemeinsamen Mittelwert. In Diagramm a) ist die Standardabweichung von einem gemeinsamen Mittelwert 6 % und bei den Messungen mit Alterungsmethode Mehrfachextrusion gerade mal 3 %.

In der Literatur [33] wird für HIPS ein E-Modul von 1560 MPa angegebenen. Der gemessene Wert in dieser Arbeit liegt 25 % darüber.

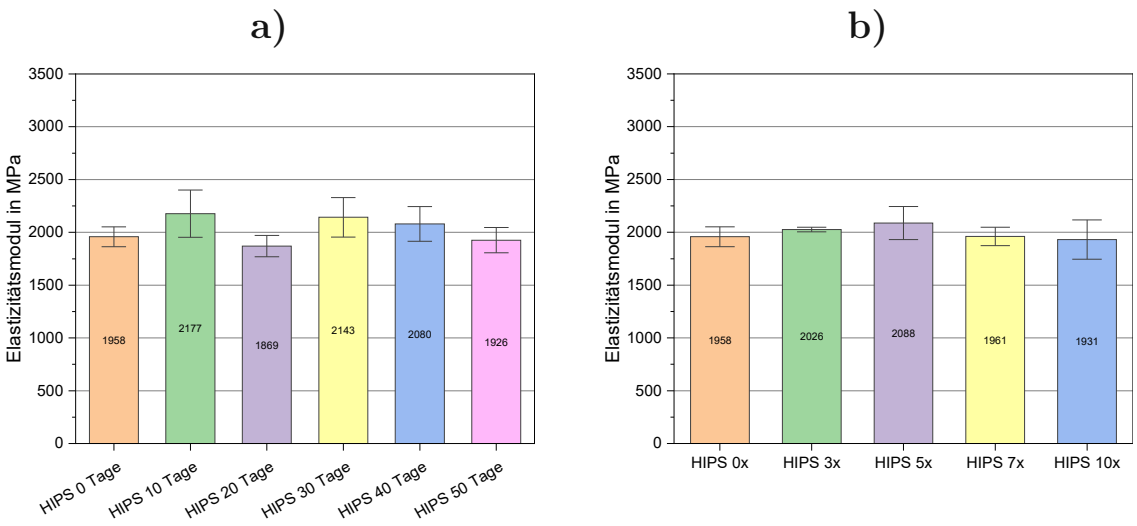

Abb. 3.11: Elastizitätsmodule der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 3.12 veranschaulicht die Bruchdehnung der gealterten HIPS-Proben, welche mittels Zugverusch ermittelt wurden. Hier lässt sich bei beiden Alterungsmethoden ein Trend zu gering erhöhter Bruchdehnung feststellen. Bei den am meisten gealterten Proben liegt die Bruchdehnung jeweils ca. 30 % über dem Wert der ungealterten Referenzprobe.

In einem Paper [37] in dem dieselben Versuche mit ähnlichen Parametern durchgeführt wurden, wurde eine Reduktion der Bruchdehnung bei HIPS festgestellt. Die Ofenalterung bei 90 °C führte nach vier Tagen zu einer Reduktion der Bruchdehnung um 85 %. Bei den neunfach verarbeiteten Proben kam es zu einer Verringerung der Bruchdehnung um 15 %. Im Paper wird HIPS eines anderen Herstellers verwendet und die Ofenalterung findet bei einer um 10 °C höheren Temperatur statt. Dies sollte den Unterschied der Ergebnisse bei der Bruchdehnung erklären. Die Ergebnisse der Messungen des E-Moduls stimmen sehr gut überein.

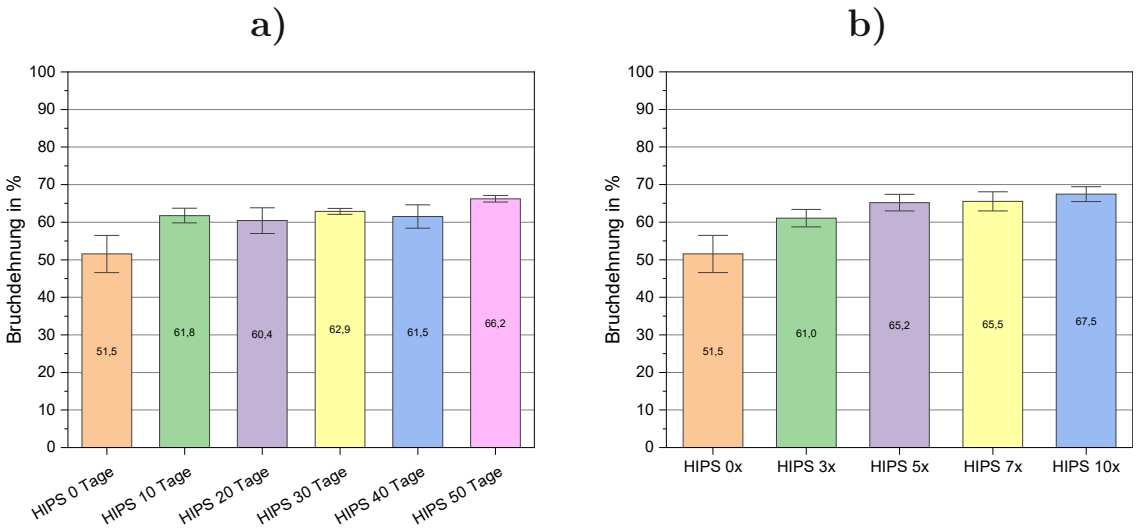

Abb. 3.12: Bruchdehnung der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Abbildung 3.13 spiegelt die Messungen der Elastizitätsmodule der gealterten PP2-Proben wieder. Der E-Modul des im Ofen gealterten Granulats reduziert sich nach zehn Tagen bereits auf 75 % des ungealterten Materials. Der Abbau der mechanischen Eigenschaften scheint nach zehn Tagen Alterung über den verbleibenden Beobachtungszeitraum von 40 Tagen zu stagnieren. Die Messwerte von Tag 10 bis Tag 50 liegen mit ca. 7 % Standardabweichung um einen gemeinsamen Mittelwert verteilt. Bei den Versuchen der Mehrfachextrusion scheint es nach drei Bearbeitungszyklen zu einer Reduktion des E-Moduls zu kommen. Die Messung bei sieben Extrusionszyklen ist vermutlich ein Ausreißer. Bei der Werkzeugtemperatur in dieser Arbeit ist es leider kaum möglich die Zugproben ohne

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Krümmung aus der Gussform zu bekommen. Die Probenkrümmung könnte zu einer Störung des Extensometers während des Zugversuchs führen. Nach zehn Alterungszyklen verringert sich der E-Modul auf 70 % im Vergleich zum ungealterten Material. Aus den durchgeführten Versuchen ist ersichtlich, dass sich die mechanischen Eigenschaften von PP2 durch die eingesetzten Alterungsmethoden ändern.

Verglichen mit der Literatur [27] scheint der E-Modul des ungealterten PP2 viel zu hoch für ungefülltes PP. Laut angegebener Quelle sollte dieser zwischen 650 und 1500 MPa liegen. Das PP2 wurde in dieser Arbeit allerdings auch bei einer zu hohen Werkzeugtemperatur spritzgegossen.

In [38] wurde PP mehrfach extrudiert. Der E-Modul des ungealterten PP liegt bei 1200 MPa. Dies beträgt gerade mal die Hälfte des in dieser Arbeit gemessenen E-Moduls. Im Paper wird das PP fünfmal extrudiert und wieder gemahlen. Nach fünf Zyklen ist der E-Modul im Paper auf ca. 82 % des ungealterten Ausgangsmaterials gesunken. In dieser Arbeit ist nach derselben Anzahl an Alterungszyklen eine Reduktion auf 79 % zu beobachten. Dies stimmt sehr gut überein. Der Trend ist allerdings ein deutlich anderer. Im Paper nimmt der E-Modul nach einem Zyklus bereits um ca. 20 % ab und verbleibt auf diesem Niveau.

In [33] wird eine Spanne für den Elastizitätsmodul von PP von 1200 bis 2000 MPa angegeben. Das PP2 in dieser Arbeit besitzt im ungealterten Zustand einen um 35 % höheren E-Modul. Dies liegt vermutlich an der für PP ungewöhnlich hohen Werkzeugtemperatur bei der die Zugproben spritzgegossen wurden.

In [39] wurde PP1 mehrfach extrudiert. Bei PP1 handelt es sich um PP HA104E vom Hersteller Borealis. Die Trends von E-Modul und Bruchdehnung stimmen sehr gut überein. Allerdings ist anzumerken, dass in der zitierten Arbeit die Zugproben mit einer Werkzeugtemperatur von 50 °C erzeugt wurden. Daher ist der Effekt, der für den beobachtbaren Trend der PP Mehrfachextrusion verantwortlich ist, offensichtlich nicht von der Werkzeugtemperatur und der Kristallisation abhängig.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

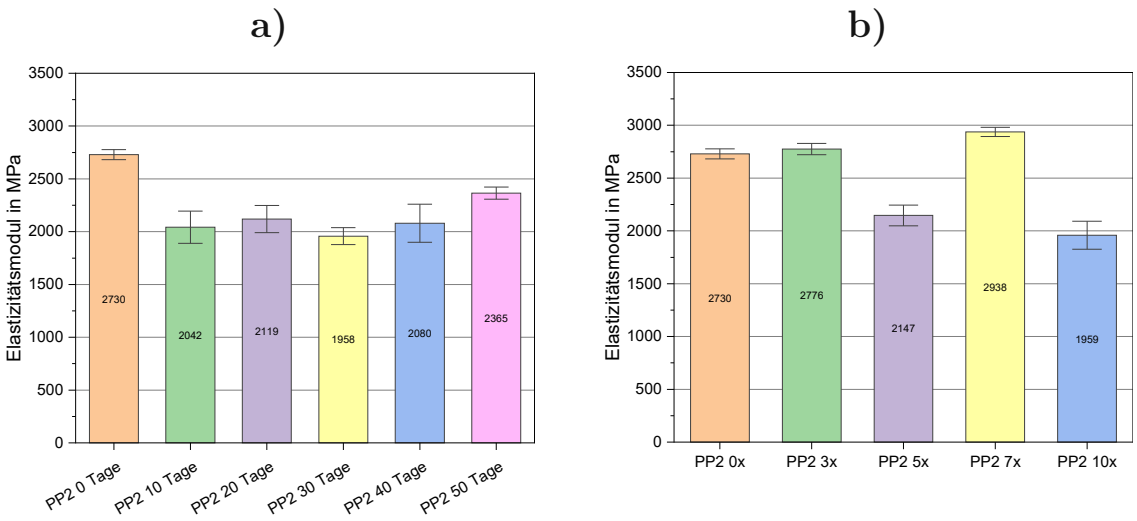

Abb. 3.13: Elastizitätsmodule der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Abbildung 3.14 dokumentiert die Ergebnisse der gemessenen Bruchdehnungen. Bei der Ofenauslagerung ist zu beobachten, dass nach 10 Tagen Alterung offensichtlich eine deutliche Erhöhung der Bruchdehnung einsetzt. Nach weiterer Alterung beginnt sich diese wieder zu reduzieren, bis sie nach 40 Tagen Alterung wieder ansteigt und nach 50 Tagen Alterung wieder auf etwa das Niveau vor den 40 Tagen Alterung zurückgeht. Bei den Messungen der Mehrfachextrusionsversuchen zeigt sich, dass die Bruchdehnung mit zunehmender Zyklenzahl anwächst. Das Diagramm lässt einen quadratischen Anstieg der Bruchdehnung mit der Zyklenzahl vermuten.

Die optimale Werkzeugtemperatur für das Spritzgießen von PP liegt zwischen 20 und 50 °C [8]. Die PP2-Prüfkörper dieser Arbeit wurden mit einer Werkzeugtemperatur von 105 °C hergestellt. Die unterschiedlichen Kühlraten haben die Ausbildung unterschiedlicher Kristallstrukturen zur Folge. Dies bietet eine Erklärung für die geringe Bruchdehnung des reinen PP2 in Abbildung 3.14 an.

Die Bruchdehnung der in [38] gemessenen Proben zeigt eine deutlich andere Entwicklung durch die Mehrfachextrusion: nach einem Extrusionszyklus beträgt die Bruchdehnung 125 %, nach jedem Zyklus nimmt die Bruchdehnung kontinuierlich ab, bis nachdem fünften Zyklus eine Bruchdehnung von 67 % übrig bleibt.

Die Bruchdehnung der ungealterten PP2 Proben stimmen sehr gut mit der Literatur [27] überein. Durch die Alterungsmaßnahmen ergeben sich Bruchdehnungen die deutlich über dem zu erwartendem Bereich liegen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

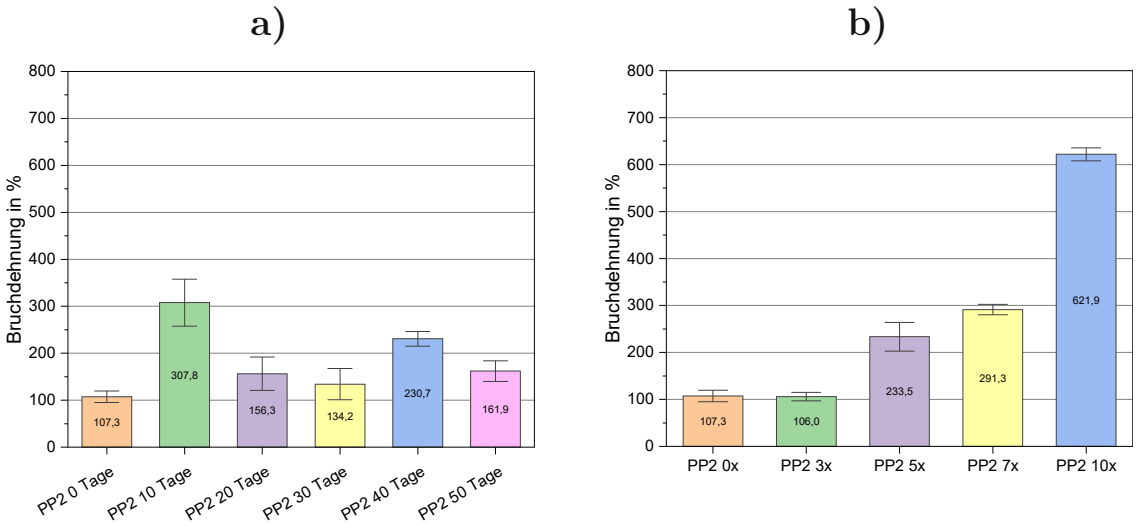

Abb. 3.14: Bruchdehnung der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Die elastischen Eigenschaften von PSGP wurden durch die eingesetzten Alterungsmethoden kaum verändert. Die einzig signifikante Veränderung stellt die Probe des zehnten Extrusionsvorganges dar: hier kam es zu einer deutlichen Reduktion des E-Moduls auf ein Drittel des ursprünglichen Wertes. Bei den HIPS-Proben kam es zu keiner signifikanten Änderung des E-Moduls. Durch die Alterung wurde eine Erhöhung der Bruchdehnung erzielt. Die Alterung führt bei den PP2-Proben zu einer Reduktion des E-Moduls und einer Erhöhung der Bruchdehnung.

3.1.5 Schlagzugversuch

Abbildung 3.15 dokumentiert die Ergebnisse des Schlagzugversuches der PSGP-Proben. Die Schlagzugzähigkeit der thermisch-oxidativ gealterten Proben nimmt in den ersten zehn Tagen um etwa 20 % ab. In den folgenden 40 Tagen scheint sich der Abbau langsamer fortzusetzen. Bei der Messung der 30 Tage gealterten Proben scheint es zu einem Ausreißer zu kommen. Die Messwerte liegen mit einer Standardabweichung von ca 20 % um einen gemeinsamen Mittelwert verteilt. Daher ist davon auszugehen, dass hier tatsächlich ein Abbau der Zähigkeit auftritt. Bei der Mehrfachextrusion ist ein Abbau der Schlagzugzähigkeit von ca. 15 % nach drei Verarbeitungszyklen erkennbar. Die Schlagzugzähigkeit pendelt sich in etwa auf diesem Niveau ein und bleibt bis zum zehnten Alterungszyklus näherungsweise konstant. Die Standardabweichung aller Messwerte zu einem gemeinsamen Mittelwert beträgt in etwa 6 %.

Gemäß Literatur [27] ist bei ungealtertem PSGP mit einer Schlagzugzähigkeit von 8 bis 18 kJ/m^2 zu rechnen. In dieser Arbeit wurde für die ungealterten Proben ein Wert von 25.51 kJ/m^2 ermittelt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

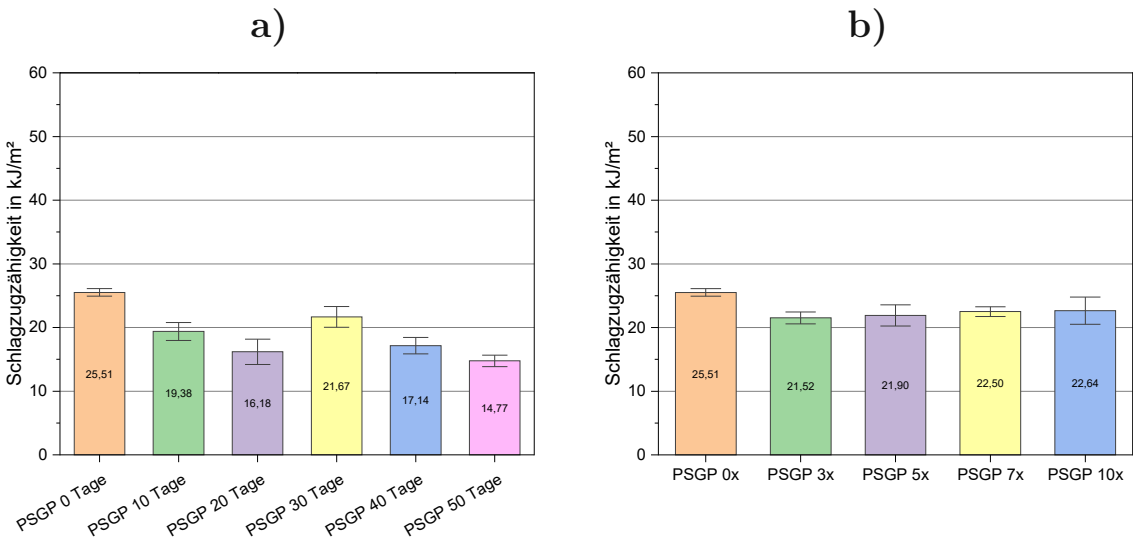

Abb. 3.15: Ergebnisse der Schlagzugzähigkeit der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Abbildung 3.16 visualisiert die Ergebnisse der Schlagzugzähigkeit der HIPS-Proben. Bei den Ergebnissen der Ofenalterung scheint es im Bereich von zehn bis zwanzig Tagen Alterung eine Zunahme der Schlagzugzähigkeit zu geben. Nach diesem Zeitraum stellt sich eine geringfügige Abnahme der Schlagzugzähigkeit ein, die in etwa auf dem anfänglichen Niveau der ungealterten Proben liegt. Die Standardabweichung aller Messwerte um einen gemeinsamen Mittelwert beträgt ca. 6 %. Dies spricht dafür, dass die Schlagzugzähigkeit in etwa konstant bleibt. Die Messungen der Mehrfachextrusion in Bild b) zeigen eine geringfügige Zunahme der Schlagzugzähigkeit mit ansteigender Zahl der Verarbeitungszyklen. Allerdings sind die Messwerte mit einer Standardabweichung von 4 % um einen gemeinsamen Mittelwert verteilt. Daher sollte davon ausgegangen werden, dass die Mehrfachextrusion die Zähigkeitseigenschaften von HIPS nicht signifikant verändert.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

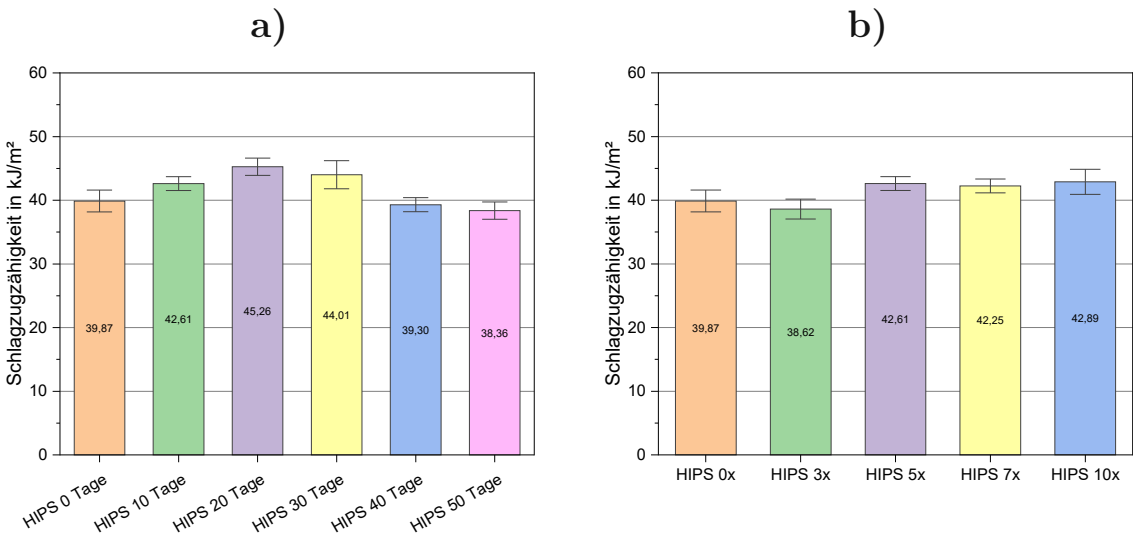

Abb. 3.16: Ergebnisse der Schlagzugzähigkeit der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Abbildung 3.17 dokumentiert die Ergebnisse der Alterungsversuche in Bezug auf die Schlagzugzähigkeit für die PP2-Proben. Unter Bedacht auf die Unsicherheiten bei der Materialprüfung von Kunststoffen ist für die Ergebnisse der Balken bei der Ofenalterung kein wirklicher Abbau der Schlagzugzähigkeit zu erkennen. Alle Messwerte liegen um einen gemeinsamen Mittelwert bei ca. 33 kJ/m^2 mit einer prozentuellen Standardabweichung von 9 % verteilt. Daher ist anzunehmen, dass bei 80 °C kein signifikanter Abbau der Zähigkeit bei PP2 auftritt. Die Ergebnisse der Mehrfachextrusion zeigen einen deutlichen Abbau der Schlagzugzähigkeit. Die Messwerte sind bis zum fünften Verarbeitungszyklus in etwa konstant. Bei den weiteren Verarbeitungen ist eine Abnahme der Schlagzugzähigkeit zu erkennen. Die Mittelwerte der Schlagzugzähigkeit des Reinmaterials und den zehnfach verarbeiteten Proben liegen 46 % auseinander. Hier muss davon ausgegangen werden, dass nach mehrfacher Verarbeitung ein signifikanter Abbau der Zähigkeit stattfindet.

Die ermittelten Werte für ungealtertes PP2 passen sehr gut mit den Angaben in der Literatur [27] überein.

Die Ergebnisse der Schlagzugzähigkeit mehrfach extrudierter PP-Proben von [38] stimmen mit den Beobachtungen dieser Arbeit sehr gut überein.

Die mechanischen Eigenschaften von PP weichen teilweise von der Literatur ab, weil die Werkzeugtemperatur beim Spritzgießen an das PS angepasst wurde: Das PP wurde mit einer Werkzeugtemperatur von 105 °C spritzgegossen. In der Literatur [8] wird eine Werkzeugtemperatur von 20 bis 50 °C angeführt. Die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffprüfkörpern hängen sehr stark von den Verarbeitungsbedingungen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

ab [16]. Möglicherweise lassen sich die mechanischen Eigenschaften von PP und deren Trend mit der Alterung durch die ungünstigen Spritzgussbedingungen erklären. Hierfür sprechen die Ergebnisse der Arbeit [40]. In der zitierten Arbeit wurde PP2 mit einer Werkzeugtemperatur von 80 °C, einer Zylindertemperatur von 230 °C und einem Druck von 500 bar spritzgegossen. Die Messergebnisse für E-Modul und Schlagzugzähigkeit stimmen in etwa überein. Die Bruchdehnung liegt allerdings deutlich höher als in dieser Arbeit.

Der beobachtete Trend der Schlagzugzähigkeit von PP2 stimmt sehr gut mit [39] überein.

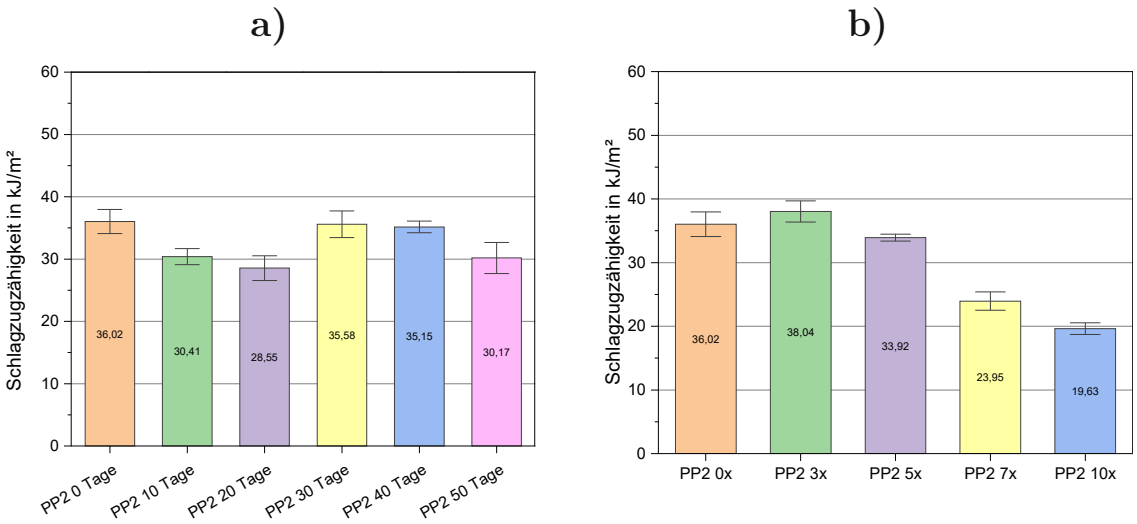

Abb. 3.17: Ergebnisse der Schlagzugzähigkeit der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Zusammenfassend ist zu sagen, dass PSGP eher durch die Ofenalterung als durch die Mehrfachextrusion in Bezug auf die Zähigkeit gealtert wird. Bei den HIPS-Proben konnte mit den Alterungsversuchen keine signifikante Veränderung der Zähigkeit erzielt werden. Die PP2-Proben konnten dem thermisch-oxidativen Abbau im Ofen widerstehen, allerdings wurde mit der Mehrfachextrusion eine deutliche Verschlechterung der Zähigkeit herbeigeführt.

3.1.6 FTIR

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der FTIR-Messungen vorgestellt und interpretiert. In den Diagrammen wird die dimensionslose Absorptionseinheit über die Wellenzahl in cm^{-1} aufgetragen. Das aufgetragene Spektrum wird in zwei Bereiche geteilt. Der Bereich von 1500 bis 500 cm^{-1} wird Fingerprint-Bereich genannt. Der verbleibende Bereich von 4000 bis 1500 cm^{-1} wird Funktionsgruppenbereich genannt und ist für

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

die Interpretation der chemischen Veränderung durch die Alterung von überwiegendem Interesse [41].

Bei den folgenden Messungen kam es leider des öfteren zu Verzerrungen des Spektrums durch CO_2. Befindet sich CO_2 zwischen Sensor und Messobjekt, kommt es zum Rauschen im Bereich von 2400 – 2260 cm^{-1} [42].

Abbildung 3.18 zeigt die Ergebnisse der FTIR-Messung der gealterten PSGP Proben. Der Absorptionsindex im Bereich von 3550 - 3200 cm^{-1} steigt mit zunehmender Alterung. Dieser Bereich korreliert mit den Schwingungen von O-H Bindungen. Dies bedeutet also eine Zunahme der Oxidation von Wasserstoff mit fortschreitender Alterung. Der Bereich 935 bis 2915 cm^{-1} stellt die Schwingungen der CH und CH_2 Verbindungen dar. Die Entwicklung der Absorptionszahl mit zunehmender Alterung lässt schließen, dass die Anzahl dieser Verbindungen mit fortschreitender Alterung schwindet. Die OH Bindungen im Bereich von 1800 bis 1000 cm^{-1} nehmen mit zunehmender Alterung zu.

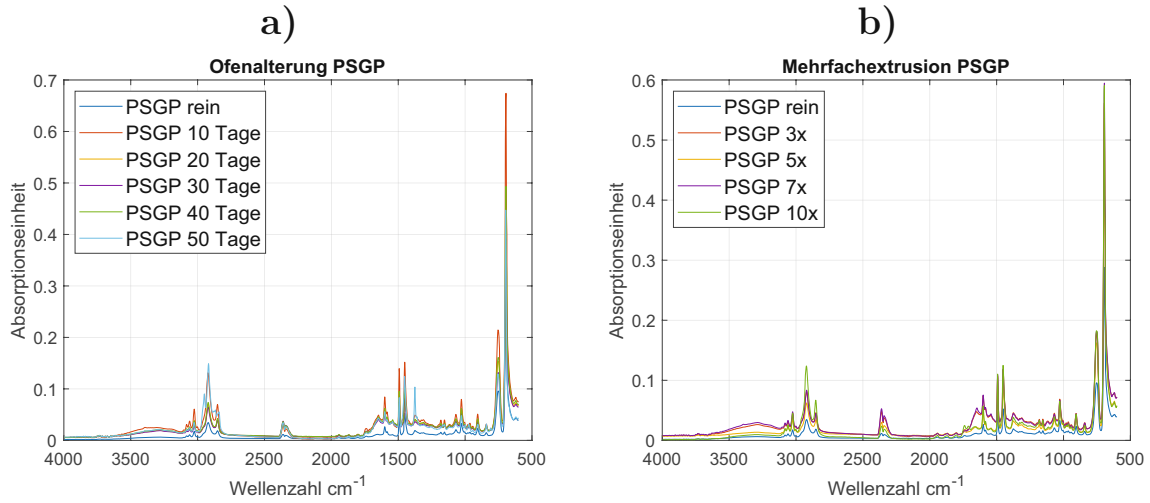

Abb. 3.18: FTIR-Spektrum der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Abbildung 3.19 zeigt die Ergebnisse der Absorptionsspektren der gealterten HIPS-Proben. Bei beiden Alterungsversuchen zeigt sich eine Abnahme der CH und CH_2 Verbindungen im Wellenzahlbereich von 2935 bis 2880 cm^{-1}. Des Weiteren ist eine mit der Alterung zunehmende Anzahl der O-H bzw. C=O Bindungen in den Bereichen 3500 - 3000 cm^{-1} bzw. 1800 - 1000 cm^{-1} zu beobachten. Die Ergebnisse dieser Arbeit stimmen sehr gut mit [43] überein.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

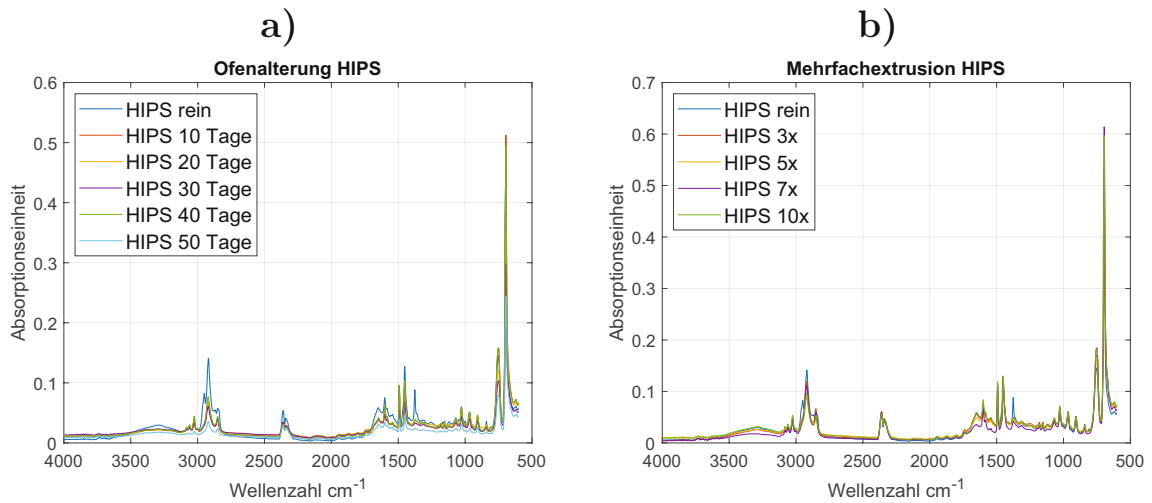

Abb. 3.19: FTIR-Spektrum der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Abbildung 3.20 stellt die Infrarotspektren der gealterten PP2-Proben dar. Im Bandbereich von 3500 - 3200 cm^{-1} zeigt sich eine Zunahme mit fortschreitender Alterung. Dies ist der Schwingungsbereich der O-H Bindungen. Mit der Alterung scheint es zunehmend O-H Verbindungen im Werkstoff zu geben. Im Bereich 2935 bis 2915 cm^{-1} sind die CH_2 Methylene Schwingungen zu sehen. Von 2900 bis 2889 cm^{-1} zeigt die Schwingungen der CH Methyne [41]. Hier scheint es zu einer Reduktion der Anzahl der C-H Verbindungen bei der Ofenalterung zu kommen. Diese werden vermutlich durch O-H und O-C Verbindungen ersetzt. Bei der Mehrfachextrusion scheint es zu einer Zunahme der besagten Verbindungen zu kommen. Im Wellenzahlbereich von 1800 bis 1000 cm^{-1} ist die Absorptionszahl der C=O Bindungen dargestellt. Aus dem Diagrammen ist ersichtlich, dass es hier zu einer Zunahme mit der Alterung des Materials kommt.

Das Paper [44] kommt zu einem ähnlichen Ergebnis für die Ofenalterung von PP im Bereich von 1800 bis 1600 cm^{-1}. Im Paper wird angegeben, dass eine Zunahme der Absorption bei 1716 cm^{-1} auf β-Scherung hindeutet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

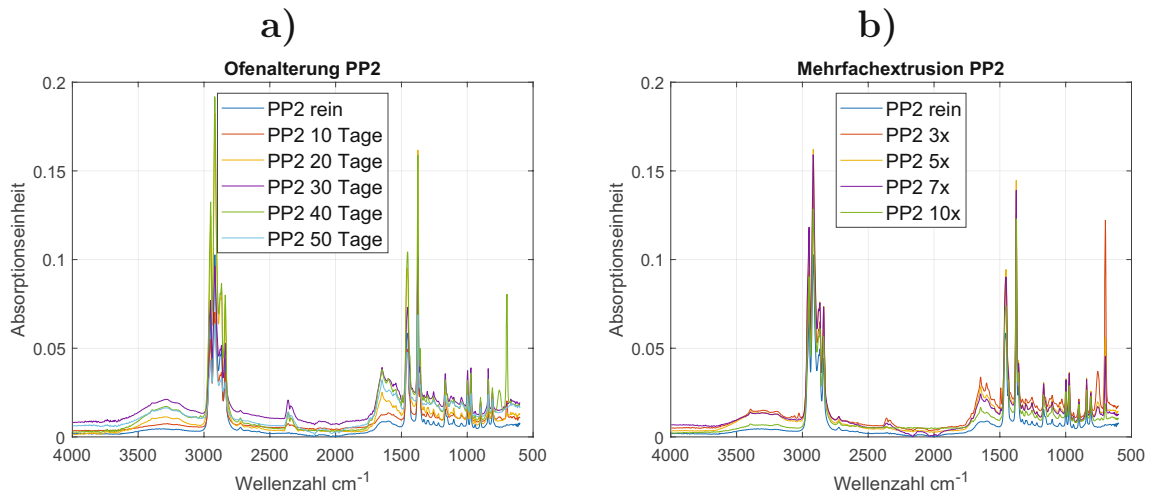

Abb. 3.20: FTIR-Spektrum der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

3.1.7 Schmelzflussrate MFR

Abbildung 3.21 dokumentiert die Ergebnisse der Messungen der Schmelzflussraten. Die MFR-Werte der im Ofen gealterten Proben liegen mit einer Standardabweichung von weniger als 3 % um einen gemeinsamen Mittelwert. Daher ist anzunehmen, dass die thermisch-oxidative Alterung im Ofen bei 80 °C keinen signifikanten Einfluss auf die Viskosität des PSGP Granulates hat. Bei den Messungen des mehrfach verarbeiteten Granulates zeigt sich ein deutlicher Trend in Richtung steigender MFR-Werte mit steigender Anzahl an Verarbeitungszyklen. Mit zunehmender Anzahl der Verarbeitungsschritte verringert sich die Viskosität der PSGP-Proben.

Der Autor von [45] kam in seiner Arbeit zu dem Schluss, dass Polystyrol unter 230 °C kaum altert. Diese Erkenntnis stimmt sehr gut mit den Beobachtungen der im Ofen gealterten Proben dieser Arbeit überein. In [36] wurde nachgewiesen, dass PS durch ausreichend große Schubspannung bereits weit unter 230 °C altern kann. Dies korreliert sehr gut mit den Ergebnissen der Mehrfachextrusion.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

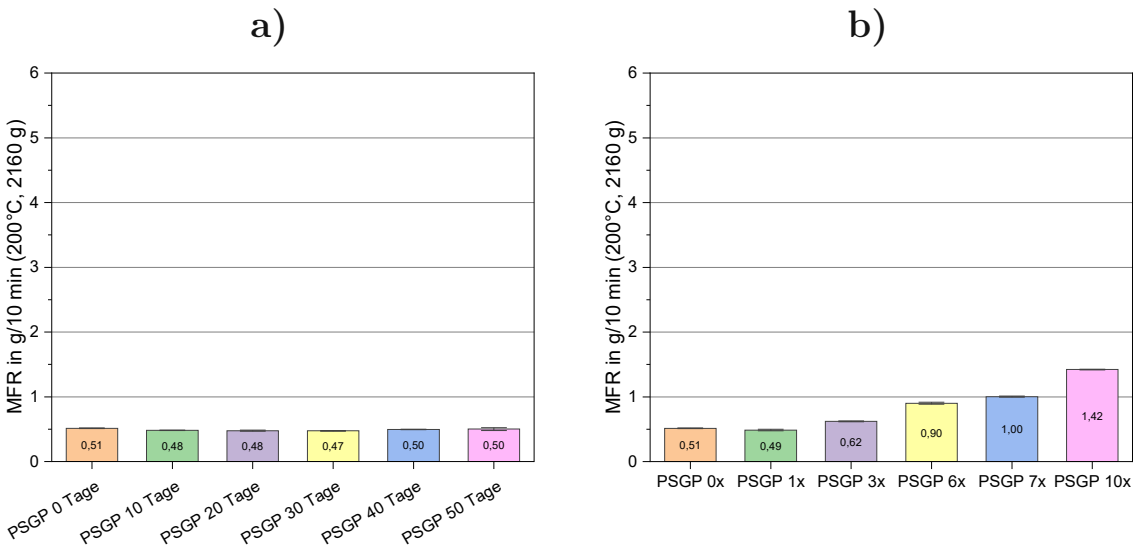

Abb. 3.21: MFR der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Abbildung 3.22 zeigt die Ergebnisse der gealterten HIPS-Proben. Alle MFR Werte der im Ofen gealterten Proben liegen mit 2,2 % Standardabweichung um einen gemeinsamen Mittelwert verteilt. Daher ist davon auszugehen, dass die Alterung im Ofen keine signifikante Änderung auf den MFR-Wert hat. Bei den Ergebnissen der Mehrfachextrusion hingegen ist ein Trend zu einem steigenden MFR-Wert mit zunehmender Zahl an Verarbeitungszyklen erkennbar. Der MFR des zehnmal verarbeiteten Granulates ist um ca 41 % größer als der MFR des Ausgangsmaterials.

Der Autor von [37] erhält für seine neunfach extrudierten Proben eine Zunahme des MFR von 45 % relativ zum Ausgangsmaterial. Dies stimmt mit den Ergebnissen dieser Arbeit sehr gut übereinstimmt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

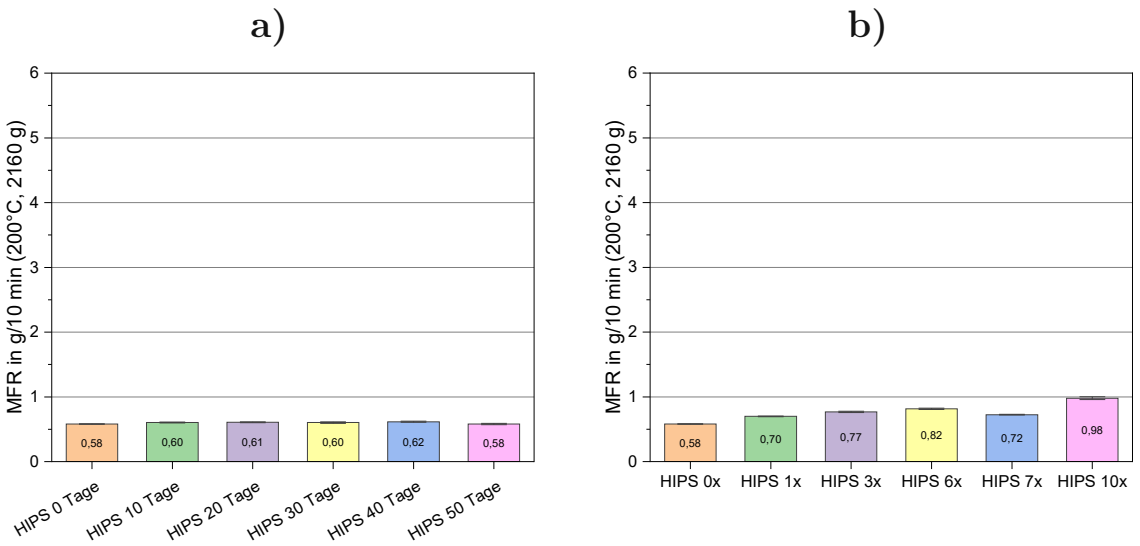

Abb. 3.22: MFR der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Abbildung 3.23 stellt die Ergebnisse der MFR-Messwerte des gealterten PP2 Granulats dar. Die MFR-Werte des im Ofen gealterten Granulates liegen mit 4 % um einen gemeinsamen Mittelwert verteilt. Dies legt den Schluss nahe, dass die 50 Tage bei 80 °C keinen signifikanten Einfluss auf die Viskosität von PP2 ausüben. Das durch Mehrfachextrusion verarbeitete Granulat zeigt ein deutlich anderes Verhalten. Hier ist eindeutig ein Trend zu einem steigenden MFR erkennbar. Nach zehn Extrusionszyklen hat sich der MFR fast verfünffacht. Mehrfaches Verarbeiten von PP2 bei Temperaturen von 200 °C führen zu einer signifikanten Änderung des MFR.

In [46] wurde PP ebenfalls mehrfach extrudiert. Das Ausgangsmaterial besitzt einen MFR von ca. 4 g/10 min, die Messtemperatur im Paper liegt bei 230 °C und die Extrusion wurde unter Sauerstoffabschluss durchgeführt. Im Paper wird festgestellt, dass die Mehrfachextrusion von PP zu einer Erhöhung von dessen MFR führt. Dies stimmt mit den Ergebnissen dieser Arbeit überein.

Der beobachtete Trend stimmt sehr gut mit [39] überein.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

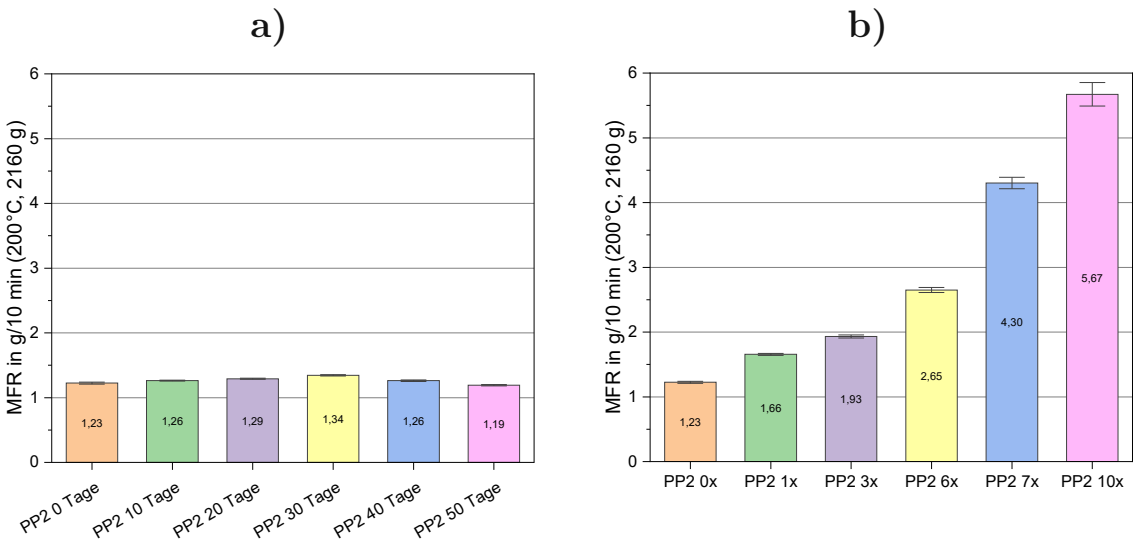

Abb. 3.23: MFR der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Alterung im Ofen bei 80 °C bei allen Werkstoffproben keine signifikante Änderung des MFR bewirkt. Durch die Mehrfachextrusion konnte bei allen Proben eine deutliche Veränderung des MFR erzielt werden. Hier sind die Ergebnisse mit denen aus Tabelle 3.5 in etwa vergleichbar. Der MFR von PP2 ändert sich am deutlichsten. Bei den PSGP-Proben kommt es ebenfalls zu einem deutlichen Anstieg des MFR und das HIPS erweist sich als am widerstandsfähigsten gegen die Alterungsmaßnahmen. Die Ergebnisse von MFR und komplexer Viskosität wurden bereits im Unterabschnitt 3.1.2 verglichen.

3.1.8 Thermogravimetrische Analyse 'TGA'

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchung vorgestellt. Um die gemessenen Kurven der einzelnen Versuche zu vergleichen, wird analysiert bei welcher Temperatur die Masse der Probe auf 97 % des Ausgangsmaterials abgebaut wurde. Die erhaltenen Temperaturen werden als Anhaltspunkt verwendet ob sich das Abbauverhalten der Proben durch Alterungsprozesse verändert. In den folgenden Diagrammen wird die prozentuelle Masse bzw. das Gewicht der Probe über die Temperatur aufgetragen. Im linken unteren Rand jedes Diagramms wird die Temperatur angegeben, bei welcher sich die Masse auf 97 % der Ausgangsmasse reduziert hat. Die Reihenfolge der Werte ist ident mit der Reihenfolge der Einträge in der Legende. Links befindet sich, wie bisher üblich, die Messung der Ofenalterung und rechts die Ergebnisse der Mehrfachextrusion. Die 50 Tage gealterten Proben werden bei der Ofenalterung nicht berücksichtigt, da die Messmaschine zerstört wurde bevor die Proben aus dem

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Ofen genommen wurden und die Ergebnisse einer anderen Maschine nicht vergleichbar sind.

Abbildung 3.24 zeigt die Ergebnisse der gealterten PSGP-Proben. Die gemessenen Temperaturen, der im Ofen ausgelagerten Proben, liegen mit 1 % Standardabweichung um einen gemeinsamen Mittelwert verteilt. Daher ist anzunehmen, dass die Alterung im Ofen keinen signifikanten Einfluss auf den thermischen Abbau von PSGP ausübt. Die gemessenen Temperaturen der Mehrfachextrusion lassen einen Trend in Richtung einer abnehmenden Temperatur für häufiger verarbeitete Proben vermuten. Allerdings liegen die Messwerte mit weniger als 1 % um einen gemeinsamen Mittelwert verteilt. Daher ist auch an dieser Stelle davon auszugehen, dass der thermische Abbau in der TGA nicht von der Alterung beeinflusst wird.

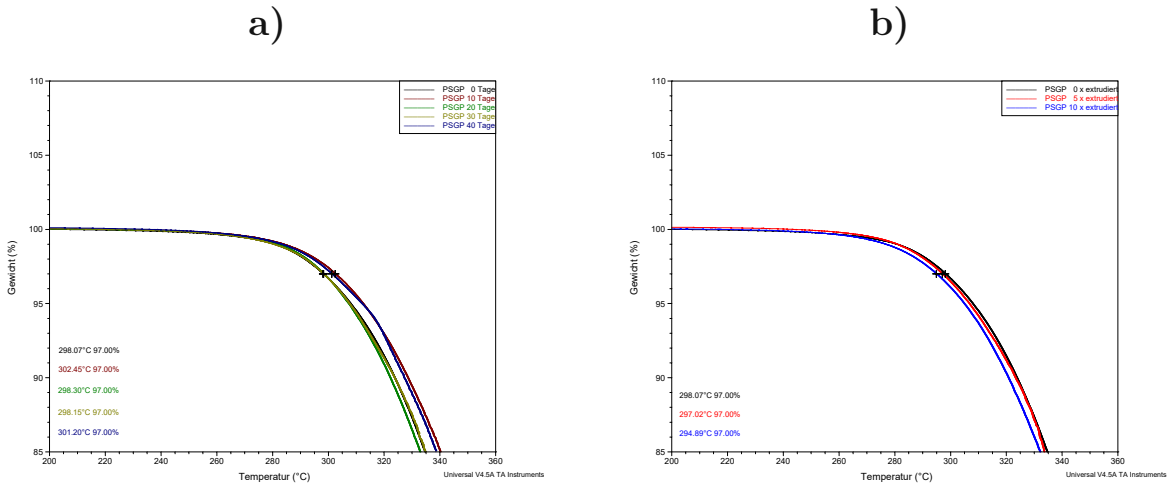

Abb. 3.24: TGA der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Abbildung 3.25 gibt die TGA-Kurven der HIPS-Proben wieder. Bei den Temperaturen der Ofenalterung in Bild a) kommt es bei den 10 Tagen gealterten Proben zu einem Anstieg der Temperatur die notwendig ist um die Masse auf 97 % der Ausgangsmasse zu reduzieren. Die länger gealterten Proben verringern ihre Temperatur fortlaufend, erreichen aber noch nicht das Niveau des Ausgangsmaterials. Mit fortlaufender Alterung scheint sich die thermische Beständigkeit wieder abzubauen. Allerdings liegen auch hier die gemessenen Temperaturen mit einer Standardabweichung von 1 % um einen gemeinsamen Mittelwert verteilt. Daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Beobachtungen rein zufälliger Natur sind. Die Ergebnisse der Mehrfachextrusion in Bild b) zeigen einen Trend. Die Kurven vom Ausgangsmaterial und fünfmal extrudiertem Material liegen praktisch übereinander. Die Messkurve der zehnfach extrudierten Probe liegt etwas nach links versetzt und besitzt eine um 5 °C verringerte Temperatur bei der die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Masse auf 97 % abgebaut ist. Die Temperaturen beider Alterungsversuche unterscheiden sich allerdings gerade mal um 1 %. Daher kann hier nicht ausgeschlossen werden, dass die Beobachtungen zufällig durch Messungenauigkeiten entstanden sind.

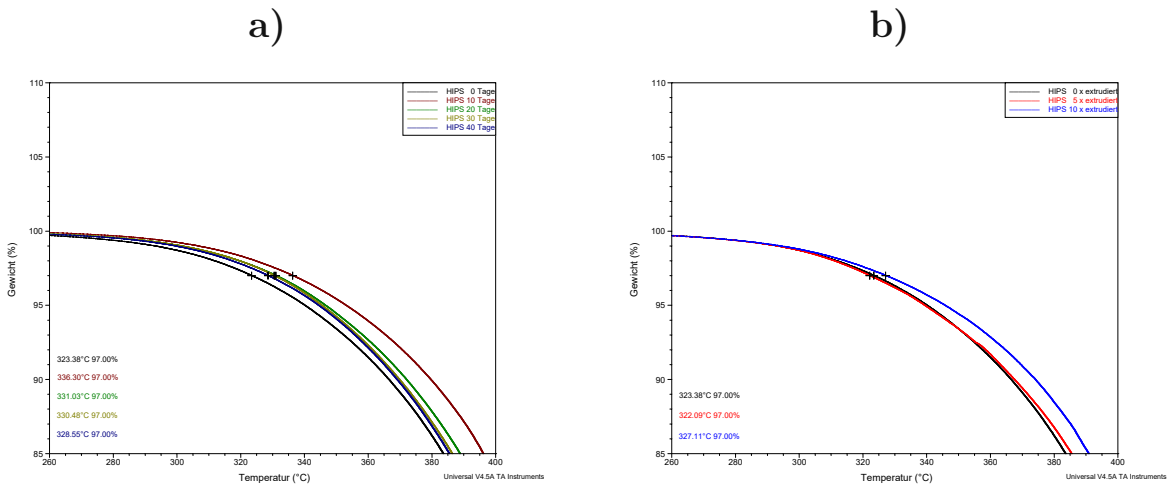

Abb. 3.25: TGA der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Abbildung 3.26 zeigt die TGA-Messkurven der PP2-Proben. Die Abbaukurven der im Ofen gealterten PP2-Proben zeigen einen Anstieg der Temperatur, welche erforderlich ist um die Masse auf 97 % der Ausgangsmasse abzubauen. Der Anstieg vollzieht sich in den ersten 30 Tagen nur geringfügig. Die Temperatur nach 40 Tagen Alterung liegt allerdings um 5 % über der Temperatur des Ausgangsmaterials. Dieses Verhalten stimmt sehr gut mit den Ergebnissen aus Unterabschnitt 3.1.3 überein. Die Messungen haben gezeigt, dass es bei 40 Tagen Alterung zu einer Verringerung der MMV kommt. Dies könnte auf die Ausschöpfung des Stabilisators während der Mehrfachverarbeitung zurückzuführen sein und durch das Stattfinden von Rekombinationsreaktionen, die das Material thermo-oxidativ beständiger erscheinen lassen. Die Ergebnisse der Mehrfachextrusion zeigen ein anderes Verhalten. Hier nehmen die Temperaturen mit zunehmender Alterung ab. Es ist ein Trend beobachtbar, der nahelegt, dass die Temperatur mit zunehmender Alterung geringer wird um 3 % des Materials abzubauen. Die Temperatur der zehnfach extrudierten Probe ist um 4 % geringer als die Temperatur des Ausgangsmaterials. Das unterschiedliche Verhalten wird vermutlich durch die unterschiedlichen Temperaturen bei den Alterungsmethoden verursacht: Ofenalterung 80 °C und Mehrfachextrusion 200 °C.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

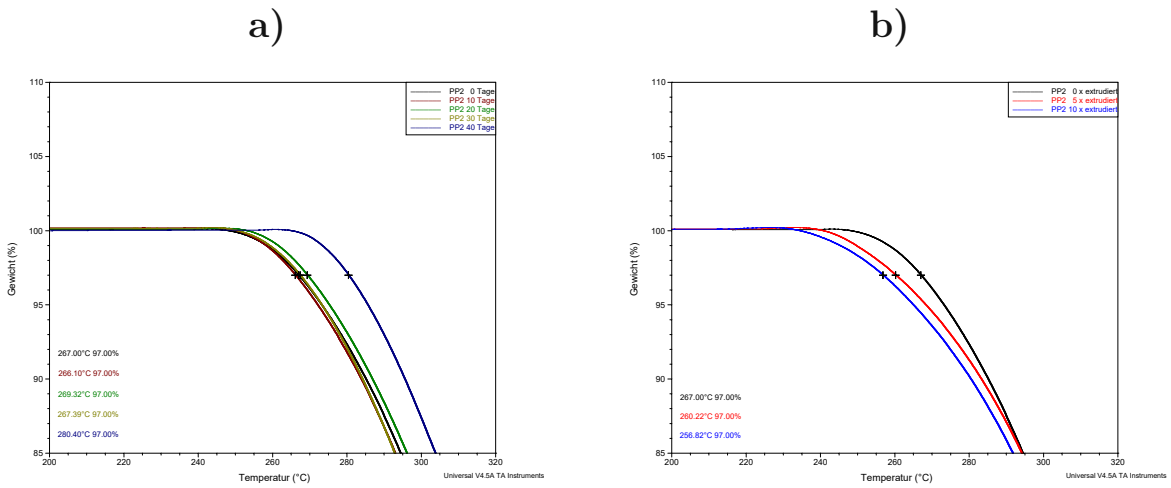

Abb. 3.26: TGA der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden

Zusammenfassend ist zu sagen, dass bei den Polystyrolproben PSGP und HIPS keine nennenswerte Änderung des thermischen Abbauverhaltens während der TGA detektiert wurde. Bei den PP2-Proben wurden zwei unterschiedliche Trends beobachtet. Die Ofenalterung führt nach 40 Tagen zu einer Erhöhung der Abbautemperatur. Durch die Mehrfachextrusion kommt es zu einer Reduktion der Abbautemperatur mit zunehmender Anzahl der Alterungszyklen.

3.2 Blendversuche

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Blendversuche vorgestellt. Eine genauere Beschreibung der Proben und Methoden befindet sich im Unterabschnitt 2.3.3.

3.2.1 Viskosität und MFR

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der Viskositätsmessungen vorgestellt. Links im Bild a) werden die Messergebnisse der scherrheologischen Untersuchungen und rechts im Bild b) werden die MFR-Werte derselben Proben dargestellt. Am Ende dieses Unterkapitels befindet sich Tabelle 3.6, in der die gemessenen MFR-Werte in komplexe Viskosität und Scherrate umgerechnet werden. Wie diese Umrechnung durchzuführen ist findet sich in Unterabschnitt 2.5.5. Eine Erklärung des Vergleichs von Messung und Umrechnung findet sich in Unterabschnitt 3.1.1.

Abbildung 3.27 zeigt die Ergebnisse des Reinmaterials und der Blends ohne Kompatibilisierungsmittel. Durch die Blendbildung kommt es zu einer Reduktion der Viskosität im Vergleich zu dem Reinmaterial. Die MFR-Werte der 95/5 Mischungen besitzen in etwa

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

den selben MFR-Wert wie reines PP2 obwohl dieses nur zu 5 % in den Blends vorhanden ist. Der MFR-Wert der 75/25 Mischungen liegt bereits über dem Viskositätswert von PP2. Daraus ist erkennbar, dass sich die Viskosität von PS bereits bei einer geringen Kontaminierung von (5 %) PP deutlich reduziert. Der Vergleich der Ergebnisse aus Bild a) mit Tabelle 3.6 stimmt für die Reinmaterialien deutlich besser als für die Blends überein. Die Dichte der Blends wurde mittels Gleichung 3.1 berechnet. In Anbetracht der Ungenauigkeiten kann dennoch gesagt werden, dass die umgerechneten MFR-Werte mit den Messungen der Viskosität übereinstimmen und die erhaltenen Ergebnisse plausibel sind.

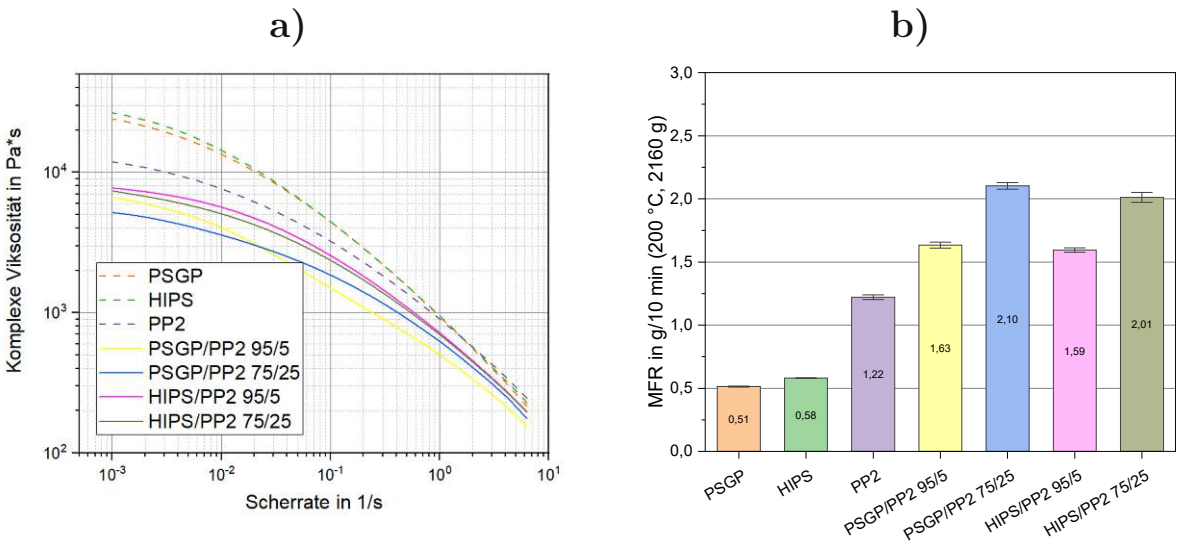

Abb. 3.27: a) Komplexe Viskosität und b) MFR der reinen Blends

Abbildung 3.28 vergleicht die Ergebnisse der Viskostitätsmessungen der Blends mit Hauptbestandteil PSGP und unterschiedlichen Kompatibilisierungsmitteln. Die Viskosität der Blends mit Mischungsverhältnis 95/5 lässt sich durch die Zugabe von SIS und LUCO erhöhen. Beim Mischungsverhältnis 75/25 wird nur noch von LUCO eine Erhöhung der Viskosität erzielt. Durch SIS kommt es zu einer Verringerung der Viskosität. Der Vergleich mit Tabelle 3.6 korreliert mit den Messungen der komplexen Viskosität. Der MFR der Blends wird durch Zugabe von SIS verringert. Durch LUCO kommt es bei der Mischung 95/5 zu einer Erhöhung des MFR und bei dem Blend mit 75/25 zu einer deutlichen Verringerung auf weniger als die Hälfte des MFR des Blends ohne Kompatibilisierungsmittel.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

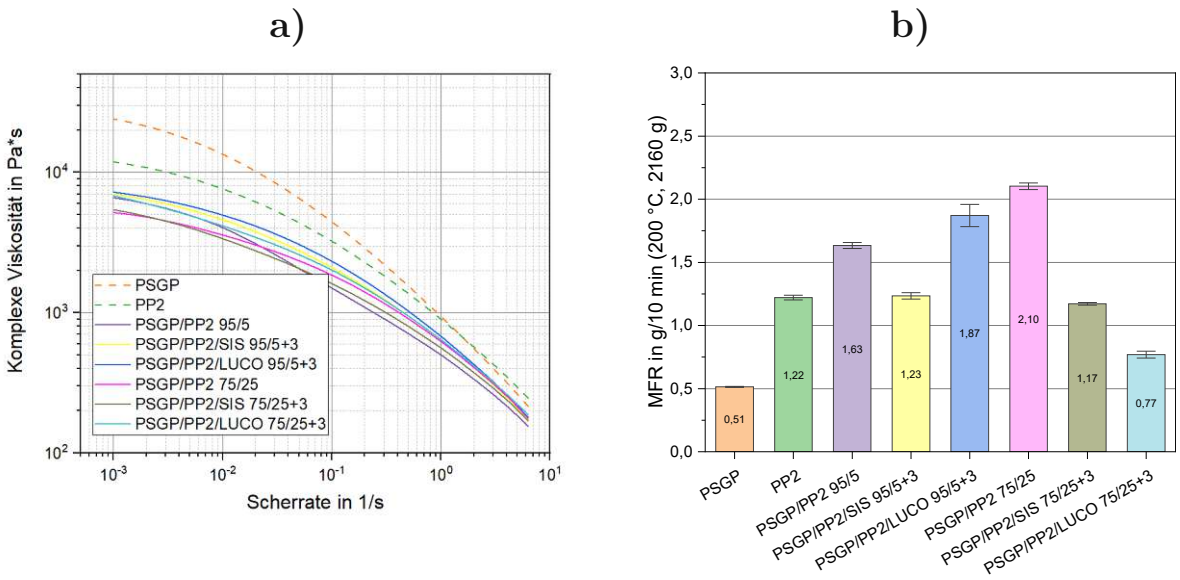

Abb. 3.28: a) Komplexe Viskosität und b) MFR der PSGP-Blends bei 200 °C

Abbildung 3.29 dokumentiert die Ergebnisse der Blends mit Hauptbestandteil HIPS. Die gemessenen Viskositäten der Proben liegen sehr nahe beieinander. Die umgerechneten Werte aus Tabelle 3.6 korrelieren in etwa mit den Ergebnissen der Scherrheologie. Der MFR-Wert der Blends mit Kompatibilisierungsmittel liegt stets unter dem der Blends ohne Additive.

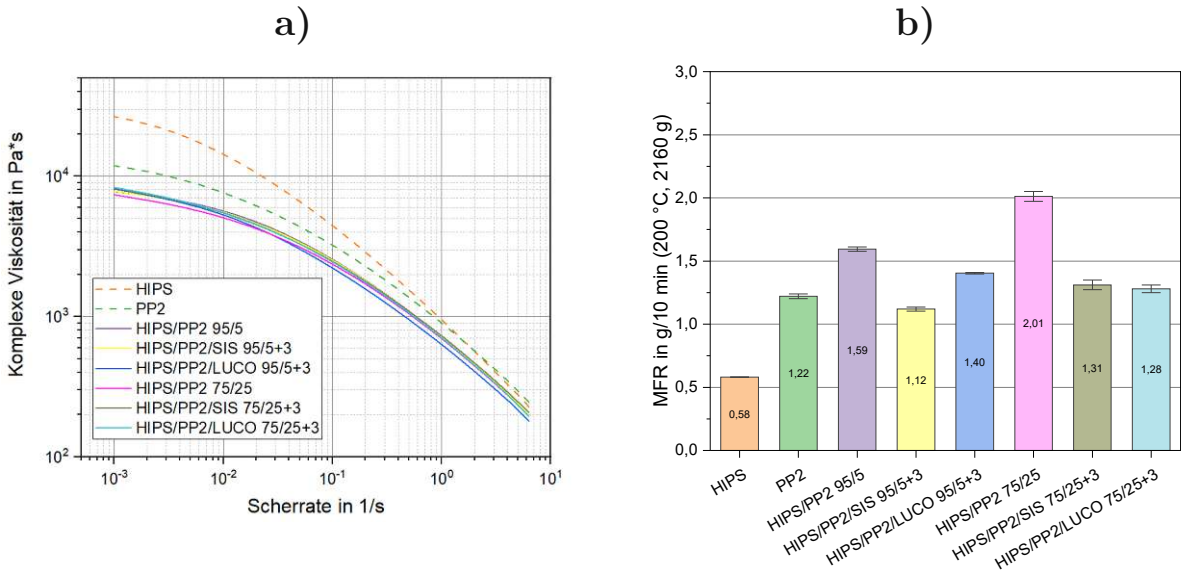

Abb. 3.29: a) Komplexe Viskosität und b) MFR der HIPS-Blends bei 200 °C

Zusammenfassend ist zu sagen, dass eine Blendbildung der untersuchten Reinmaterialien, im Vergleich zu den Ausgangsstoffen, zu einer Reduktion der Viskosität führt. Durch

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

die Zugabe der Kompatibilisierungmittel SIS und LUCO kann die Viskosität teilweise erhöht werden, die Viskosität des Ausgangsmaterials kann dadurch aber nicht erreicht werden.

Tab. 3.6: Umrechnung der MFR-Werte in komplexe Viskosität und Scherrate

		PSGP %	HIPS %	PP2 %	Dichte g/cm³	MFR g/10 min	MVR cm³/10 min	Scherrate s^{-1}	KV Pa*s		
PSGP		100	0	0	0,94	0,764	0,813	1,5	12902	PSGP	
HIPS		0	100	0	0,95	0,8315	0,875	1,6	11981	HIPS	
PP2		0	0	100	0,76	1,557	2,049	3,8	5119	PP2	
PSGP/PP2	95/5	95	0	5	0,931	1,633	1,754	3,2	5979	PSGP/PP2	95/5
PSGP/PP2	75/25	75	0	25	0,895	2,103	2,350	4,3	4463	PSGP/PP2	75/25
HIPS/PP2	95/5	0	95	5	0,9405	1,595	1,696	3,1	6183	HIPS/PP2	95/5
HIPS/PP2	75/25	0	75	25	0,9025	2,012	2,229	4,1	4704	HIPS/PP2	75/25
PSGP/PP2/SIS	95/5+3	95	0	5	0,931	1,234	1,325	2,5	7912	PSGP/PP2/SIS	95/5+3
PSGP/PP2/SIS	75/25+3	75	0	25	0,895	1,172	1,309	2,4	8008	PSGP/PP2/SIS	75/25+3
HIPS/PP2/SIS	95/5+3	0	95	5	0,9405	1,12	1,191	2,2	8806	HIPS/PP2/SIS	95/5+3
HIPS/PP2/SIS	75/25+3	0	75	25	0,9025	1,311	1,453	2,7	7219	HIPS/PP2/SIS	75/25+3
PSGP/PP2/LUCO	95/5+3	95	0	5	0,931	1,871	2,010	3,7	5218	PSGP/PP2/LUCO	95/5+3
PSGP/PP2/LUCO	75/25+3	75	0	25	0,895	0,769	0,859	1,6	12205	PSGP/PP2/LUCO	75/25+3
HIPS/PP2/LUCO	95/5+3	0	95	5	0,9405	1,403	1,492	2,8	7030	HIPS/PP2/LUCO	95/5+3
HIPS/PP2/LUCO	75/25+3	0	75	25	0,9025	1,28	1,418	2,6	7394	HIPS/PP2/LUCO	75/25+3

Die Dichte der Blends wurde mittels Gleichung 3.1 geschätzt. Die i-Werte stellen die Anteile des jeweiligen Werkstoffs in Prozent dar. Eine genauere Berechnung der Dichte von Blends findet sich in [47]. Die Dichte der Kompatibilisierungsmittel SIS und LUCO wurde vernachlässigt, da die Schätzung der Dichte ohnehin nur dazu dient die Ergebnisse von MFR und komplexer Viskosität auf Plausibilität zu prüfen.

$$\rho_{\text{Blend}} = \rho_{\text{PSGP}} \cdot \text{i}_{\text{PSGP}} + \rho_{\text{HIPS}} \cdot \text{i}_{\text{HIPS}} + \rho_{\text{PP2}} \cdot \text{i}_{\text{PP2}} \tag{3.1}$$

3.2.2 Zugversuch

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Zugversuchs der Blendproben vorgestellt. Hierfür werden links Diagramme mit den gemittelten Werten für den ermittelten Elastizitätsmodul und rechts für die Bruchdehnung dargestellt.

Abbildung 3.30 zeigt die Messungsergebnisse der Reinmaterialien und Blends ohne Kompatibilizer. Die Werte der E-Module der PSGP/PP2 Blends liegen zwischen den Werten der E-Module von PSGP und PP2. Die Blends mit 95 % PSGP besitzen unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten in etwa denselben E-Modul wie reines PSGP. Ein PP2-Anteil von 25 % Prozent reduziert den Modul des Blends auf das Niveau des reinen PP2. Der Blend HIPS/PP2 95/5 besitzt in etwa den selben E-Modul wie reines HIPS. HIPS/PP2 75/25 besitzt in etwa den gleichen wenn nicht einen gering höheren

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

E-Modul als reines PP2 und HIPS. Die Bruchdehnung der PSGP-Blends liegt unter der des reinen Materials. Die HIPS-Blends zeigen eine deutliche Verringerung ihrer Bruchdehnung. An dieser Stelle ist bereits anzumerken, dass die Blendbildung ohne Kompatibilisierungsmittel zu einer deutlichen Reduktion der Bruchdehnung führt. Dies liegt an der Unverträglichkeit von PS und PP, welche in [16] angegeben wird.

In [48] wurden PS/PP Blends im Verhältnis 80/20 hergestellt. Diese Blends erreichten eine Bruchdehnung von 1.9 %. Dies liegt zwischen den Bruchdehnungen der Blends mit PS/PP von 95/5 und 75/25 dieser Arbeit. Allerdings ist der E-Modul des reinen PS, welches im Paper verwendet wird deutlich geringer als der Modul des PSGP das in dieser Arbeit eingesetzt wird.

In [49] wurde der E-Modul in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis der PS/PP Blends aufgenommen. Die in dieser Arbeit gewonnenen Messwerte für die PSGP/PP2 Blends stimmen sehr gut mit dem Paper überein.

In [50] werden Blends aus HIPS und PP, welche bei 220 °C gefertigt wurden, untersucht. Der Autor ermittelt für die Bruchdehnung des von ihm verwendeten HIPS 41 %. Ein PP-Anteil von 5 % reduziert die Bruchdehnung auf 36 %. In dieser Arbeit erzielt der Wert des Blends mit 5 % PP2-Anteil einen viel geringeren Wert. Dies liegt möglicherweise an der niedrigeren Verarbeitungstemperatur und daran, dass im Paper anderes Material verwendet wird.

In [51] wurde die Bruchdehnung eines Blends aus HIPS/PP 80/20 mit ca. 9 % ermittelt. Das stimmt in etwa mit den Ergebnissen dieser Arbeit überein.

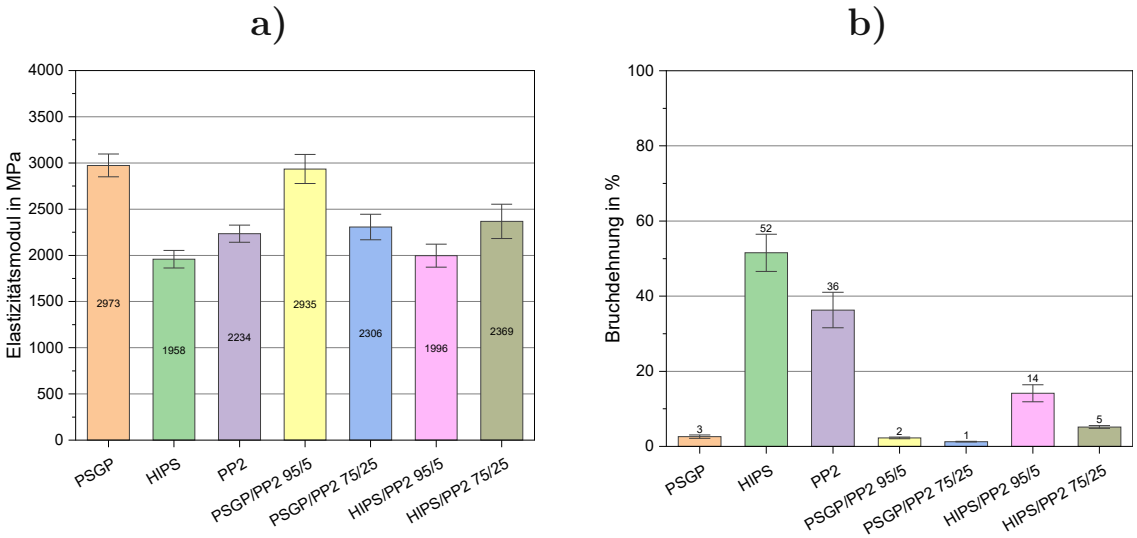

Abb. 3.30: Zugversuch der Reinmaterialien und der Blends ohne Kompatibilisierungsmittel

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 3.31 zeigt die Ergebnisse des Zugversuchs mit PSGP als mehrheitlicher Blendpartner. Der E-Modul der PSGP-Mischungen mit einem Anteil von 95 % und unterschiedlichen Kompatibilizern liegt in etwa auf dem Niveau des reinen PSGP. Bei den Mischungen mit einem PSGP-Anteil von 75 % erreichen die Kompatibilizer eine Erhöhung des Elastizitätsmoduls von ca. 10 %. Die Bruchdehnung der Blends erreicht auch mit den eingesetzten Additiven nicht mal das Niveau von reinem PSGP. Die Sprödigkeit von PSGP wird durch die Blendbildung mit den Additiven erhöht.

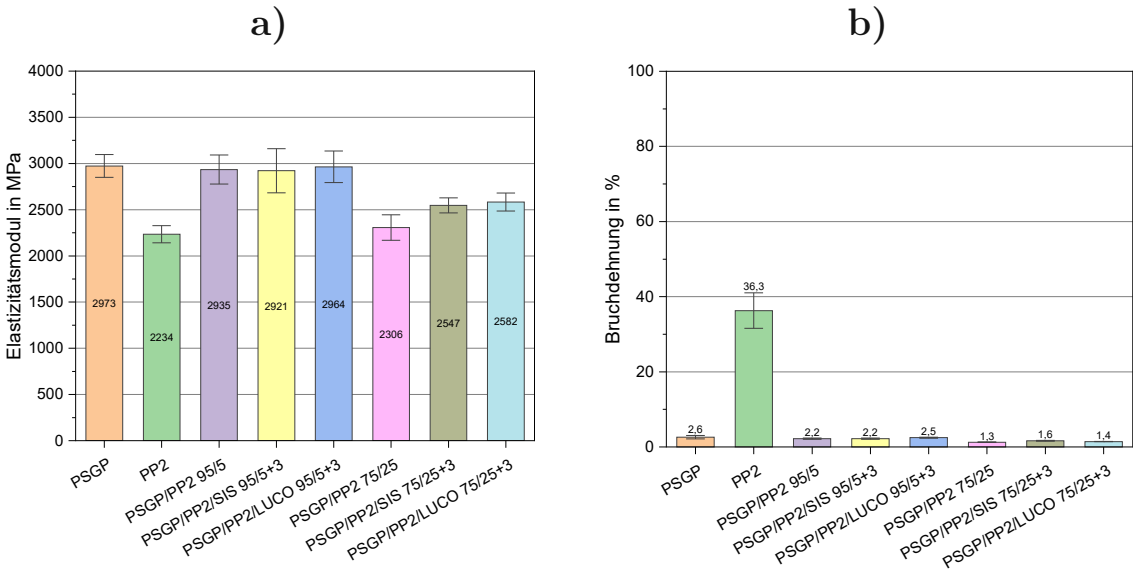

Abb. 3.31: Zugversuch der Blends mit PSGP als Hauptbestandteil und Kompatibilizer

Abbildung 3.32 dokumentiert die Ergebnisse des Zugversuchs mit HIPS als mehrheitlichen Blendpartner. Die Kompatibilizer halten den E-Modul der Blends mit 95 % HIPS-Anteil auf etwa dem Niveau des Blends ohne Additiven. Der Modul der Blends mit 75 % verringert sich durch Zugabe der Additive um fast 20 %. Die Bruchdehnung der Blends mit Additiven wird nur im geringen Maße im Vergleich zu den Blends ohne Additiven erhöht. Die Bruchdehnung von HIPS/PP2 95/5 erhöht sich durch die Zugabe von 3 % SIS um ca. 50 %.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

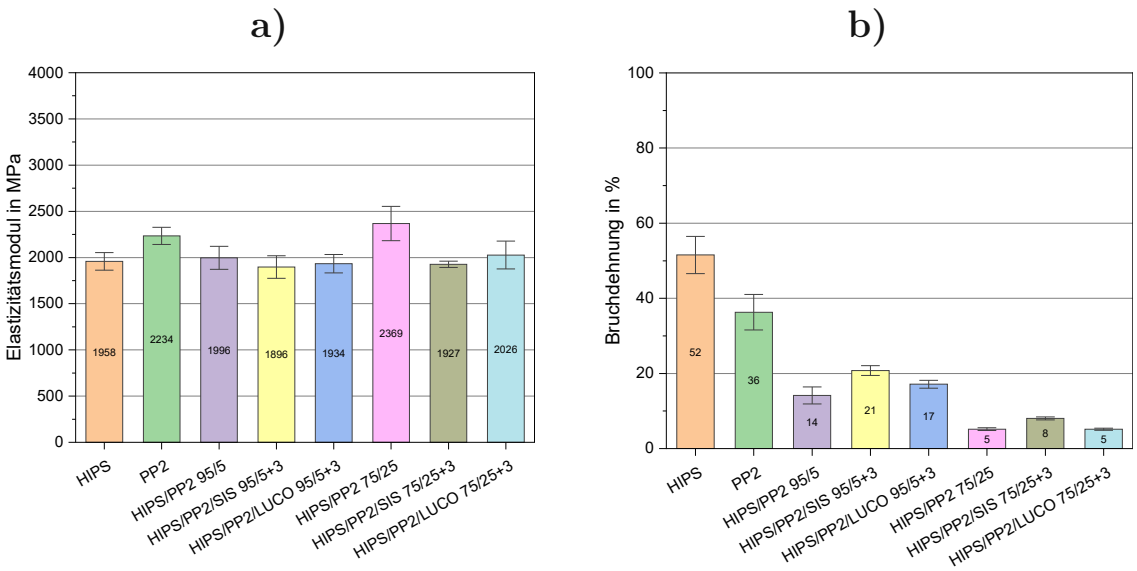

Abb. 3.32: Zugversuch der Blends mit HIPS als Hauptbestandteil mit Kompatibilizer

Die Elastizitätsmodule der Blends ohne Additive liegen in etwa zwischen den E-Modulen der Reinmaterialien. Durch Zugabe der Additive kann wenn überhaupt nur eine geringe Erhöhung der E-Module erzielt werden. Die Bruchdehnung wird durch die Blendbildung im Vergleich zu den einzelnen Werkstoffen deutlich reduziert. Durch Zugabe der Additive kann dies gering verbessert werden, das Niveau der Ausgangsmaterialien wird allerdings nicht erreicht.

3.2.3 Schlagzugversuch

Abbildung 3.33 zeigt die Ergebnisse des Schlagzugversuchs der Reinmaterialien und der Blends ohne Kompatibilizer. Die mittlere Schlagzugzähigkeit der Blends ohne Additive erreicht maximal die Hälfte der Reinmaterialien. Eine Blendbildung von PS und PP ohne Kompatibilizer führt zu einer deutlichen Versprödung des Materials.

In [50] wird eine sehr ähnliche Schlagzugzähigkeit für reines HIPS ermittelt. Der Blend mit 5 % PP2 besitzt allerdings eine deutlich geringere Zähigkeit als der Blend im Paper. Das könnte an den unterschiedlichen Materialien und Verarbeitungstemperaturen liegen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

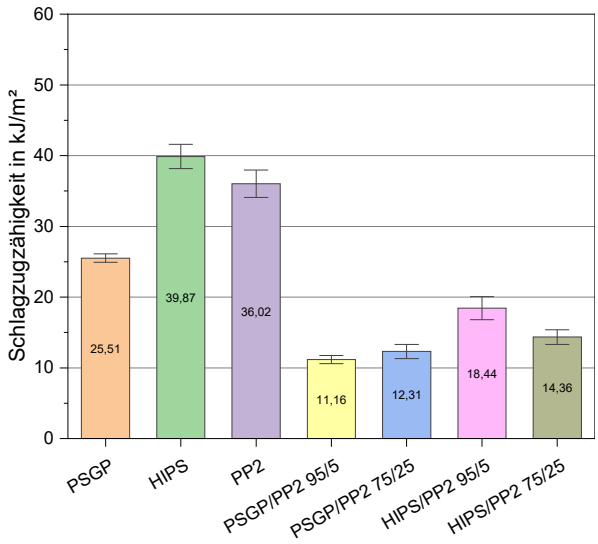

Abb. 3.33: Schlagzugversuch der Reinmaterialien und Blends ohne Kompatibilisierungsmittel

Abbildung 3.34 dokumentiert die Ergebnisse des Schlagzugversuchs mit Blends deren Hauptbestandteil PSGP ist. Die Kompatibilisierungsmittel erhöhen die Schlagzugzähigkeit der Blends mit 95 % PSGP-Anteil um ca. 40 %. Auf die Blends mit 75 % PSGP-Anteil haben die Additive deutlich weniger Einfluss. Durch die Zugabe der Kompatibilisierungsmittel SIS und LUCO zu den Blends kann die Schlagzugzähigkeit von reinem PSGP nicht erreicht werden.

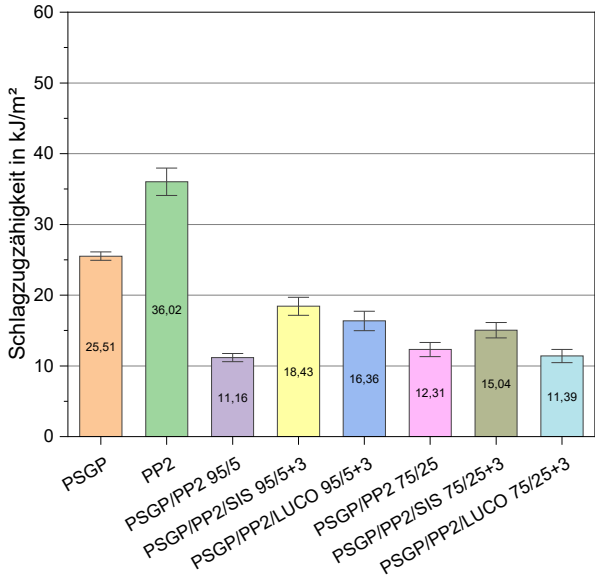

Abb. 3.34: Schlagzugversuch der Blends mit mehrheitlichen PSGP-Anteil und Kompatibilisierungsmittel

Abbildung 3.35 zeigt die Ergebnisse der mittleren Schlagzugzähigkeit der Blendproben

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

mit mehrheitlichem HIPS-Anteil. Der Blend HIPS/PP2/SIS 95/5+3 erreicht in etwa dieselbe Schlagzugzähigkeit wie das Ausgangsmaterial. Bei den Mischungen mit 75 % HIPS-Anteil ist die Steigerung durch SIS in etwa 40 %. Dieselben Blends mit LUCO erreichen keinen signifikanten Zuwachs an Schlagzugzähigkeit.

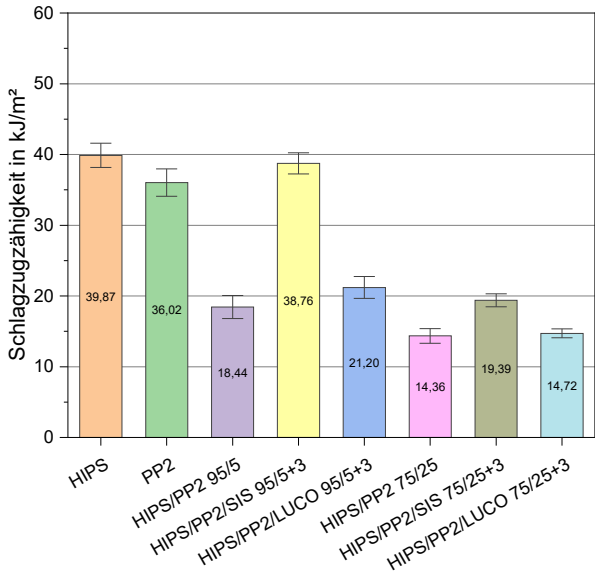

Abb. 3.35: Schlagzugversuch der Blends mit mehrheitlichen HIPS-Anteil und Kompatibilisierungsmittel

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Zähigkeit der untersuchten Werkstoffe bei einer Blendbildung ohne Kompatibilisierungsmittel deutlich abnimmt. Durch die Zugabe von SIS konnten stets höhere Schlagzugzähigkeiten erreicht werden als mit LUCO. Die Zähigkeit der Mischung HIPS/PP2/SIS 95/5+3 erreicht das selbe Niveau wie die Zähigkeit des Ausgangsmaterials.

3.3 Versuche mit erweitertem SIS-Anteil

Aus der Interpretation der Messergebnisse der Alterungs- und Blendversuche konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- HIPS ist alterungsresistenter als PSGP
- HIPS eignet sich für die Blendbildung besser als PSGP
- SIS erzielt bessere Ergebnisse bei der Blendbildung als LUCO

Daher werden Blends aus HIPS/PP2 mit 95/5 und 75/25 mit einem erhöhten SIS-Gehalt von 15 % erzeugt und gemessen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.3.1 Viskosität und MFR

Abbildung 3.36 zeigt die Gegenüberstellung der Messergebnisse von MFR und Scherrheologie. Diagramm a) bildet die komplexe Viskosität der Proben ab. Die Messkurven liegen sehr nahe beieinander. Diagramm b) dokumentiert die ermittelten MFR-Werte. Bei den 95/5 Blends kommt es durch die Zugabe von SIS bereits bei 3 % zu einer Erhöhung des MFR. Die Zugabe von 15 % SIS führt fast zu einer Verdoppelung des MFR mit 3 % SIS. Bei den ungünstigeren Blends mit 75/25 Mischungsverhältnis kommt es bei einer Zugabe von 3 % SIS zu einer Verringerung des MFR um 20 %. Eine Erhöhung des SIS-Gehalts auf 15 % führt zu einer Vergrößerung des MFR um 9 % relativ zum MFR des Blends ohne SIS. Die Ergebnisse aus Tabelle 3.7 korrelieren mit den Messungen der komplexen Viskosität. Die Umrechnung findet sich in Unterabschnitt 2.5.5 und eine Erklärung der Vergleichbarkeit in Unterabschnitt 3.1.1.

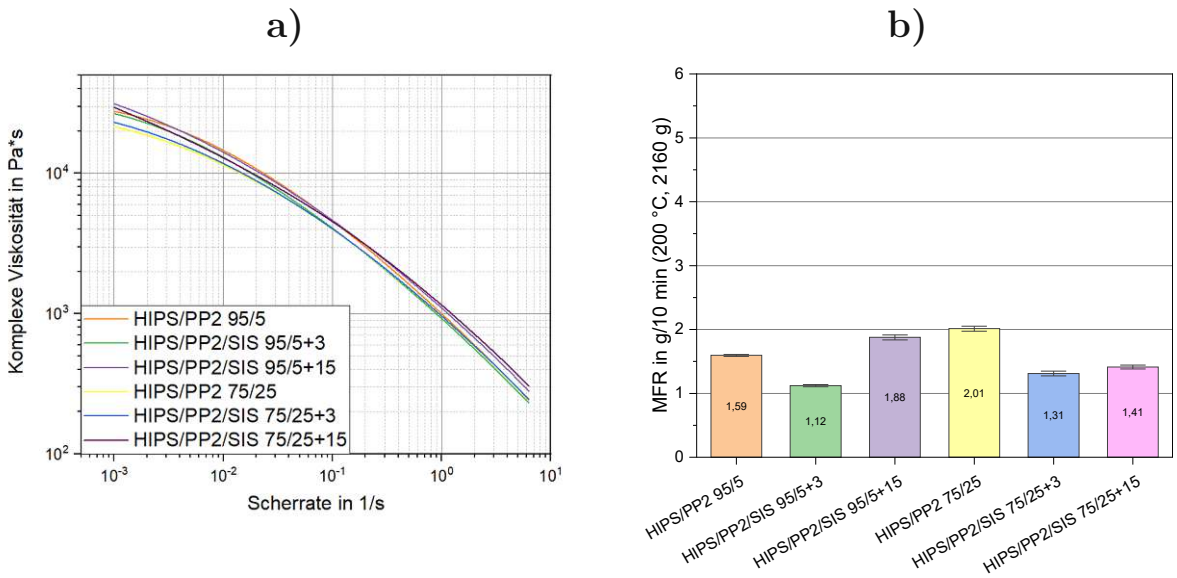

Abb. 3.36: Vergleich von a) komplexer Viskosität und b) Schmelzflussrate der Versuche der Blends mit erhöhtem SIS-Anteil

Tab. 3.7: Umrechnungsergebnisse der MFR-Werte der Proben mit erhöhtem SIS-Anteil

		PSGP %	HIPS %	PP2 %	Dichte g/cm³	MFR g/10 min	MVR cm³/10 min	Scherrate s^{-1}	KV Pa*s
HIPS/PP2	95/5	0	95	5	0,9405	1,59	1,691	3,1	6203
HIPS/PP2/SIS	95/5+3	0	95	5	0,9405	1,12	1,191	2,2	8806
HIPS/PP2/SIS	95/5+15	0	95	5	0,9405	1,88	1,999	3,7	5246
HIPS/PP2	75/25	0	75	25	0,9025	2,01	2,227	4,1	4708
HIPS/PP2/SIS	75/25+3	0	75	25	0,9025	1,31	1,452	2,7	7224
HIPS/PP2/SIS	75/25+15	0	75	25	0,9025	1,41	1,562	2,9	6712

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.3.2 Zugversuch

Abbildung 3.37 zeigt die Ergebnisse des Zugversuchs mit den SIS-Blends sowie den Referenzblends. Je größer der SIS-Anteil desto geringer ist der E-Modul, kann aus Diagramm a) geschlossen werden. Bei der Bruchdehnung in Diagramm b) ist genau der umgekehrte Effekt zu erkennen. Mit steigendem SIS-Anteil nimmt die Bruchdehnung zu. Die Bruchdehnung des Blends HIPS/PP2/SIS 95/5+15 beträgt 71 % des reinen HIPS.

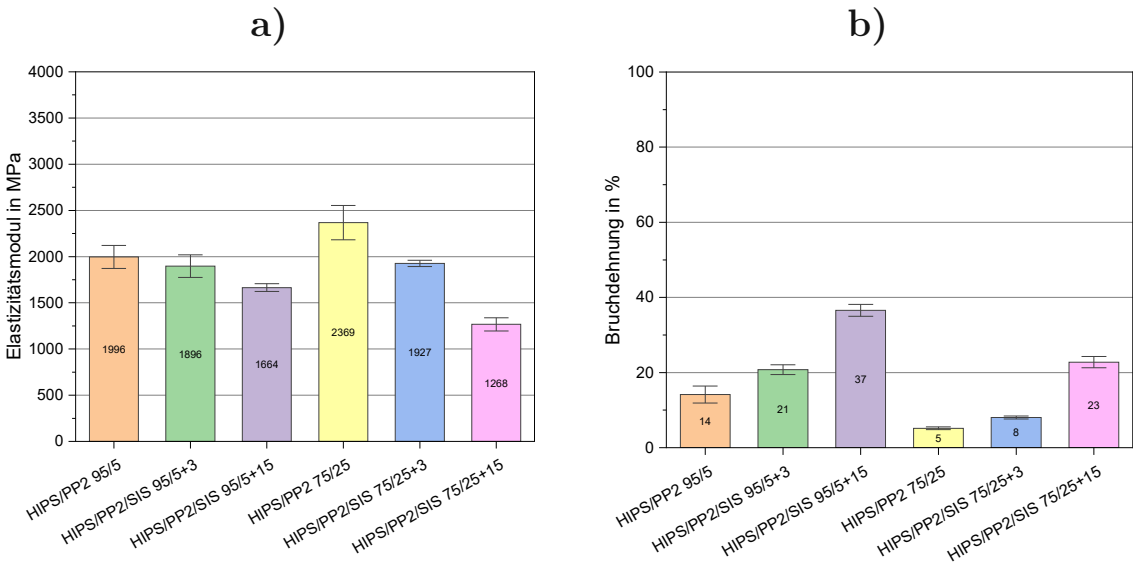

Abb. 3.37: a) E-Modul und b) Bruchdehnung der Blends mit erhöhtem SIS-Anteil

3.3.3 Schlagzugversuch

Abbildung 3.38 dokumentiert die Ergebnisse des Schlagzugversuchs der SIS-Blends. Bei den 95/5 Mischungen zeigt sich, dass mit 15 % SIS-Anteil kaum noch eine Steigerung der Schlagzugzähigkeit im Vergleich zu dem Blend mit 3 % SIS-Anteil erreicht wird. Es ist allerdings anzumerken, dass die Schlagzugzähigkeit bereits auf dem Niveau des Reinmaterials liegt. Dies ist durchaus beachtlich, da HIPS und PP2 unverträgliche Blendpartner sind. Bei den 75/25-Blends zeigt sich mit 3 % SIS-Anteil eine deutlich geringere Steigung als bei der anderen Gruppe. Mit 15 % SIS-Anteil wird in etwa dieselbe Schlagzugzähigkeit wie bei reinem HIPS erreicht.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

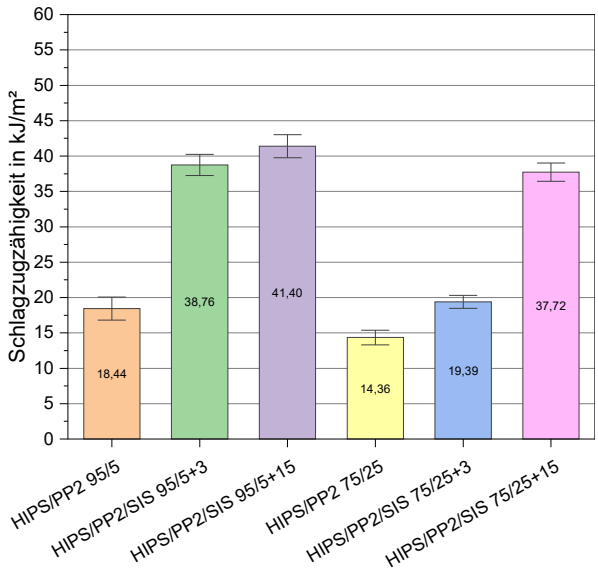

Abb. 3.38: Schlagzugversuch der Blends mit erhöhtem SIS-Anteil

3.4 Versuche mit recyceltem Material

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Versuche mit recyceltem Material vorgestellt. Hierfür wurden PS und PP Joghurtbecher als Reinmaterial verwendet. Die Becher wurden sortiert, gereinigt und anschließend in der Mühle gemahlen. Mit dem Granulat wurde eine Referenzblendmischung von PS/PP 95/5 und zwei Mischungen mit SIS-Additiv mit 3 % und 15 % hergestellt.

3.4.1 Viskosität und MFR

Abbildung 3.39 stellt die gemessenen MFR-Werte mit den Kurven der komplexen Viskosität gegenüber. Die Zugabe von 3 % SIS verringert den MFR des Blends um ca. 23 %. Ein SIS-Gehalt von 15 % führt zu keiner nennenswerten Erhöhung des MFR verglichen zum Blend ohne Kompatibilisierungsmittel. Die komplexe Viskosität der Blends liegt sehr nahe an der des reinen PS. Der Blend mit 3 % SIS-Gehalt kommt der Viskosität von reinem PS am nähesten. Tabelle 3.8 gibt die nach Unterabschnitt 2.5.5 umgerechneten MFR-Werte wieder. Die umgerechneten Werte korrelieren sehr gut mit den Messungen der komplexen Viskosität nach Unterabschnitt 3.1.1.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

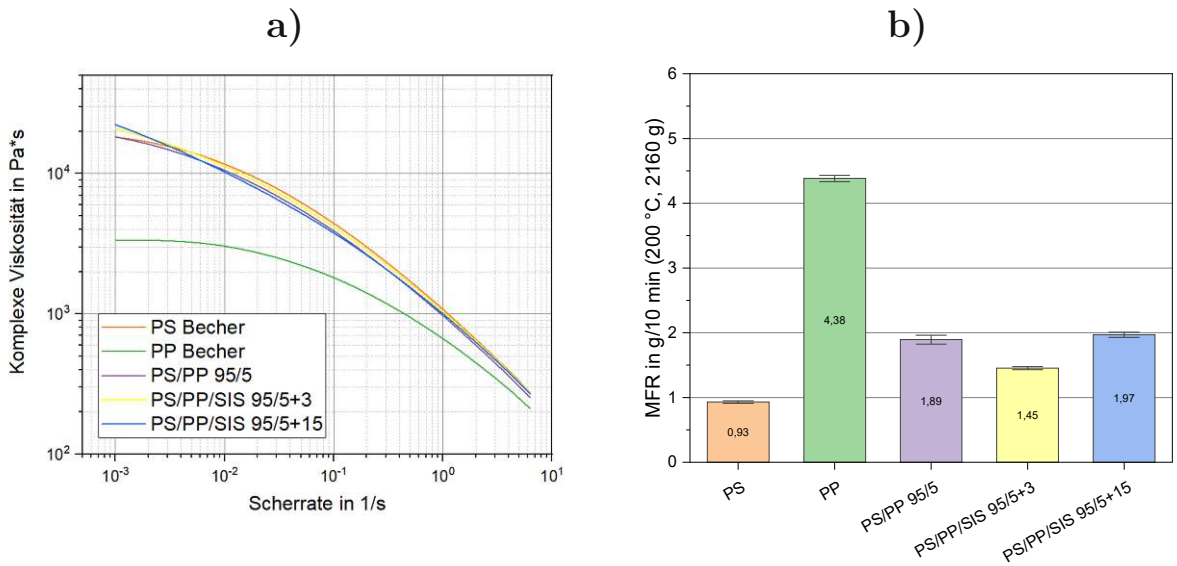

Abb. 3.39: Vergleich von a) Komplexer Viskosität und b) Schmelzflussrate der Versuche aus recyceltem Material

Tab. 3.8: Umrechnungsergebnisse für die MFR-Werte der Proben aus recyceltem Material

		PSGP %	HIPS %	PP2 %	Dichte g/cm³	MFR g/10 min	MVR cm³/10 min	Scherrate s^{-1}	KV Pa*s
PS		0	100	0	0,95	0,93	0,979	1,8	10712
PP		0	0	100	0,76	4,38	5,763	10,7	1820
PS/PP	95/5	0	95	5	0,9405	1,89	2,010	3,7	5218
PS/PP/SIS	95/5+3	0	95	5	0,9405	1,45	1,542	2,9	6802
PS/PP/SIS	95/5+15	0	95	5	0,9405	1,97	2,095	3,9	5006

3.4.2 Zugversuch

Abbildung 3.40 dokumentiert die Ergebnisse des Zugversuchs mit Proben aus recyceltem Material. Diagramm a) zeigt die Ergebnisse für den Elastizitätsmodul der Proben. In Diagramm b) wird die mittlere Bruchdehnung der Proben dargestellt. Der Blend ohne Kompatibilisierungsmittel erreicht den höchsten E-Modul. Dies ist überraschend, da PS und PP inkompatible Blendpartner sind. Allerdings ist anzunehmen, dass in den Joghurtbechern bereits Additive sind, welche die mechanischen Eigenschaften fördern. Der E-Modul des Blends mit 3 % SIS liegt ca. 10 % über dem des Reinmaterials. Eine Erhöhung des SIS-Anteils auf 15 % führt zu einer Verringerung des E-Moduls auf etwa das Niveau des Reinmaterials. Die Bruchdehnung des Blends ohne SIS liegt deutlich unter den Bruchdehnungen der Reinmaterialien. Durch die Zugabe von SIS gelingt es

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

eine Bruchdehnung ähnlich der des reinen PS zu erreichen. Der Versuch zeigt, dass ein Gehalt von 3 % SIS in etwa dasselbe Ergebnis liefert wie 15 %.

Der Vergleich von E-Modul und Bruchdehnung von PS stimmt sehr gut mit den Werten aus Abbildung 3.30 für HIPS überein. Die Bruchdehnung von PP ist allerdings deutlich höher als bei der PP2-Probe. An dieser Stelle ist anzumerken, dass aus vorherigen Arbeiten [52] [39] hervorgeht, dass die verwendete PP Type stark auf Variation der Werkzeugtemperatur beim Spritzguss reagiert. Die hohe Temperatur wurde allerdings für die bessere Vergleichbarkeit mit PS gewählt. Die Messwerte der Blendbildung korrelieren ebenfalls mit dem Ergebnis aus Abbildung 3.30. Die Zugabe von SIS erzielt hier deutlich bessere Ergebnisse als in Abbildung 3.32.

In [53] wurde der Zugversuch mit Proben aus recyceltem HIPS und PP durchgeführt. Hierbei wurde für HIPS bzw. PP ein E-Modul von 2400 MPa bzw. 1700 MPa ermittelt. Dies stimmt in etwa mit den Ergebnissen dieser Arbeit überein.

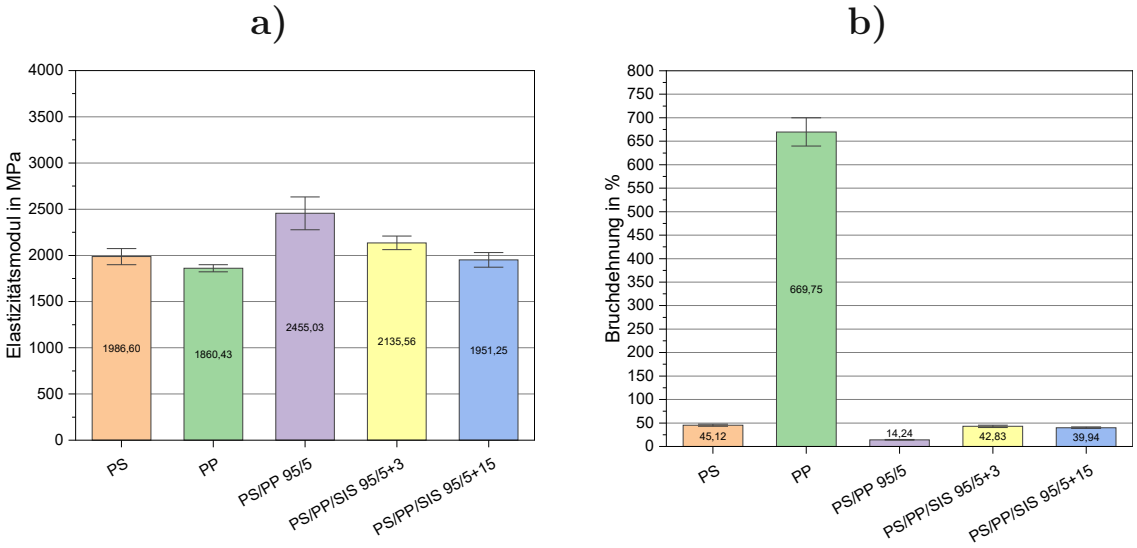

Abb. 3.40: a) E-Modul und b) Bruchdehnung der Versuche mit recyceltem Material

3.4.3 Schlagzugversuch

Abbildung 3.41 zeigt die Schlagzugzähigkeit der Proben aus recyceltem Material. Die Schlagzugzähigkeit von PS und PP aus den recycelten Joghurtbechern ist sehr ähnlich wie die ermittelten Werte von HIPS und PP2 aus Granulat in Abbildung 3.35. Die Blendbildung ohne Kompatibilizer führt zu einer Versprödung und reduziert die Schlagzugzähigkeit auf etwa ein Viertel im Vergleich zum reinen PS. Die Zugabe von SIS erhöht die Zähigkeit der Blends bereits über das Niveau der Reinmaterialien. Die Schlagzugzähigkeit des Blends mit 3 % SIS-Anteil liegt ca. 10 % über dem des reinen PS. Die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Zugabe von 15 % SIS erhöht die Zähigkeit auf fast 25 % mehr als beim reinen PS. Die Ergebnisse korrelieren sehr gut mit Abbildung 3.38.

In [54] wird ebenfalls die Schlagzugzähigkeit von HIPS/PP Blends untersucht. Im Paper wird festgestellt, dass ein PP-Anteil von 8 % die Schlagzugzähigkeit auf ca. ein Drittel reduziert wird. Dies stimmt sehr gut mit dieser Arbeit überein.

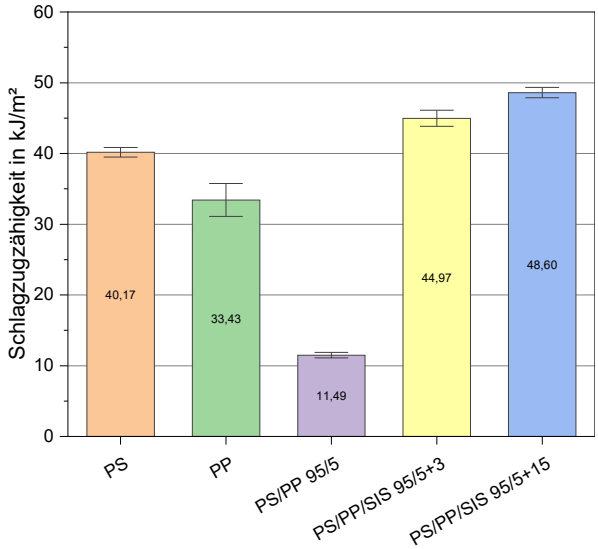

Abb. 3.41: Schlagzugversuch der recycelten Proben

Die Versuche mit den Blends aus recyceltem Material zeigen, dass das Recycling von PS Joghurtbechern mit geringen Verunreinigungen von PP sehr gut möglich ist. Bereits durch eine Zugabe von 3 % SIS können ebenbürtige Eigenschaften wie beim Ausgangsmaterial erzielt werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4 Zusammenfassung

Der Zweck dieser Arbeit ist es die Recycelbarkeit von Polystyrol und Polypropylen miteinander zu vergleichen. Daraus soll eine Entscheidung getroffen werden, welcher der Werkstoffe besser für zukünftige kurzlebige Verpackungsmaterialien geeignet ist.

Um das Alterungsverhalten der Kunststoffe zu untersuchen, wurden zwei Verfahren zur künstlichen Alterung eingesetzt. Diese werden als Ofenalterung und Mehrfachextrusion bezeichnet. Bei der Ofenalterung wird Granulat in natürlicher Atmosphäre bei 80 °C bis zu 50 Tage ausgelagert. Bei der Mehrfachextrusion durchlaufen die Werkstoffe zehn Verarbeitungszyklen aus Extrudieren bei 165-200-200 °C und anschließendes Mahlen in der Schneidmühle.

Um die Auswirkungen der Kontaminierung von Recyclat zu untersuchen, wurden Blendversuche durchgeführt. Hierfür wurden Blends aus PS/PP mit den Mischungsverhältnissen 95/5 und 75/25 hergestellt. Zu diesen Grundmischungen wurden noch zusätzlich zwei Serien mit Kompatibilisierungsmitteln, SIS und LUCO, untersucht. Des Weiteren wurden Versuche der Blendbildung mit tatsächlichem Rezyklat aus Post-Consumer Joghurtbechern durchgeführt.

Ergebnis Alterungsversuche

Es wurde festgestellt, dass die Auslagerung im Ofen nur sehr geringen Einfluss auf die untersuchten Eigenschaften von PS ausübt. Beim PP wurde in Unterabschnitt 3.1.3 festgestellt, dass die MMV zunächst breiter und nach 30 Tagen schmäler als im Ausgangszustand wird. Die Mehrfachextrusion führt zu deutlicheren Alterungserscheinungen als die Ofenalterung. In Unterabschnitt 3.1.4 wurde beim PP2 durch die Alterung mittels Mehrfachextrusion eine annähernd quadratische Zunahme der Bruchdehnung mit der Anzahl der Verarbeitungsschritte festgestellt.

Bei dem Vergleich des Alterungsverhalten in Abschnitt 3.1 wurde festgestellt, dass **HIPS**, ein Polystyrol-Copolymer im Vergleich zu reinem Polystyrol und Polypropylen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

die höchste Alterungsresistenz besitzt. Die Bruchdehnung wurde durch die Alterung bei HIPS erhöht. Eine signifikante Änderung der Zähigkeitseigenschaften konnte bei HIPS durch die Alterung nicht nachgewiesen werden. Die Viskositätskurven bleiben bei HIPS im Vergleich zu den beiden anderen untersuchten Materialien am nächsten zusammen. Dies wird auch durch einen sich kaum mit der fortschreitenden Alterung ändernden MFR untermauert. Aus den Alterungsversuchen geht deutlich hervor, dass Polystyrol in Form von HIPS alterungsbeständiger als Polypropylen ist.

Es konnten nur geringe Änderungen der Elastizitätseigenschaften von **PSGP** durch die Alterungsmaßnahmen festgestellt werden. Nach zehn Verarbeitungszyklen konnte bei der Mehrfachextrusion der E-Modul merklich reduziert werden. Durch die Ofenalterung kam es zu einer Reduktion der Zähigkeit. Im Vergleich zu den anderen Proben wurde die Viskosität durch die Mehrfachextrusion mittelmäßig verändert.

Bei den **PP2**-Proben kam es durch die Alterung zu einer deutlichen Steigerung der Bruchdehnung bei gleichzeitiger Reduktion des E-Moduls. Durch die Mehrfachextrusion wurde die Zähigkeit deutlich herabgesetzt. Die Viskosität von PP2 wurde im Vergleich zu den beiden getesteten Polystyrolproben am stärksten abgebaut.

Ergebnisse Blendversuche

Die Blendbildung ohne Kompatibilisierungsmittel führt zu einer deutlichen Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften und einer Reduktion der Viskosität im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien. Dies entspricht den Erwartungen, da PS und PP inkompatible Blendpartner sind.

Die Zugabe von SIS führt beim Zugversuch nur zu geringen Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften. Die Schlagzugzähigkeit der Blends wird durch SIS deutlich verbessert: Teilweise können die Zähigkeiten der Ausgangsmaterialien erreicht werden. Die Viskosität der Blends kann durch SIS nur geringfügig beeinflusst werden.

Durch die Zugabe von LUCO können die mechanischen Eigenschaften der Blends kaum verändert werden. Die Viskosität konnte mittels LUCO besser beeinflusst werden als durch SIS.

Wird die Auswirkung der Kompatibilisierungsmittel auf alle Eigenschaften betrachtet so ist SIS besser als LUCO geeignet um PS/PP Blends zu generieren.

Ergebnisse der Versuche mit erhöhtem SIS-Anteil

Die Versuche mit erhöhtem SIS-Anteil in Abschnitt 3.3 zeigen, dass ein SIS-Gehalt von 15 % kaum Verbesserungen bei den untersuchten Eigenschaften im Verglich zu einem Gehalt von 3 % bringt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Ergebnisse der Versuche aus recyceltem Material

Die Versuche mit Proben aus recyceltem Material in Abschnitt 3.4 haben gezeigt, dass sich aus PS und PP Rezyklat mit 3 % SIS-Zugabe Blends bilden lassen deren Eigenschaften sehr nahe an den Ausgangsmaterialien liegen.

E-Modul und Bruchdehnung der PS-Probe stimmen sehr gut mit den Werten für ungealtertes HIPS überein. Die Bruchdehnung von PP ist allerdings sehr viel höher als die des ungealterten PP2.

Durch die Zugabe von SIS können Blends erzeugt werden deren Schlagzugzähigkeit über dem Niveau des Reinmaterials liegt.

Die Viskosität der Blends lässt sich durch SIS nicht signifikant verändern.

Die zusammengefassten Ergebnisse zeigen, dass Polystyrol besser als Recyclingmaterial geeignet ist als Polypropylen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

5 Ausblick

Die Alterung von Polystyrol und Polypropylen ist bereits in einer großen Anzahl von Papers analysiert worden. Zur Blendbildung der beiden inkompatiblen Materialien gibt es allerdings kaum Literatur. Des Weiteren wäre es auch von Interesse ob es noch andere Kompatibilisierungsmittel wie SIS gibt, die eine vergleichbare Blendbildung ermöglichen.

Bei den Ergebnissen der Alterungsverusche der mechanischen Eigenschaften beim PP2 kommt es zu einem Widerspruch mit den Erwartungen der Crossover-Punkte aus den rheologischen Untersuchungen. In anderen Arbeiten wird teilweise ein unterschiedlicher Trend bei der Alterung von PP beobachtet. Es existiert allerdings eine ähnliche Arbeit mit einer anderen PP Sorte, welche im selben Labor gealtert wurde. Hier wurde ein korrelierender Trend beobachtet. Daher gibt es Potential zu untersuchen, wodurch der besagte Trend erzeugt wird.

In dieser Arbeit wurden die Eigenschaften von Blends mit 95/5 und 75/25 Mischungsanteil untersucht. Eine feinere Unterteilung der Mischungsverhältnisse könnte ebenfalls aufschlussreich sein, inwiefern sich die Eigenschaften von PS mit zunehmender PP Kontamination verhalten.

Dasselbe gilt für den SIS-Gehalt. In der Arbeit wurden die Blendeigenschaften mit Konzentrationen von 3 % und 15 % untersucht. Es wurde festgestellt, dass eine Zugabe von 15 % SIS kaum noch Verbesserungen im Vergleich zu den 3 % bringen. Aber wie sieht es für den Bereich von 0 bis 3 % aus? Oder vielleicht liegt der optimale Anteil an SIS zwischen 3 und 15 %.

Wie wirken sich Stabilisierungsadditive auf die Alterung oder die Blendbildung aus? Dies wäre eine weitere Forschungsfrage, die es zu beantworten gilt.

Schlussendlich wird weitere Forschungsarbeit notwendig sein, um eine optimale und umweltgerechte Lösung für das Recyclingproblem mit jährlich wachsendem Kunststoffbedarf zu finden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

A Anhang

A.1 Abkürzungen

PS	Polystyrol
PP	Polypropylen
Mio.	Millionen
Abb.	Abbildung
Tab.	Tabelle
UV	Ultraviolett
CO	Kohlenstoffmonoxid
C-C	einfache Kohlenstoffbindung
C-H	einfache Kohlenwasserstoffbindung
C-O	einfache Verbindung von Kohlen- und Wasserstoff
O-O	einfache Verbindung von zwei Sauerstoffatomen
mol %	Prozent bezogen auf die Molmasse
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
PET	Polyethylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PA	Polyamid
PBT	Polybutylenterephthalat
Masse-%	Prozent bezogen auf die Masse
m.%	Prozent bezogen auf die Masse
DIN	Deutsche Industrienorm
ISO	Internationale Organisation für Normung
IR	Infrarot
EU	Europäische Union
PSGP	Polystyrol General Purpose
HIPS	High Impact Polystyrol
LUCO	Lucofin

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

SIS	Polystyrol-block-polyisopren-block-polystyrol
σ_Y	Streckgrenze
MFI	Schmelzflussindex
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CH_2	Methylen
C=O	doppelte Verbindung von Kohlen- und Sauerstoff
PMMA	Polymethylmethacrylat
KV	Komplexe Viskosität
MM	Molmasse
MMV	mittlere Molmassenverteilung
E-Modul	Elastizitätsmodul
MFR	Melt Flow Rate
MVR	Melt Volume Rate
FTIR	Fourier-Transformations-Spektroskopie
TGA	Thermogravimetrische Analyse
UV	Ultraviolett
$\mathbf{a_{tN}}$	Schlagzugzähigkeit
ε_B	Bruchdehnung
σ_B	Bruchspannung
η	Viskosität

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

A.2 Messergebnisse

Tab. A.1: Übersicht Messergebnisse

Bezeichnung	**MFR** [g/10 min]	**E-Modul** [MPa]	ε_B [%]	σ_M [MPa]	$\mathbf{a_{tN}}$ [kJ/m^2]
PSGP 0 Tage	$0,51 \pm 0,02$	3006 ± 173	$2,81 \pm 0,2$	$57,35 \pm 1,1$	$25,51 \pm 1,1$
PSGP 10 Tage	$0,48 \pm 0,01$	2764 ± 331	$3,40 \pm 0,6$	$57,11 \pm 1,6$	$19,38 \pm 2,5$
PSGP 20 Tage	$0,48 \pm 0,02$	2661 ± 459	$3,61 \pm 0,7$	$54,46 \pm 1,5$	$16,18 \pm 3,5$
PSGP 30 Tage	$0,47 \pm 0,02$	2803 ± 450	$2,78 \pm 0,6$	$54,79 \pm 1,7$	$21,67 \pm 2,9$
PSGP 40 Tage	$0,50 \pm 0,01$	3035 ± 723	$2,84 \pm 0,6$	$53,92 \pm 6,8$	$17,14 \pm 2,3$
PSGP 50 Tage	$0,50 \pm 0,05$	2774 ± 217	$2,48 \pm 0,3$	$37,73 \pm 8,6$	$14,77 \pm 1,6$
HIPS 0 Tage	$0,58 \pm 0,01$	1958 ± 232	$51,54 \pm 12,2$	$30,14 \pm 1,6$	$39,87 \pm 3,0$
HIPS 10 Tage	$0,60 \pm 0,02$	2177 ± 549	$61,75 \pm 4,8$	$30,94 \pm 0,6$	$42,61 \pm 1,9$
HIPS 20 Tage	$0,61 \pm 0,02$	1869 ± 202	$60,42 \pm 6,8$	$30,67 \pm 0,6$	$45,26 \pm 2,4$
HIPS 30 Tage	$0,60 \pm 0,03$	2143 ± 418	$62,86 \pm 1,8$	$30,95 \pm 0,3$	$44,01 \pm 3,9$
HIPS 40 Tage	$0,62 \pm 0,02$	2080 ± 330	$61,53 \pm 6,3$	$31,82 \pm 1,3$	$39,30 \pm 2,0$
HIPS 50 Tage	$0,58 \pm 0,03$	1926 ± 170	$66,23 \pm 1,3$	$29,04 \pm 1,1$	$38,36 \pm 2,4$
PP2 0 Tage	$1,22 \pm 0,05$	2730 ± 106	$107,28 \pm 24,3$	$37,88 \pm 0,7$	$36,02 \pm 3,4$
PP2 10 Tage	$1,25 \pm 0,02$	2042 ± 374	$307,78 \pm 122,5$	$36,26 \pm 1,2$	$30,41 \pm 2,3$
PP2 20 Tage	$1,29 \pm 0,03$	2119 ± 286	$156,30 \pm 79,4$	$35,23 \pm 1,1$	$28,55 \pm 3,5$
PP2 30 Tage	$1,35 \pm 0,02$	1958 ± 213	$134,21 \pm 87,7$	$35,02 \pm 0,8$	$35,58 \pm 3,8$
PP2 40 Tage	$1,26 \pm 0,03$	2080 ± 360	$230,73 \pm 31,2$	$35,87 \pm 0,5$	$35,15 \pm 3,1$
PP2 50 Tage	$1,20 \pm 0,03$	2365 ± 129	$161,88 \pm 49,4$	$37,71 \pm 0,7$	$30,17 \pm 4,4$
PSGP 0x Extru	$0,51 \pm 0,02$	3006 ± 173	$2,81 \pm 0,2$	$57,35 \pm 1,1$	$25,51 \pm 1,1$
PSGP 1x Extru	$0,49 \pm 0,03$	/	/	/	/
PSGP 3x Extru	$0,62 \pm 0,02$	2952 ± 090	$3,75 \pm 0,7$	$51,05 \pm 4,9$	$21,52 \pm 1,7$
PSGP 5x Extru	/	2806 ± 340	$3,45 \pm 0,4$	$56,16 \pm 1,2$	$21,90 \pm 2,9$
PSGP 6x Extru	$1,00 \pm 0,04$	/	/	/	/
PSGP 7x Extru	$1,00 \pm 0,02$	2849 ± 120	$3,00 \pm 0,4$	$50,27 \pm 5,4$	$22,50 \pm 1,4$
PSGP 10x Extru	$1,42 \pm 0,02$	1949 ± 325	$3,49 \pm 0,6$	$54,07 \pm 1,6$	$22,63 \pm 2,4$
HIPS 0x Extru	$0,58 \pm 0,01$	1958 ± 232	$51,54 \pm 12,2$	$30,14 \pm 1,6$	$39,87 \pm 3,0$
HIPS 1x Extru	$0,70 \pm 0,01$	/	/	/	/
HIPS 3x Extru	$0,77 \pm 0,03$	2026 ± 044	$61,04 \pm 4,7$	$30,90 \pm 0,9$	$38,62 \pm 2,8$
HIPS 5x Extru	/	2088 ± 313	$65,18 \pm 4,4$	$31,27 \pm 1,3$	$42,61 \pm 2,9$
HIPS 6x Extru	$0,82 \pm 0,03$	/	/	/	/
HIPS 7x Extru	$0,72 \pm 0,01$	1961 ± 150	$65,55 \pm 4,4$	$29,44 \pm 0,7$	$42,25 \pm 1,9$
HIPS 10x Extru	$0,98 \pm 0,05$	1931 ± 372	$67,48 \pm 3,4$	$29,71 \pm 0,7$	$42,89 \pm 3,5$
PP2 0x Extru	$1,22 \pm 0,05$	2730 ± 106	$107,28 \pm 24,3$	$37,88 \pm 0,7$	$36,02 \pm 3,4$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

PP2 1x Extru	$1,66 \pm 0,04$	/	/	/	/
PP2 3x Extru	$1,93 \pm 0,06$	2776 ± 093	$106,03 \pm 15,8$	$37,84 \pm 0,8$	$38,04 \pm 2,9$
PP2 5x Extru	/	2147 ± 171	$233,48 \pm 24,9$	$35,92 \pm 0,4$	$33,92 \pm 1,0$
PP2 6x Extru	$2,65 \pm 0,09$	/	/	/	/
PP2 7x Extru	$4,30 \pm 0,20$	2938 ± 076	$291,32 \pm 19,4$	$37,46 \pm 0,3$	$23,95 \pm 2,5$
PP2 10x Extru	$5,67 \pm 0,41$	1959 ± 266	$621,92 \pm 27,5$	$35,14 \pm 0,9$	$19,63 \pm 1,6$

Tab. A.2: Übersicht Messergebnisse Blendversuche, Versuche mit erhöhter SIS-Anteil und Versuch mit recyceltem Material

Bezeichnung	**MFR** [g/10 min]	**E-Modul** [MPa]	ε_B [%]	$\mathbf{a_{tN}}$ [kJ/m^2]
Blendversuche				
PSGP/PP2 95/5	$1,68 \pm 0,05$	2935 ± 316	$2,46 \pm 0,333$	$11,16 \pm 1,0$
PSGP/PP2 75/25	$3,90 \pm 0,17$	2306 ± 277	$1,43 \pm 0,063$	$12,31 \pm 1,8$
HIPS/PP2 95/5	$0,72 \pm 0,02$	1996 ± 249	$17,13 \pm 2,100$	$18,44 \pm 2,9$
HIPS/PP2 75/25	$1,30 \pm 0,04$	2369 ± 371	$5,15 \pm 0,455$	$14,36 \pm 1,8$
PSGP/PP2/SIS 95/5+3	$0,89 \pm 0,05$	2921 ± 476	$2,22 \pm 0,323$	$18,43 \pm 2,3$
PSGP/PP2/SIS 75/25+3	$1,35 \pm 0,06$	2547 ± 162	$1,63 \pm 0,246$	$15,04 \pm 1,9$
HIPS/PP2/SIS 95/5+3	$1,06 \pm 0,09$	1896 ± 244	$20,77 \pm 2,571$	$38,76 \pm 3,0$
HIPS/PP2/SIS 75/25+3	$1,04 \pm 0,04$	1927 ± 068	$8,05 \pm 0,794$	$19,39 \pm 1,9$
PSGP/PP2/LUCO 95/5+3	$0,63 \pm 0,06$	2964 ± 341	$2,46 \pm 0,333$	$16,36 \pm 2,4$
PSGP/PP2/LUCO 75/25+3	$1,72 \pm 0,10$	2582 ± 194	$1,43 \pm 0,063$	$11,39 \pm 1,7$
HIPS/PP2/LUCO 95/5+3	$1,26 \pm 0,08$	1934 ± 199	$17,13 \pm 2,100$	$21,20 \pm 2,7$
HIPS/PP2/LUCO 75/25+3	$1,30 \pm 0,06$	2026 ± 260	$5,15 \pm 0,455$	$14,72 \pm 1,4$
Versuche mit erhöhtem SIS-Anteil				
HIPS/PP2/SIS 95/5+15	$1,88 \pm 0,09$	1664 ± 84	$36,56 \pm 3,15$	$41,40 \pm 2,9$
HIPS/PP2/SIS 75/25+15	$1,41 \pm 0,08$	1268 ± 124	$22,76 \pm 2,60$	$37,72 \pm 2,6$
Versuche mit recyceltem Material				
PS	$0,93 \pm 0,04$	1987 ± 152	$45,12 \pm 3,97$	$40,17 \pm 1,2$
PP	$4,38 \pm 0,11$	1860 ± 65	$669,75 \pm 52,03$	$33,43 \pm 4,1$
PS/PP 95/5	$1,9 \pm 0,16$	2455 ± 307	$14,24 \pm 0,98$	$11,49 \pm 0,8$
PS/PP/SIS 95/5+3	$1,45 \pm 0,06$	2136 ± 146	$42,83 \pm 5,19$	$44,92 \pm 2,0$
PS/PP/SIS 95/5+15	$1,97 \pm 0,09$	1951 ± 136	$39,94 \pm 2,69$	$48,60 \pm 1,3$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Literaturverzeichnis

[1] G. Bargel, H. J. und Schulze. *Werkstoffkunde*. Berling: Springer, 2012.

[2] P. Klason. „Versuch einer Theorie der Trockendestillation von Holz. I.“. *In: Journal für Praktische Chemie*, 90(1), 1914.

[3] R. Elburg und P. Herold. „Versuch einer Theorie der Trockendestillation von Holz. I.“. *In: ARCHAEO – Archäologie in Sachsen*, 7, 2010.

[4] W. Kaiser. *Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung*. München: Carl Hanser, 2006.

[5] O. Krätzlässtin. „Aufstieg und Niedergang des Galaliths“. *In: Chemie in unserer Zeit*, 38, 2010.

[6] G. Menges. *Werkstoffkunde der Kunststoffe*. Berling: De Gruyter, 2011.

[7] A. Lechleitner und D. Schwabl, et al. „Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote“. *In: Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft*, 72(1):47–60, 2020.

[8] H. Domininghaus. *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*. Berling: Springer, 2013.

[9] M. D. Lechner und K. Gehrke, et al. *Ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker*. Berling: Springer, 2010.

[10] E. Oswald, H. J. und Turi. „The deterioration of polypropylene by oxidative degradation“. *In: Polymer Engineering & Science*, 5(3):152–158, 1965.

[11] T. Mariotto. Short term analytical methods for polymer thermal endurance prediction in different environments. Master's thesis, Polytechnikum Mailand, 2019.

[12] P. Gijsman. „Review on the thermo-oxidative degradation of polymers during processing and in service“. *In: e-Polymers*, 8(1), 2008.

[13] W. Weißbach und M. Dahms, et al. *Werkstoffe und ihre Anwendungen*. Berling: Springer, 2018.

[14] K. W. Krebs, C. und Leu. *Langzeitverhalten von Thermoplasten: Alterungsverhalten und Chemikalienbeständigkeit*. München: Carl Hanser, 1999.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[15] F. Vilaplana und A. Ribes-Greus, et al. „Chromatographic pattern in recycled high-impact polystyrene (HIPS)–occurrence of low molecular weight compounds during the life cycle“. *In: Polymer Degradation and Stability*, 95(2):172–186, 2010.

[16] P. Eyerervand und H. Schüle, et al. *Polymer Engineering.* Berling: Springer, 2020.

[17] S. K. Chanda, M. und Roy. *Plastics fabrication and recycling*, volume 76. CRC Press, 2016.

[18] M. Bauer und M. Lehner, et al. „Bestandsaufnahme und mögliche Perspektiven der nass-mechanischen Aufbereitung von Altkunststoffen für das rohstoffliche Recycling“. *In: Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft*, 69(11):446–459, 2017.

[19] M. Lehner und M. Bauer, et al. „Prozesskette zum stofflichen Recycling von Kunststoffabfällen“. *In: BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, 161(6):246–251, 2016.

[20] Synthos. *Datenblatt SYNTHOS PS GP 152, Edition 3*, 2017.

[21] Synthos. *Datenblatt SYNTHOS PS HI 562E, Edition 3*, 2017.

[22] Borealis. *Datenblatt Polypropylene HC600TF, Edition 6*, 2019.

[23] LUCOBIT. *Datenblatt Lucofin 1492M HG*, 2017.

[24] Sigma-Aldrich.(2021, Mai 10). Polystyrol-block-polyisopren-block-polystyrol. [Online]. `https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/432407?lang=de&region=AT`.

[25] SIGMA-ALDRICH. *Datenblatt Polystyrol-block-polyisopren-block-polystyrol*, 2020.

[26] DIN EN ISO 527-2:2012-05, Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO 527-2:2012).

[27] E. Baur und G. Harsch, et al. *Werkstoff-Führer Kunststoffe: Eigenschaften-Prüfungen-Kennwerte.* München: Carl Hanser, 2019.

[28] DIN EN ISO 8256:2005-05, Kunststoffe - Bestimmung der Schlagzugzähigkeit (ISO 8256:2004).

[29] W. Grellmann und S. Seidler, et al. *Kunststoffprüfung.* München: Carl Hanser, 2015.

[30] DIN EN ISO 1133-1:2012-03, Kunststoffe – Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten –Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren (ISO 1133-1:2011).

[31] C. J. Gornik. *Neue Erkenntnisse zur Plastifiziereinheit von Spritzgießmaschinen basierend auf experimentellen Untersuchungen.* PhD thesis, Leoben, 2007.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[32] Material Data Center.(2021, Juni 2). Datenblatt EDISTIR® SR 550. [Online]. https://www.materialdatacenter.com/ms/de/tradenames/Edistir/Versalis+S%252Ep%252EA/EDISTIR%C2%AE+SR+550/27bab99d/1883.

[33] M. Kutz. *Applied plastics engineering handbook: processing and materials.* William Andrew, 2011.

[34] R. B. Prime und J. D. Menczel, et al. *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals und Applications.* Wiley Online Library, 2009.

[35] S. Goodyer.(2021, Mai 25).Measuring Polymers using a Rotational Rheometer in Oscillatory Mode. [Online]. Available: http://www.t-p-a.org/archive/papers/15052013/Measuring_Polymers_using_a_Rotational_Rheometer_in_Oscillatory_Mode.pdf.

[36] R. S. Arisawa, K. und Porter. „The degradation of polystyrene during extrusion“. *In: Journal of Applied Polymer Science*, 14(4):879–896, 1970.

[37] F. Vilaplana und A. Ribes-Greus, et al. „Degradation of recycled high-impact polystyrene. Simulation by reprocessing and thermo-oxidation“. *In: Polymer degradation and stability*, 91(9):2163–2170, 2006.

[38] A. Elloumi und S. Pimbert, et al. „Thermomechanical properties of virgin and recycled polypropylene impact copolymer/CaCO3 nanocomposites“. *In: Polymer Engineering & Science*, 50(10):1904–1913, 2010.

[39] M. Seier. Einfluss verschiedener Blends auf die Langkettenverzweigungen von Polypropylen. Master's thesis, TU Wien, 2019.

[40] F. H. Kamleitner. *Innovative upcycling of polypropylene.* PhD thesis, TU Wien, 2017.

[41] A. B. Nandiyanto und R. Oktiani, et al. „How to read and interpret FTIR spectroscope of organic material“. *In: Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1):97–118, 2019.

[42] R. K. Singh und B. Ruj, et al. „A TG-FTIR investigation on the co-pyrolysis of the waste HDPE, PP, PS and PET under high heating conditions“. *In: Journal of the Energy Institute*, 93(3):1020–1035, 2020.

[43] F. Vilaplana und A. Ribes-Greus, et al. „Degradation of recycled high-impact polystyrene. Simulation by reprocessing and thermo-oxidation“. *In: Polymer degradation and stability*, 91(9):2163–2170, 2006.

[44] S. de Goede und R. Brüll, et al. „Monitoring thermo-oxidative degradation of polypropylene by CRYSTAF and SEC-FTIR“. In *In: Macromolecular Symposia*, volume 193, pages 35–44. Wiley Online Library, 2003.

[45] C. Capone und L. Di Landro, et al. „Thermal and mechanical degradation during polymer extrusion processing“. *In: Polymer Engineering Science*, 47(11):1813–1819, 2007.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[46] V. A. González-González und G. Neira-Velázquez, et al. „Polypropylene chain scissions and molecular weight changes in multiple extrusion“. *In: Polymer degradation and stability*, 60(1):33–42, 1998.

[47] D. Pfefferkorn. *Thermodynamische Eigenschaften von Polymerblends und Blockcopolymeren.* PhD thesis, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2011.

[48] H. I. und M. Nasir Halimatudahliana. „The effect of various compatibilizers on mechanical properties of polystyrene/polypropylene blend“. *In: Polymer Testing*, 21(2):163–170, 2002.

[49] W. Viratyaporn und R. Lehman, et al. „Impact resistance of selected immiscible polymer blends“. In *ANTEC-CONFERENCE PROCEEDINGS*, volume 3, page 1843, 2007.

[50] F. Parres und R. Balart, et al. „Changes in the mechanical and thermal properties of high impact polystyrene (HIPS) in the presence of low polypropylene (PP) contents“. *In: Journal of materials science*, 43(9):3203–3209, 2008.

[51] Z. Horák und V. Fořt, et al. „Compatibilization of high-impact polystyrene/polypropylene blends“. *In: Polymer*, 37(1):65–73, 1996.

[52] J. Pesendorfer. Upcycling von Polystyrol und Polypropylen Joghurtbechern. Master's thesis, TU Wien, 2019.

[53] J. H. Vilckas, und L. G. Albiero, et al. „Study of electrical and mechanical properties of recycled polymer blends“. In *Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2005.(ISEIM 2005).*, volume 3, pages 683–686. IEEE, 2005.

[54] D. Perrin und O. Mantaux, et al. „Influence of impurities on the performances of HIPS recycled from Waste Electric and Electronic Equipment (WEEE)“. *In: Waste Management*, 56:438–445, 2016.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildungsverzeichnis

1.1 Weltweite Kunststoffproduktion in Mio. Tonnen im Zeitraum von 1950 bis 2010 [6] 3
1.2 Schema der Kunststoffarten [4] 5
1.3 links Styrol, rechts Polystyrol [4] 7
1.4 Strukturformel von Propylen [4] 9
1.5 Taktizitäten von PP; links isotaktisch, mittig syndiotaktisch, rechts ataktisch [8] 9
1.6 Verträglichkeitsmatrix gängiger Kunststoffsorten für die Blendbildung [16] . . 11
1.7 Einsatzgebiet der Kunststoffe in Deutschland im Jahr 2019 [6] 12
1.8 Recyclingkreisläufe angefügt an die Produktlebensphasen [4] 14
1.9 Arten von Recycling [4] 14
1.10 Brennwert unterschiedlicher Energieträger in MJ/kg [7] 17
1.11 Phasen der thermischen Verwertung [16] 18
1.12 Kunststoffrecycling in Österreich [19] 19
1.13 Kunststoffrecycling in Europa im Jahr 2018 [7] 20
1.14 Prognose des zukünftigen Weltweiten Kunststoffbedarfs [6] 21

2.1 Versuchsreihe mit den thermisch-oxidativ gealterten Proben 26
2.2 Versuchsreihe der durch Mehrfachextrusion gealterten Proben 26
2.3 Mischungsverhältnisse der Blends in Gramm 27
2.4 Versuchsreihe mit den Kompatibilizer 28
2.5 Mischungsverhältnisse der Blends aus Recyclingmaterial in Gramm 28
2.6 HAAKE Mini Lab II und Mini Jet II 29
2.7 EXTRON EX 18-26-1.5 30
2.8 Schneidmühle Pulverisette 19 30
2.9 Presse Collin P 200 P 31
2.10 Eingestellter Temperatur- und Druckverlauf an der Presse für die Rheologie-probenherstellung 31
2.11 Skizze der Zugprobenform [26] 32
2.12 Spannungs-Dehnungs-Diagramm [27] 33
2.13 Skizze der Schlagzugprobenform [28] 34
2.14 Messkörpersysteme der Scherrheologie [6] 35
2.15 FTIR-Messungsprinzip [29] 37
2.16 (a) Querschnittsansicht der Messmethode [16] (b) Verwendete Vorrichtung zum MFR messen 38
2.17 Umrechnung von MVR-Wert in Komplexe Viskosität und Kreisfrequenz [16] . 39

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

2.18 TGA 2050 39

3.1 Vergleich von a) komplexer Viskosität und b) Schmelzflussrate der Reinmaterialien aus Demonstrationszwecken 42
3.2 Komplexe Viskosität der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 43
3.3 Komplexe Viskosität der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 44
3.4 Komplexe Viskosität der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 45
3.5 Interpretationsschema der Crossover-Punkte [35] 47
3.6 Crossover-Punkte der **PSGP**-Proben, links Ofenalterung, rechts Mehrfachextrusion 48
3.7 Crossover-Punkte der **HIPS**-Proben, links Ofenalterung, rechts Mehrfachextrusion 49
3.8 Crossover-Punkte der **PP2**-Proben, links Ofenalterung, rechts Mehrfachextrusion 49
3.9 Elastizitätsmodule der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 51
3.10 Bruchdehnung der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 52
3.11 Elastizitätsmodule der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 52
3.12 Bruchdehnung der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 53
3.13 Elastizitätsmodule der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 55
3.14 Bruchdehnung der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 56
3.15 Ergebnisse der Schlagzugzähigkeit der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 57
3.16 Ergebnisse der Schlagzugzähigkeit der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 58
3.17 Ergebnisse der Schlagzugzähigkeit der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 59
3.18 FTIR-Spektrum der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 60
3.19 FTIR-Spektrum der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 61
3.20 FTIR-Spektrum der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 62
3.21 MFR der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden 63

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.22 MFR der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden . . . 64
3.23 MFR der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden . . . 65
3.24 TGA der **PSGP**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden . . . 66
3.25 TGA der **HIPS**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden . . . 67
3.26 TGA der **PP2**-Proben, welche mit a) Ofenalterung und b) Mehrfachextrusion gealtert wurden . . . 68
3.27 a) Komplexe Viskosität und b) MFR der reinen Blends . . . 69
3.28 a) Komplexe Viskosität und b) MFR der PSGP-Blends bei 200 °C . . . 70
3.29 a) Komplexe Viskosität und b) MFR der HIPS-Blends bei 200 °C . . . 70
3.30 Zugversuch der Reinmaterialien und der Blends ohne Kompatibilisierungsmittel 72
3.31 Zugversuch der Blends mit PSGP als Hauptbestandteil und Kompatibilizer . . 73
3.32 Zugversuch der Blends mit HIPS als Hauptbestandteil mit Kompatibilizer . . . 74
3.33 Schlagzugversuch der Reinmaterialien und Blends ohne Kompatibilisierungsmittel 75
3.34 Schlagzugversuch der Blends mit mehrheitlichen PSGP-Anteil und Kompatibilisierungsmittel . . . 75
3.35 Schlagzugversuch der Blends mit mehrheitlichen HIPS-Anteil und Kompatibilisierungsmittel . . . 76
3.36 Vergleich von a) komplexer Viskosität und b) Schmelzflussrate der Versuche der Blends mit erhöhtem SIS-Anteil . . . 77
3.37 a) E-Modul und b) Bruchdehnung der Blends mit erhöhtem SIS-Anteil 78
3.38 Schlagzugversuch der Blends mit erhöhtem SIS-Anteil . . . 79
3.39 Vergleich von a) Komplexer Viskosität und b) Schmelzflussrate der Versuche aus recyceltem Material . . . 80
3.40 a) E-Modul und b) Bruchdehnung der Versuche mit recyceltem Material . . . 81
3.41 Schlagzugversuch der recycelten Proben . . . 82

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tabellenverzeichnis

1.1 Anteil der Kunststoffsorten nach Gewicht im Haushaltsmüll [17] 12
1.2 Übersicht der technisch relevanten Solvolytischen Verfahren [4] 17

2.1 Abkürzungen für die Kunststoffnamen 22
2.2 Herstellerangeben zu PSGP [20] 23
2.3 Herstellerangeben zu HIPS [21] 23
2.4 Herstellerangeben zu PP2 [22] 23
2.5 Abkürzungen für die Kompatibilisierungsmittel 24
2.6 Herstellerangeben zu LUCO [23] 24
2.7 Herstellerangeben zu SIS [25] 25
2.8 Prozessparameter beim Spritzgießen 29
2.9 Prozessparameter der Mehrfachextrusion 30
2.10 Prozessparameter der Presse 31
2.11 Maße der verwendeten Zugprobe in mm [26] 32
2.12 Maße der verwendeten Schlagzugprobe in mm [28] 35
2.13 Verwendete Dichte für die Berechnung [33] 39

3.1 Umrechnungsergebnisse der MFR-Werte für die Reinmaterialien 42
3.2 Umrechnungsergebnisse der MFR-Werte aus Unterabschnitt 3.1.7 für PSGP . 44
3.3 Umrechnungsergebnisse der MFR-Werte aus Unterabschnitt 3.1.7 für HIPS . . 44
3.4 Umrechnungsergebnisse der MFR-Werte aus Unterabschnitt 3.1.7 für PP2 . . . 45
3.5 Änderung der komplexen Viskosität bei 0.001 1/s 46
3.6 Umrechnung der MFR-Werte in komplexe Viskosität und Scherrate 71
3.7 Umrechnungsergebnisse der MFR-Werte der Proben mit erhöhtem SIS-Anteil . 77
3.8 Umrechnungsergebnisse für die MFR-Werte der Proben aus recyceltem Material 80

A.1 Übersicht Messergebnisse 89
A.2 Übersicht Messergebnisse Blendversuche, Versuche mit erhöhter SIS-Anteil und Versuch mit recyceltem Material 90

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub