



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria



Diplomarbeit

Rezyklierbarkeit verschieden kategorisierter Polypropylen Becher Fraktionen in Anbetracht der Dekorationsvariante

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

Johannes BERGER, BSc

Matr.-Nr.: 01604702

Unter der Leitung von

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

Und mitbetreut von

Univ.Ass.in Dipl.-Ing. Jessica Schlossnikl, BSc

Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie

E308-02-1 - Forschungsgruppe Strukturpolymere

Wien, Mai 2023

Eidesstaatliche Erklärung

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

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

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Stadt und Datum

Unterschrift

Danksagung

Großer Dank gilt Frau Prof. Archodoulaki, für die Möglichkeit meine Masterarbeit an ihrem Institut zu schreiben. Ich habe die Zeit in der ich mich mit diesem spannenden, und vor allem auch zukunftssträchtigen, Thema beschäftigen durfte sehr genossen.

Außerdem möchte ich mich bei Jakob Lederer, Lea Gritsch und allen weiteren Mitarbeiter_innen des Christian Doppler Labors für Design und Bewertung einer effizienten, recyclingbasierten Kreislaufwirtschaft für das Sortieren und zur Verfügung stellen der verwendeten Materialien im Sinne der Kreislaufwirtschaft bedanken.

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei Jessica Schlossnikl, sowohl für die Unterstützung ab dem ersten Tag im Labor, als auch für die durchwegs großartige Betreuung über die ganze Zeit meiner Materarbeit.

Dank gilt auch Frau Dr. Hartl für die Unterstützung beim Erstellen der Umfrage.

Des weiteren möchte ich mich bei meiner Freundin Johanna dafür bedanken, dass sie mir während dieser Zeit immer zur Seite stand.

Zu guter Letzt gilt großer Danke meinen Eltern, dafür dass sie mich immer unterstützt haben und ich ohne Druck meine akademische Karriere beschreiten durfte.

Inhalt

1.	Einleitung.....	1
2.	Theoretische Grundlagen.....	3
2.1	Kunststoffe.....	3
2.2	Thermoplaste.....	3
2.3	Polypropylen.....	5
2.3.1	Anwendungen von Polypropylen.....	6
2.4	Extrusion.....	7
2.5	Formgebung.....	8
2.6	Kreislaufwirtschaft.....	10
2.6.1	Design for Recycling.....	11
2.7	Recycling.....	11
2.7.1	Recycling von Thermoplasten.....	14
2.7.2	Recyclingcodes.....	14
2.8	Abfallkategorien.....	14
2.9	Umfragen.....	15
3.	Werkstoffe.....	17
3.1	Kategorien.....	17
3.2	Post-Consumer Materialien.....	17
3.2.1	1. Charge.....	18
3.2.2	2. Charge.....	19
3.2.3	Zusammenfassung beider Chargen.....	19
4.	Methoden.....	21
4.1	Verarbeitung der Materialien.....	21
4.1.1	Herstellung Flakes.....	21
4.1.2	Herstellung Mahlgut.....	21
4.1.3	Herstellung Prüfkörper.....	21

4.2	Rheologie	24
4.2.1	Frequency Sweep	24
4.2.2	Melt Flow Rate	26
4.3	Mechanische Prüfung	27
4.3.1	Zugversuch.....	28
4.3.2	Schlagzugversuch	29
4.4	Thermoanalytische Prüfung	30
4.4.1	DSC.....	30
4.5	Umfrage.....	31
4.5.1	Vorgangsweise.....	32
4.5.2	Pre Test	32
4.5.3	Durchführung.....	33
5.	Ergebnisse	34
5.1	Rheologie	34
5.1.1	Frequency Sweep	34
5.1.2	Melt-Flow-Rate.....	39
5.2	Mechanische Prüfung.....	42
5.2.1	Zugversuch.....	42
5.2.2	Schlagzugversuch	49
5.3	Thermoanalytische Prüfung	52
5.3.1	DSC.....	52
5.4	Umfrage.....	53
6.	Zusammenfassung.....	56
7.	Ausblick und Fazit	60
	Abkürzungsverzeichnis.....	61
	Abbildungsverzeichnis.....	63
	Literatur.....	66

Anhang V

Umfrage XII

Abstract

The increasing demand for plastics combined with the ever-increasing scarcity of raw materials and a growing awareness in society for sustainability mean that recycling is becoming an even more important topic. A fundamental step for functioning recycling is an appropriate sorting of plastics. Currently, plastics are only sorted by type. This work deals with polypropylene and the different decoration variants of polypropylene cups to find out, if the decoration affects the quality of the recycled material.

For this purpose, in the course of this work, post-consumer material was sorted and recycled into different fractions according to the type of decoration, namely Direct Print, Cardboard-Plastic-Combination, Plastic-Sleeve, In-Mold and Unprinted. A further distinction was made according to the type of disposal, in residual waste or in light packaging. The different fractions were tested mechanically, rheologically and thermally. Neither the type of disposal nor the decoration variant has a significant effect on the quality of the material properties of the recycle. The only exception here is the In-Mold material, as this is pure injection molding material. Therefore, different material properties are wanted for the virgin material. In the case of the other fractions, the differences in quality can also largely be explained by the proportion of injection molded material. Based on the results of these initial tests, the focus in the second part of the work was placed on the type of molding of the cups, namely injection molded or thermoformed. The results of the tests carried out in this part of the work confirmed the assumptions made in the previous section, as the injection-molded fractions gave significantly different results than the thermoformed fractions in both the mechanical and rheological tests.

To investigate whether a more precise separation of plastic waste in Austria would be possible, a survey was conducted at the Vienna University of Technology. The results suggest that, with the necessary sensitization, there is potential to separate plastics not only from the rest of the waste, but also from each other. Although there are limitations which demand further research.

Kurzfassung

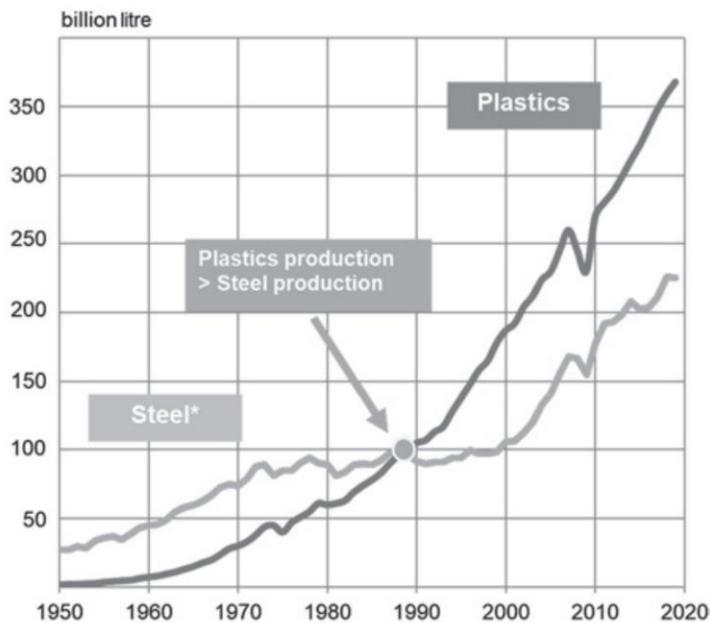
Der steigende Bedarf an Kunststoffen verbunden mit der immer größer werdenden Rohstoffknappheit und einem steigenden Bewusstsein in der Gesellschaft für Nachhaltigkeit führen dazu, dass Recycling zu einem immer wichtigeren Thema wird. Ein grundlegender Schritt für funktionierendes Recycling ist eine zweckmäßige Sortierung der Kunststoffe. Derzeit werden die Kunststoffe nur nach Art sortiert. Diese Arbeit beschäftigt sich mit Polypropylen und den verschiedenen Dekorationsvarianten der Polypropylenbecher, um herauszufinden, ob sich die Dekoration auf die Qualität des Rezyklats auswirkt.

Dafür wurde im Zuge dieser Arbeit Post-Consumer Material nach Art der Dekoration in verschiedene Fraktionen, nämlich Direktdruck, Karton-Kunststoff-Kombination, Kunststoff-Sleeve, In-Mold und Unbedruckt sortiert und recycelt. Eine weitere Unterscheidung wurde nach Art der Entsorgung, also im Restmüll oder in den Leichtverpackungen getroffen. Die verschiedenen Fraktionen wurden mechanisch, rheologisch und thermisch getestet. Weder die Art der Entsorgung, noch die Dekorationsvariante wirkt sich signifikant auf die werkstoffliche Qualität des Rezyklats aus. Einzige Ausnahme hierbei ist das In-Mold Material, da es sich dabei um reines Spritzgussmaterial handelt. Daher sind unterschiedliche Materialeigenschaften bei der Neuware gewünscht. Bei den anderen Fraktionen können die Qualitätsunterschiede Großteils durch den Anteil an Spritzgussmaterial erklärt werden. Aufgrund der Ergebnisse dieser ersten Tests wurde im zweiten Teil der Arbeit der Fokus auf die Art der Formgebung der Becher, also spritzgegossen oder tiefgezogen, gelegt. Die Ergebnisse der in diesem Teil der Arbeit durchgeführten Tests bestätigten die bereits getroffenen Annahmen, da die spritzgegossenen Fraktionen sowohl in den mechanischen-, als auch in den rheologischen Tests grundlegend verschiedene Ergebnisse lieferten im Vergleich zu den tiefgezogenen Fraktionen.

Um zu untersuchen, ob eine genauere Trennung der Kunststoffabfälle in Österreich möglich wäre, wurde eine Umfrage an der TU-Wien durchgeführt. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass mit der nötigen Sensibilisierung durchaus Potential gegeben wäre die Kunststoffe nicht nur von den restlichen Abfällen, sondern auch untereinander zu trennen. Allerdings unterliegt diese Umfrage noch einigen Limitierungen, die es näher zu erforschen gilt.

1. Einleitung

Stähle und Kunststoffe sind die zwei dominierenden Werkstoffarten weltweit. Bezogen auf das Volumen machen die Kunststoffe sogar den größten Anteil der erzeugten Werkstoffe aus [1]. Laut [2] hat die Kunststoffproduktion die Stahlproduktion nach Volumen im Jahr 1989 überholt, wie in Abbildung 1 zu sehen ist.



- Plastics production by volume surpassed steel production in 1989

Global Production 2019 :

- Plastics:
368 Mio. t =
368 billion litre
- Steel:
1804 Mio.t =
226 billion litre
- Calculation Model:
1 kg plastics = 1 litre
8 kg steel = 1 litre

Abbildung 1: Kunststoff und Stahlproduktion in Volumen [2]

Im Jahr 2015 wurden weltweit etwa 320 Mio. Tonnen Kunststoffe produziert. Der Großteil davon, ungefähr 40% wurden für Verpackungen eingesetzt [3]. Kunststoffe eignen sich vor allem deshalb ausgezeichnet als Verpackung, da sie besonders leicht sind. Bei der Verpackung eines Joghurts beträgt der Gewichtsanteil einer Glasverpackung 36%, während ein Kunststoffbecher nur 4% des Gewichts ausmacht. Außerdem ist der Energiebedarf bei der Herstellung von Kunststoffen relativ gering im Vergleich mit z. B. Aluminium [4]. Dennoch zeigen die oben genannten Zahlen, wie wichtig das Thema Recycling bei Kunststoffen ist. In Deutschland wurden im Jahr 2009 10,73 Mio. Tonnen Kunststoffe verarbeitet. Mit 1,93 Mio. Tonnen macht Polypropylen dabei einen wesentlichen Teil aus. Beispiele für Anwendungen von Polypropylen sind dünnwandige Verpackungen (z. B. Joghurtbecher), Flaschen für Reinigungsmittel oder Gehäuse von Haushaltsgeräten [5]. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Anwendung als dünnwandige Verpackung, genauer als Becher.

Einleitung

Ziel der Arbeit ist es zu untersuchen ob die unterschiedlichen Arten der Dekorationen von Polypropylenbechern Einfluss auf die Qualität des daraus hergestellten Rezyklats haben. Um die Qualität des Rezyklats zu testen wurden sowohl rheologische, als auch mechanische und thermische Prüfverfahren durchgeführt.

2. Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die, für das Verständnis der Arbeit relevanten, theoretischen Grundlagen erarbeitet.

2.1 Kunststoffe

Vor allem aufgrund ihrer vielseitigen Verarbeitungs-, Bearbeitungs- und Anwendungsmöglichkeiten haben Kunststoffe immer mehr an Bedeutung gewonnen. Der Begriff „Kunststoff“ hat seinen Ursprung in der Tatsache, dass ein Stoff mit neuen, andersartigen Eigenschaften aus geeigneten Grundsubstanzen hergestellt wird. Die Herstellung von Kunststoffen, auch Polymere genannt, kann über Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition erfolgen. Aufgrund ihres molekularen Aufbaus und dem daraus resultierenden Verhalten können Kunststoffe nach „DIN 7724: Polymere Werkstoffe; Gruppierung polymerer Werkstoffe aufgrund ihres mechanischen Verhaltens“ eingeteilt werden. Diese Einteilung, und die dazugehörigen Eigenschaften, sind in Tabelle 1 dargestellt. Die für diese Arbeit relevante Kategorie sind die Thermoplaste, welche unter Erwärmung schmelzbar und plastisch formbar sind. Sie sind unvernetzte Kunststoffe und verhalten sich bei Gebrauchstemperaturen in der Regel energie-elastisch [6]. Beispiele für Thermoplaste sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) oder Polyvinylchlorid (PVC) [7].

Tabelle 1: Einteilung der Kunststoffe [6]

Thermoplaste	Thermoplastische Elastomere	Elastomere	Duroplaste
unvernetzt	schwach vernetzt		stark vernetzt
linear bis verzweigt	physikalisch vernetzt	chemisch vernetzt	
schmelzbar löslich	schmelzbar löslich	nicht schmelzbar nicht löslich quellbar	nicht schmelzbar nicht löslich nicht quellbar
plastisch formbar i. Allg. großer <i>E</i> -Modul recyclierbar	gummielastisch kleiner <i>E</i> -Modul recyclierbar	gummielastisch kleiner <i>E</i> -Modul	nicht plastisch formbar großer <i>E</i> -Modul

2.2 Thermoplaste

Ähnlich wie bei metallischen Werkstoffen hat die Struktur bzw. das Gefüge des Materials auch bei Kunststoffen großen Einfluss auf die Verhaltensweisen und Eigenschaften. Somit ist die Form des Aufbaus maßgeblich für das mechanisch-thermische Verhalten und auch für die mechanischen Eigenschaften, wie Festigkeit, Steifigkeit, etc. verantwortlich. Bei den für diese Arbeit relevanten Thermoplasten wird der Zusammenhalt der kettenförmigen Makromoleküle

Theoretische Grundlagen

vor allem durch die Nebervalenzkräfte bestimmt. Die Makromoleküle sind wie in Tabelle 1 erwähnt linear oder verzweigt und sind unvernetzt. Werden die Nebervalenzbindungen durch äußere Kräfteinflüsse verringert oder überwunden, kann die molekulare Struktur aufgelockert werden. Bisher verknäuelte Moleküle werden gestreckt, oder Moleküle gleiten sogar voneinander ab. Vereinfacht wird das durch die erhöhte Beweglichkeit der Makromoleküle bei Wärmezufuhr, wodurch das Material erweicht und Formänderungen ermöglicht werden. Dadurch besitzen Thermoplaste in der Regel eine geringere Härte und Festigkeit als Duroplaste. Im Gegensatz zu den Duroplasten ist die Festigkeit bei den Thermoplasten von der Temperatur abhängig. Können sich die Ketten eines Thermoplasten frei bewegen, nehmen sie einen Zustand völliger Unordnung an. Dies ist allerdings nur bei hoher Temperatur oder im gelösten Zustand möglich. Bei Erstarrung von Thermoplasten wird zwischen amorpher und teilkristalliner Erstarrung unterschieden. Amorphe Thermoplasten besitzen eine regellose, knäuelartige Wattlebauschstruktur, die in Abbildung 2 zu sehen ist. Bei Belastung verhalten sie sich, abhängig von der Verknäuelung, bis zu einem gewissen Grad elastisch. Das heißt, die Makromoleküle werden verzerrt und verstreckt, bis die Formänderung aufgrund der Verhakungen und Verschlaufungen nicht mehr möglich ist. Bei Entlastung wird die Verformung nach einer gewissen Zeit wieder größtenteils rückgestellt. Dieser regellose Aufbau kann aber dahingehend verändert werden, dass bestimmte Ausrichtungen der Moleküle bevorzugt werden. Dadurch ergeben sich anisotrope Eigenschaften, da z. B. E-Modul und Festigkeit in Richtung eben dieser Orientierungen höher sind [6].

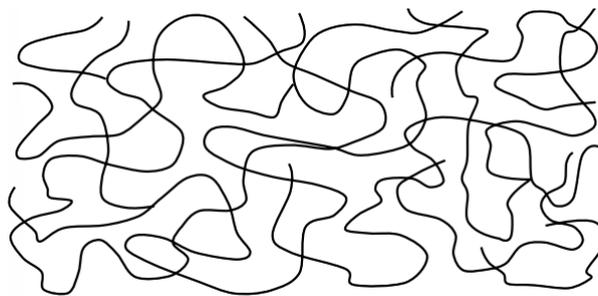


Abbildung 2: Wattlebauschstruktur eines amorphen Thermoplasten [6]

Handelt es sich um einen teilkristallinen Thermoplasten, so sind die Makromoleküle in den kristallinen Bereichen gebündelt oder gefaltet, während immer noch amorphe Bereiche vorhanden sind. Oft bilden sich auch Lamellenpakete, die sich zu Sphärolithen anordnen. Diese verschiedenen Strukturen sind in Abbildung 3 dargestellt. Durch die amorphen Bereiche wird immer noch eine gewisse Bewegungsmöglichkeit gewährleistet. Dadurch verhalten sich teilkristalline Thermoplaste zäh-elastisch und sehr widerstandsfähig gegen mechanische

Belastung. Umso höher der Kristallisationsgrad, umso höher sind auch Härte, Festigkeit und Steifigkeit des Materials [6].

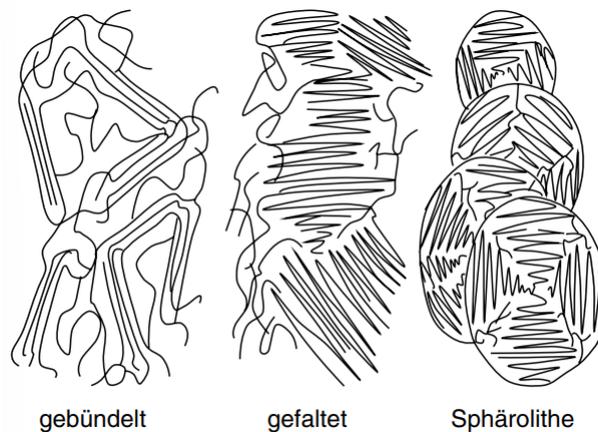


Abbildung 3: Struktur teilkristalliner Thermoplaste [6]

Die vorhandenen kristallinen Bereiche verschieben außerdem den Erweichungsbeginn zu höheren Temperaturbereichen, führen also zu höherer Formbeständigkeit bei Wärme. Die Obergrenze der Dauergebrauchstemperatur liegt in der Regel zwischen 90°C und 150°C. Der kristalline Anteil ist nicht nur von der chemischen Struktur, sondern vor allem auch von der Abkühlgeschwindigkeit aus der Schmelze abhängig. Je schneller das Material abkühlt, desto geringer sind die kristallinen Anteile. Abgesehen von den mechanischen Eigenschaften ändert sich durch den kristallinen Anteil auch das Aussehen der Thermoplaste. Sofern keine Zusatzstoffe beigemischt sind, sind amorphe Thermoplaste transparent, während teilkristalline Thermoplaste meist weiß oder opak sind [6].

2.3 Polypropylen

Polypropylen, oder auch PP, fällt in die Kategorie der Thermoplaste. Genauer gesagt handelt es sich bei PP um einen teilkristallinen Thermoplasten, der durch Polymerisation von Propylen hergestellt wird [8]. Während der Polymerisation werden niedrigmolekulare Verbindungen zu Makromolekülen verkettet. Der chemische Aufbau von monomerem Propylen sowie PP ist in der Abbildung 4 bzw. Abbildung 5 zu sehen.

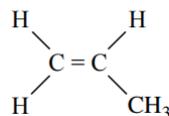


Abbildung 4: chemischer Aufbau Propylen [6]

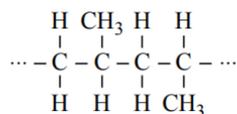


Abbildung 5: chemischer Aufbau PP [6]

Die Kettenlänge, welche vom Polymerisationsgrad abhängt, bestimmt später sowohl die Verarbeitungseigenschaften, als auch die mechanischen Eigenschaften. Obwohl PP mit einer Dichte von 0,9 g/cm³ einer der leichtesten Kunststoffe ist, besitzt es eine hohe Festigkeit und Steifigkeit. Bei Temperaturen unter 0 Grad Celsius neigt PP allerdings zum Verspröden. Die weiteren Eigenschaften von PP, im Vergleich zu PE, sind in Tabelle 2 ersichtlich. Aufgrund der durchwegs höheren Werte eignet sich PP für Anwendungen, die höheren Beanspruchungen genügen müssen [4, 6, 9].

Tabelle 2: Eigenschaften von Polyethylen und Polypropylen [6]

Eigenschaften		PE-LD	PE-HD	PP
Elastizitätsmodul	MPa	150 bis 300	600 bis 1.000	1.100 bis 1.300
Streckspannung	MPa	8 bis 10	20 bis 30	32 bis 37
Dehnung bei Streckspannung	%	20	12 bis 15	12 bis 16
Reißdehnung	%	>400	>500	600
Vicat-Erweichungstemperatur (VST)	°C	<40	60 bis 65	90 bis 100
Kristallitschmelzbereich	°C	105 bis 110	130 bis 135	155 bis 165
Spez. Durchgangswiderstand	Ωcm		10 ¹⁶	
Dielektrizitätszahl	–		2,3	
Dielektrischer Verlustfaktor	–		0,0002 bis 0,0007	
Durchschlagfestigkeit	kV/mm	110	150	100

2.3.1 Anwendungen von Polypropylen

Aufgrund der bereits erwähnten Eigenschaften und vielseitigen Anwendbarkeit ist PP wirtschaftlich sehr interessant. Es wird neben der Anwendung als starre Verpackung häufig auch als Folie verwendet. Typisch ist auch die Anwendung als Spritzgussteil in Autos, Haushaltsgeräten oder in der Elektrotechnik [4, 9]. Wichtig für die spätere Anwendung sind auch die Verarbeitungseigenschaften. Diese hängen, wie bereits erwähnt, unter anderem auch von der Kettenlänge ab. Genauer gesagt vom Molekulargewicht und von der Molekulargewichtsverteilung. Das Molekulargewicht beschreibt die Länge eines Moleküls, während die Molekulargewichtsverteilung die Einheitlichkeit der Länge der Moleküle beschreibt. Bei einer engen Molekulargewichtsverteilung sind alle Makromoleküle weitgehend gleich lang. Ist die Molekulargewichtsverteilung breit, dann kommen kurze und lange Ketten vor. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass Kunststoffe mit kürzeren Ketten sich eher für Spritzgießanwendungen eignen, da die Schmelze leichter fließt als bei längeren Ketten.

Längere Ketten hingegen führen zu einer höheren Schmelzfestigkeit, die vor allem bei Extrusions- und Umformvorgängen wichtig ist, da hier die Schmelze zum Teil ohne Stabilisierung die Form halten muss. Meist hat PP nicht nur gleichlange Makromoleküle, also eine breite Molekulargewichtsverteilung, was zu besseren Fließeigenschaften führt [10]. Neben der Molekülmasse und der Molekülmassenverteilung bestimmen auch weitere Faktoren wie z. B. Additive, Füllstoffe, Kristallinität und Verarbeitungsprozesse die späteren Eigenschaften des Polypropylenproduktes. Um möglichst gute Spritzgusseigenschaften und damit schnelle Zykluszeiten zu erreichen, wird oft PP mit besonders niedriger Viskosität eingesetzt. Dafür werden die Polymerketten durch Zugabe von Peroxiden bewusst gekürzt. Als Ergebnis erhält man CR-PP (controlled rheology). Diese Sorten von PP werden vor allem für dünnwandige Spritzgussteile eingesetzt, z. B. für dünnwandige Becher im Verpackungsbereich. Umgekehrt können aber auch Langkettenverzweigungen in das PP eingebaut werden um Schmelzsteifigkeit und Reißfestigkeit zu erhöhen [4].

2.4 Extrusion

Das Extrudieren wird häufig auch als Schnecken(-strang)pressen bezeichnet. Grundsätzlich wird dem Extruder ein Polymer in Form von Pulver, Granulat oder Gries zugeführt. Durch einen Plastifizierungs- oder Sinterprozess und anschließenden Konturwerkzeugen stößt der Extruder das Polymer kontinuierlich als Halbzeug aus. Im Extruder wird der Werkstoff entweder durch drehende oder kolbenartige Fördersysteme in Richtung Konturwerkzeug befördert. Neben dem Fördersystem besteht ein Extruder aus einem Metallzylinder, welcher regelbar beheizt werden kann. Meist können dabei verschiedene Heizzonen separat voneinander in der Temperatur geregelt werden. Im Zylinder befindet sich eine drehende Förderschnecke, die das Material in Richtung Konturwerkzeug befördert. Abbildung 6 zeigt die schematische Darstellung eines Extruders mit verschiedenen Funktionszonen. In der Einzugszone wird Material aufgenommen, verdichtet und vorgewärmt. In der Umwandlungszone liegt der Kunststoff in allen Zuständen zwischen Rohzustand und Schmelze vor. Das Material wird hier noch weiter verdichtet und aufgeschmolzen. Abschließend wird die Schmelze dann in der Ausstoßzone homogenisiert und unter geeignetem Druck in einem gleichmäßigen Fluss dem Konturwerkzeug zugeführt [7].

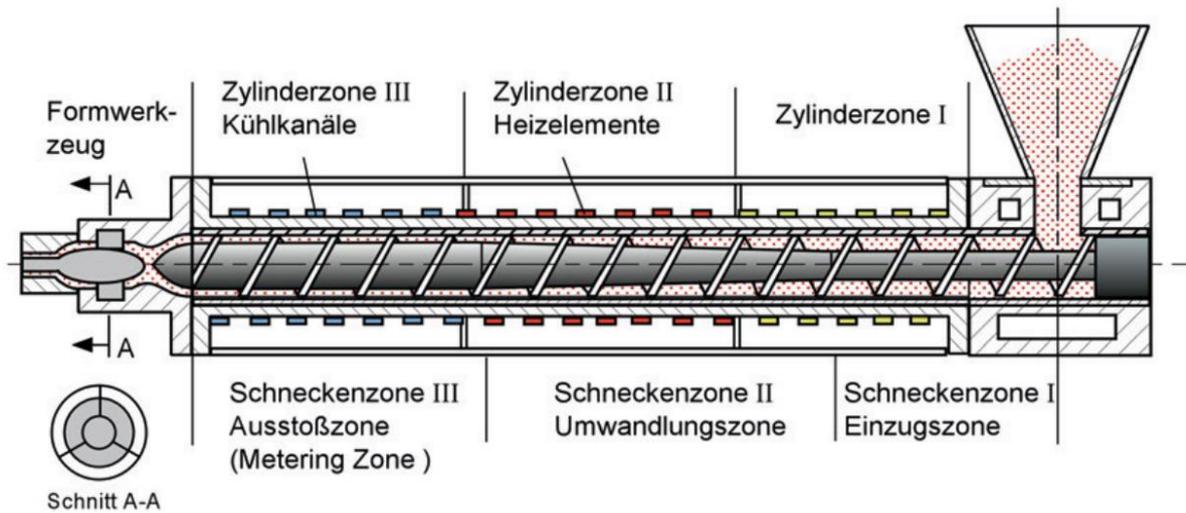


Abbildung 6: Extruder mit verschiedenen Funktionszonen [7]

2.5 Formgebung

Die Verarbeitung oder Formgebung erzeugt aus den Rohstoffen der Kunststoffherzeugung Werkstücke oder teilweise sogar ganze Produkte. Dafür werden in der Regel erhöhter Druck und Wärmezufuhr benötigt. Grundsätzlich wird zwischen Urformen, Umformen und Spanen unterschieden. Während beim Urformen meist aus Granulat ein Halbzeug oder Produkt hergestellt wird, wird beim Umformen aus einem Halbzeug ein fertiges Produkt erzeugt. Beim Spanen wird im Gegensatz zu den anderen beiden Verfahren Material von einem Rohling abgetragen, bis die gewünschte Form erreicht ist [7].

Für die Anwendung als Becher sind vor allem zwei Formgebungsverfahren relevant: Spritzgießen (Urformen) und Tiefziehen (Umformen).

Beim Spritzgießen wird Kunststoffgranulat in einer sich drehenden Schnecke durch Friktion, Dissipation, sowie Wärmezufuhr über einen äußeren Zylinder erhitzt. Ist ausreichend Material zugeführt und das Werkzeug geschlossen, erzeugt die, sich nicht mehr drehende, Schnecke einen axialen Vorschub, der die Schmelze in die Form drückt. Um mögliche Materialschwindung auszugleichen, wird zusätzlich Masse über den Anguss nachgedrückt. Die schematische Darstellung einer Spritzgussmaschine ist in Abbildung 7 zu sehen [7].

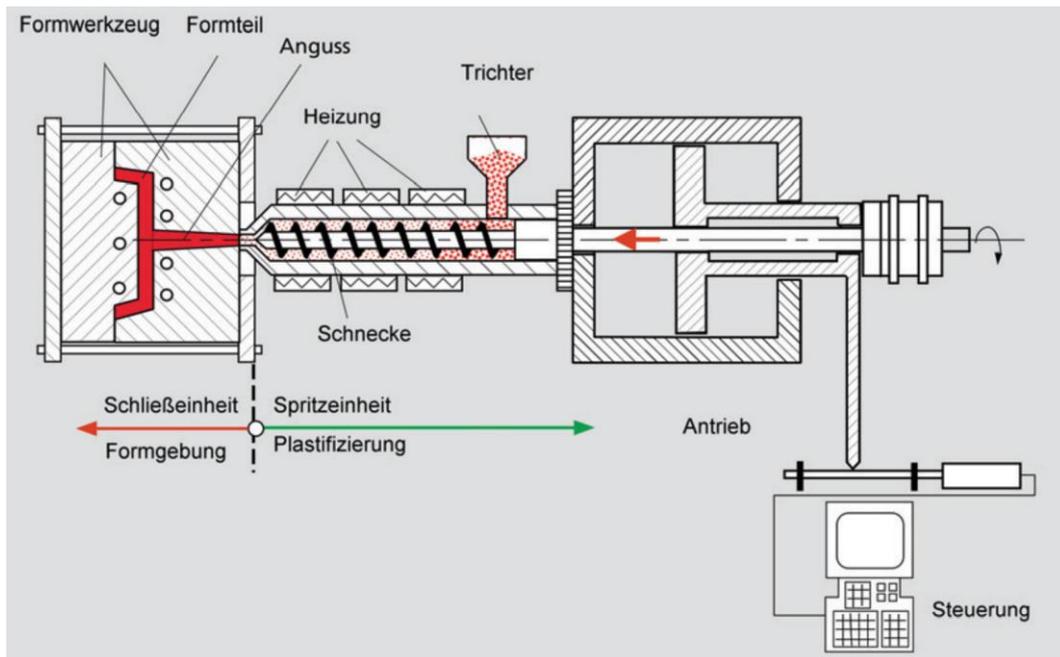


Abbildung 7: Schematische Darstellung einer Spritzgussmaschine [7]

Beim Tiefziehen, oder auch Thermoformen, von Bechern wird zuerst eine thermoplastische Folie (Halbzeug) erwärmt. Ist die gewünschte, stark vom Material abhängige, Temperatur erreicht erfolgt in der Regel eine Druck- oder Vakuumbauchschlagung der zu umformenden Fläche. Dabei wird die Folie mittels geringen Kraftaufwands durch Dehnung verformt. Bei Berührung mit der gekühlten Form erstarrt das Material. Wie diese Prozessschritte aussehen können ist in Abbildung 8 schematisch dargestellt [7].

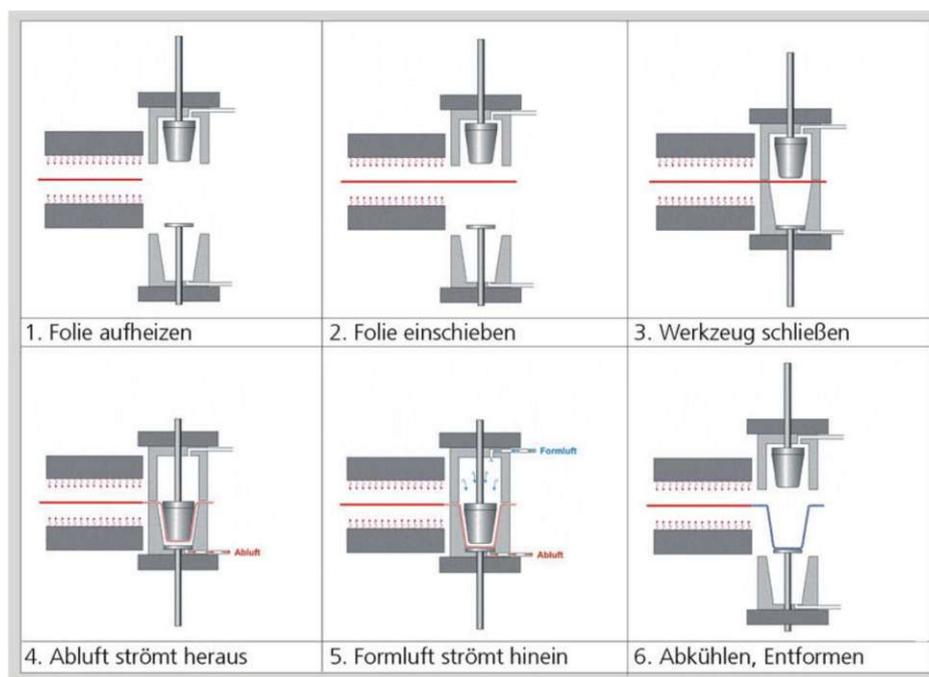


Abbildung 8: Stempelunterstütztes Tiefziehen eines Bechers [7]

2.6 Kreislaufwirtschaft

Die klassische Wirtschaft folgt derzeit einem linearen Prinzip, wonach Produkte produziert, genutzt und anschließend entsorgt werden. Dabei werden für die Produktion hauptsächlich Primärmaterialien herangezogen. Dies hat gravierende Auswirkungen auf die Umwelt, Gesellschaft, und auch auf die geopolitische Lage, da die Verknappung von Rohstoffen zu Spannungen führt. Dieses Wirtschaftsmodell führt dazu, dass Produkte oft schon in der Designphase dazu konzipiert werden kurze Lebenszyklen zu haben. Um diesen Entwicklungen entgegenzuwirken, versuchen Politik und Unternehmen Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch voneinander zu entkoppeln. Dies soll mit Hilfe der Kreislaufwirtschaft gelingen. Dadurch soll die Wirtschaft weiterwachsen, während weniger Ressourcen verbraucht werden und Abfälle minimiert werden sollen. Das Modell der Kreislaufwirtschaft, oder auch Circular Economy, basiert auf den R-Innovationen: Reuse (Wieder- bzw. Weiterverwendung), Repair (Reparatur), Refurbish (Aufarbeitung) und Recycling. In Abbildung 9 ist das Prinzip der Kreislaufwirtschaft grafisch dargestellt. Grundsätzlich ist Recycling als letzter Weg anzusehen, da bei den anderen drei Optionen die in den Gütern enthaltenen grauen Ressourcen, wie Material, Energie oder Wasser größtenteils erhalten bleiben [11].

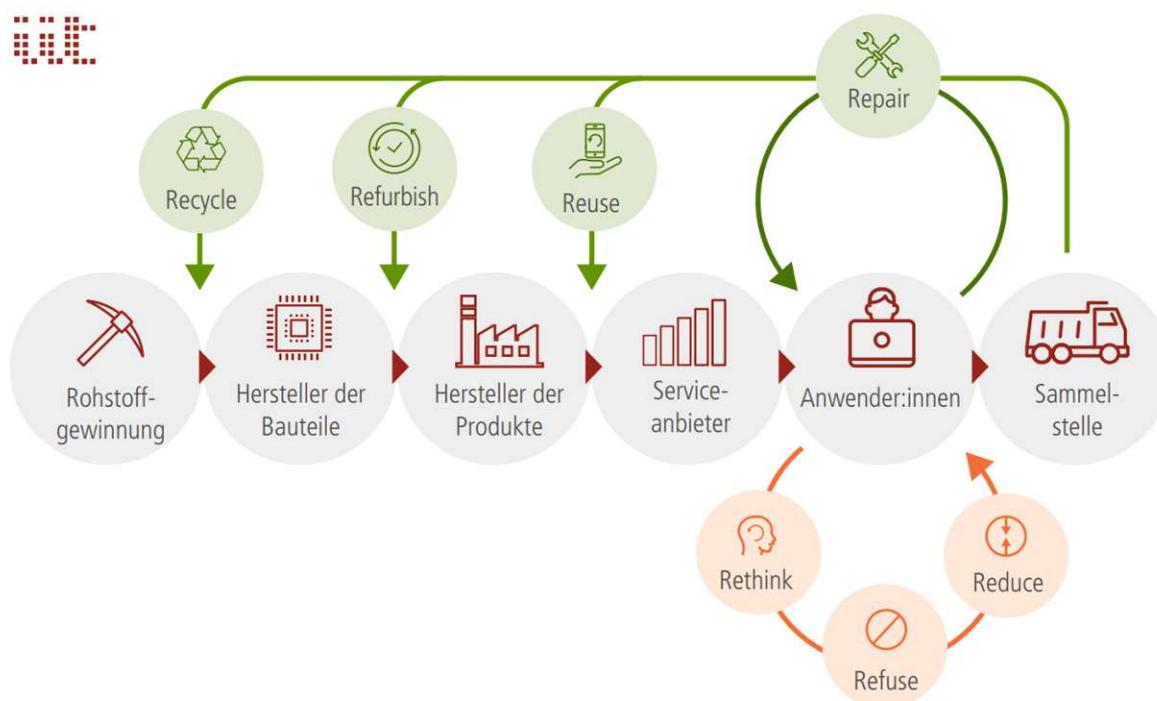


Abbildung 9: Prinzip der Kreislaufwirtschaft [11]

2.6.1 Design for Recycling

Bei diesem aus dem Englischen übernommenen Begriff, handelt es sich um ein Prinzip, wonach schon in einer frühen Entwicklungsphase eines Produkts oder einer Verpackung hohe Rezyklierbarkeit als Ziel definiert wird. Es ist allerdings zu erwähnen, dass das Rezyklat in werkstofftypischen Anwendungen wiederverwertet werden muss, um als rezyklierbar zu gelten. Ist eine Kunststoffverpackung später nur noch als Ersatz für Holz oder Beton verwendbar, gilt das Material als nicht recyclingfähig. Dies folgt aus der Definition für Rezyklierbarkeit von Verpackungen [12]:

„Recyclingfähigkeit ist die grundsätzliche und graduelle Eignung einer Verpackung, nach Durchlaufen industriell verfügbarer Rückgewinnungsprozesse Neuware in werkstofftypischen Anwendungen zu substituieren“ (ZSVR 2021) [12]

Design for Recycling ist ein wichtiger Baustein um die Menge und auch die Qualität des vorhandenen Rezyklats in Zukunft zu erhöhen. Um das zu erreichen gibt es mittlerweile einige Design for Recycling Leitfäden, wie beispielsweise den von Recyclclass [13]. Hier wird ein Ampelsystem verwendet, um zu zeigen was im Hinblick auf Rezyklierbarkeit bei bestimmten Verpackungsgruppen verwendet werden soll und was nicht. Neben Design for Recycling werden auch oft drei weitere Begriffe verwendet, die allerdings alle über das Design for Recycling hinausgehen. Einerseits Design for Sustainability, das die ökonomischen, ökologischen und sozial-ethischen Aspekte eines Produktes betrifft. Weiters, Design for Circularity, das einen grundlegenden Wandel in der Entwicklungsphase beschreibt, auch mit Blick auf eine Verlängerung der Lebensdauer eines Produktes. Und andererseits Eco-Design, das sich auf den gesamten Lebenszyklus eines Produktes bezieht und eher auf energieverbrauchsrelevante Produkte zutrifft [12].

2.7 Recycling

Laut dem deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) und der aktuellen europäischen Abfallrahmenrichtlinie wird Recycling wie folgt definiert:

„... jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, aber nicht die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind“ (KrWG § 3 (25))
[14]

Der Begriff „Recycling“ kommt ursprünglich aus dem angloamerikanischen Sprachraum und wurde mittlerweile ins Deutsche übernommen. Es gibt allerdings nach wie vor keine allgemein anerkannte deutsche Übersetzung, wobei oft von „Kreislaufwirtschaft“ gesprochen wird [15]. Bezüglich Polymeren gibt es mehrere Möglichkeiten, wie mit Altstoffen umgegangen werden kann. Beispielhaft ist dies in Abbildung 10 anhand der Kunststoffabfälle in Deutschland im Jahr 2015 dargestellt.

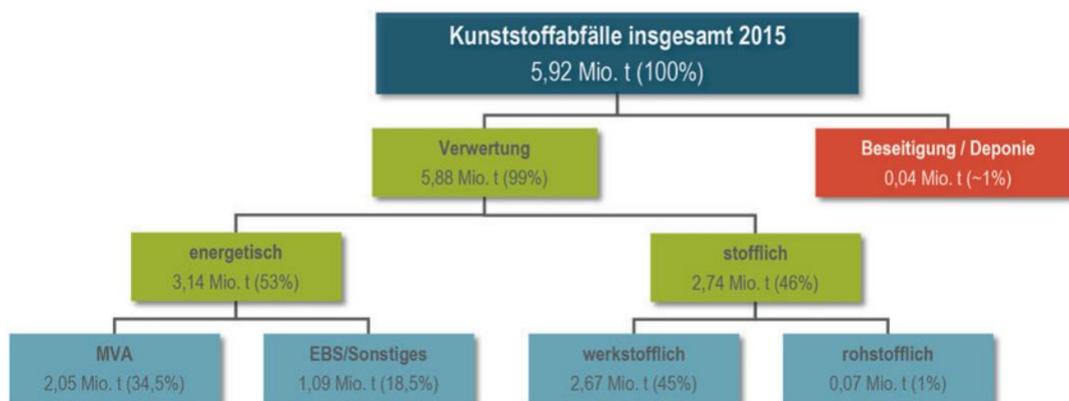


Abbildung 10: Kunststoffabfallverwertung in Deutschland im Jahr 2015 [16]

Sollen die Werkstoffe verwertet werden, kann dies entweder energetisch oder stofflich passieren. Für diese Arbeit spielt die energetische Verwertung keine Rolle. Stofflich können die Altteile entweder rohstofflich oder werkstofflich verwertet werden. Rohstoffliche Verwertung bedeutet, dass die Kunststoffe wieder in ihre chemischen Bausteine zerlegt werden und beispielsweise zur Herstellung von Klebstoffen oder Farben verwendet werden. Auch diese Form der Kreislaufführung wird in dieser Arbeit nicht näher behandelt. Für die werkstoffliche Verwertung wird das Material mit Mühlen zerkleinert, um dann wieder dem Produktionsprozess zugeführt werden zu können. Bei thermoplastischen Polymeren führt dies allerdings in der Regel zu einer Verschlechterung der Werkstoffkennwerte durch die Verarbeitungs- und Alterungsprozesse. Ständige Witterung oder UV-Strahlung können den Werkstoff schon während der Nutzungsphase gealtert haben. Weitere Einflussfaktoren auf die Qualität des Rezyklats sind beispielsweise sortenfremdes Material, Staub oder Lackierungen. Deshalb wird das Rezyklat meist nicht in reiner Form verwendet, sondern der Neuware beigemischt. Bewährt hat sich hier ein Rezyklatanteil von 30 Massenprozent, wenn neuwarengleiche Werkstoffkennwerte gefordert sind [16]. Die werkstoffliche Verwertung ist der Fokus dieser Arbeit. Zu erwähnen ist allerdings, dass es in manchen Fällen auch technisch

Theoretische Grundlagen

und ökonomisch sinnvoll sein kann ein Produkt niedrigerer Qualität aus dem Rezyklat herzustellen. Dies wird in der Regel als Downcycling bezeichnet [14].

Falls eine sortenreine Trennung der Kunststoffe technisch nicht möglich, oder mit einem nicht vertretbarem Aufwand verbunden ist, ist werkstoffliches Recycling nicht grundsätzlich ausgeschlossen. Wichtig ist hierbei sicherzustellen, dass die Materialien miteinander mischbar bzw. verträglich sind. Als Hilfsmittel werden hier, wie in Abbildung 11 dargestellte Verträglichkeitsmatrizen verwendet [16].

		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

Abbildung 11: Verträglichkeitsmatrix für Polymere [16]

Grundsätzlich gibt es mehrere Motivationen Recycling zu betreiben. Als erstes ist hier das Ausnutzen des Restwerts in den Abfällen zu nennen, also Erlös, bzw. betriebswirtschaftlicher Nutzen als Motivation. Da die Ressourcen auf der Erde begrenzt sind, macht es Sinn diese zu schonen, was das zweite Motiv für Recycling bildet. Der große Bedarf an Kunststoffen führt aber nicht nur zu einem großen Ressourcenbedarf in der Produktion, sondern auch zu großen Abfallmengen. Werden diese Mengen ineffizient behandelt kommt es z. B. zur Vermüllung von Landschaften oder der Meere. Weiters ist die Reduzierung der Schadstoffemissionen als drittes Motiv zu erwähnen. Das letzte Motiv ist die Vermeidung von Deponiekosten und die Erhaltung der Landschaft, da die Deponierung von Abfällen mit erheblichen Kosten und großem Flächenbedarf verbunden ist [14].

Um zu wissen, wie mit Abfällen umzugehen ist, ist die Abfallhierarchie gemäß § 6 KrWG unter Berücksichtigung der ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen heranzuziehen. Diese Hierarchie gibt folgende Rangfolge vor:

- Vermeidung
- Vorbereitung zur Wiederverwendung
- Recycling

- Sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung oder Verfüllung
- Beseitigung (gemeinwohlverträglich) [4,14]

2.7.1 Recycling von Thermoplasten

Da bei den Thermoplasten vor allem die eher schwachen Nebervalenzbindungen für den Zusammenhalt zwischen den Makromolekülen verantwortlich sind eignen sie sich grundsätzlich hervorragend für Recycling. Der Schmelzzustand kann relativ leicht erreicht werden, wodurch das Rezyklat als homogenes Granulat aufbereitet werden kann und wieder verwendet werden kann. Allerdings hat dies auch unerwünschte Nebeneffekte wie den Verlust der ursprünglichen Knäuelgestalt und die Ausrichtung der Ketten in eine Vorzugsrichtung, was Anisotropie zur Folge hat. Dadurch ergeben sich vor allem bei wiederholten Recyclingzyklen Häufungen von zerkleinerten Molekülketten und damit einhergehend eine Verschlechterung des Werkstoffverhaltens. Daher bedarf es großer Vorsicht um nicht Downcycling zu betreiben [4].

2.7.2 Recyclingcodes

Wie die in Abbildung 11 dargestellte Verträglichkeitsmatrix zeigt, ist es wichtig nicht nur die Kunststoffe von anderen Materialien zu trennen, sondern auch die Polymere untereinander möglichst sortenrein zu trennen. Hierfür werden oft sogenannte Recycling Codes verwendet. Die Recycling Codes der rezyklierbaren Polymere sind in Abbildung 12 dargestellt [4, 9, 17].



Abbildung 12: Recycling Codes [17]

Diese Recycling Codes werden auf die Kunststoffprodukte aufgedruckt, laserbeschriftet oder geprägt [4].

2.8 Abfallkategorien

Da sich die anfallenden Reststoffe erheblich in ihren Eigenschaften unterscheiden, ist es wichtig Abfallgruppen festzulegen, um effizientes Recycling zu ermöglichen. Unterschieden wird hierbei nach Zeitpunkt des Anfallens des Abfalls. Allerdings unterscheiden sich die Kategorien auch der Zusammensetzung entsprechend. Die „*Post-Production*“-Abfälle fallen im Laufe der Produktion an, weshalb es sich dabei in der Regel um wenig verunreinigte, sortenreine, Abfälle handelt. Außerdem fallen sie kontinuierlich an und können im besten Fall

produktionsintegriert oder produktionsnah recycelt werden. Bei der zweiten Kategorie, den „*Post-Industrial*“- *Abfällen*, handelt es sich um Material, das während der Distribution oder bei Installationen anfällt. Beispiele hierfür sind Transportverpackungen oder Baustellenabfälle. Auch bei dieser Kategorie handelt es sich noch um eher sortenreine Abfälle mit wenigen Verunreinigungen. Der Anfall ist zeitlich gut prognostizierbar und regional, wodurch die Möglichkeit enger Recycling-Kreisläufe besteht. Die dritte Kategorie, die „*Post-Consumer*“- *Abfälle*, besteht aus Produkten am Ende ihrer Lebensdauer und Produktverpackungen nach der Nutzungsphase von dem/der Konsument_in. Diese Kategorie beinhaltet sortenreiche Abfallströme, die nur geringen Schwankungen in der Menge unterliegen und lokal anfallen. Allerdings handelt es sich oft um stark verunreinigtes und gealtertes Material und es können große Unterschiede in der Rezeptur vorliegen. Um hier effizientes Recycling zu betreiben, bedarf es gut vernetzter Verwertungsstrukturen. Die vierte, und letzte, Abfallkategorie bilden *Deponien und Halden*. Dabei handelt es sich um extrem sortenreiche Abfallströme über lange Ablagerungszeiträume. Sie fallen zentral an und sind in der Regel stark verschmutzt und gealtert. Potential diese Abfälle noch zu verwerten besteht, wenn die Mengen groß genug sind, die Wertstoffinhalte hoch genug sind, oder die Umweltrisiken hoch sind [14]. Im Zuge dieser Arbeit steht die dritte Kategorie, die Post-Consumer Abfälle im Fokus.

2.9 Umfragen

Wissenschaftliche Umfragen sind ein wichtiges Mittel der empirischen Sozialforschung, um theoretische Erkenntnisse in der Praxis zu überprüfen [18]. Im Idealfall liefern Umfragen belastbare Zahlen und damit oft auch eine Entscheidungsgrundlage. Wenn die richtigen Fragen gestellt werden, liefern Umfragen eindeutige Informationen. Dadurch können sie bei der Suche nach Gründen für gewisse Handlungsweisen, etc. helfen. Außerdem können Umfragen Trends aufdecken, wenn dieselbe Frage, zu unterschiedlichen Zeiten, wiederholt gestellt wird. Nicht zuletzt dienen Umfragen zur Stimmungserfassung, also als Sprachrohr bestimmter Gruppen [19]. Während bei Experimenten Variablen verändert werden, um zu sehen wie sich die Veränderung auswirkt, dienen Umfragen dazu, das Niveau der Variablen zu erfassen und nicht dazu sie zu manipulieren [20].

Die in Kapitel 5 vorgestellten Ergebnisse zeigten, dass große Unterschiede in den mechanischen und rheologischen Eigenschaften von tiefgezogenen und spritzgegossenen Materialien bestehen und die daraus entstehenden Inhomogenitäten ein Problem darstellen können. Deshalb könnte eine Trennung des Plastikmülls anhand der Formgebung durchaus

Theoretische Grundlagen

sinnvoll sein, um die gewünschten Eigenschaften der Materialien auch im Rezyklat zu erhalten. Um das Potential der Konsument_innen diesbezüglich zu erschließen und auch die Umsetzbarkeit einer solchen Mülltrennung zu prüfen, wurde die in Kapitel 4.5 vorgestellte Umfrage durchgeführt. Die Ergebnisse der Umfrage können Kapitel 5.4 entnommen werden.

3. Werkstoffe

Bei allen im Zuge dieser Arbeit verarbeiteten Materialien handelt es sich um Post-Consumer Materialien. Diese wurden händisch sortiert, basierend auf dem vorhandenen Recyclingcode. Einbezogen wurden nur Becher aus PP. Kategorisiert wurden die Becher nach der Art der Dekoration, um zu untersuchen ob, und wie sich diese auf die Werkstoffeigenschaften des Rezyklats auswirkt. Im Folgenden werden die verschiedenen Dekorationsarten bzw. Kategorien kurz beschrieben.

3.1 Kategorien

Direktdruck (DD): Die Dekoration bei Bechern dieser Kategorie wird direkt auf das PP gedruckt.

Unbedruckt: Becher dieser Kategorie besitzen keinerlei Dekoration: Sie sind in der Regel weiß oder durchsichtig.

K3: Die Abkürzung steht für Karton-Kunststoff-Kombination. In diesem Fall ist die Dekoration bzw. das Labelling auf Karton und wird auf den Becher geklebt. Vor dem Entsorgen sollen Karton und Kunststoff idealerweise von Konsument_innen getrennt werden. [21]

Kunststoff-Sleeve (KST-SI): Ähnlich den K3-Bechern kommt auch hier die Dekoration nicht direkt auf den Becher, sondern auf ein separates, abnehmbares, Label. Allerdings handelt es sich in diesem Fall um einen Kunststoff-Sleeve. Dieser Sleeve wird meist durch Schrumpfung aufgebracht.

In-Mold Labelling (IML): Bei dieser Art der Dekoration wird eine Etikettenfolie, idealerweise ident dem Spritzgussmaterial, auf die Formteilerfläche des Spritzgusswerkzeuges gelegt und mittels Vakuum oder statischer Aufladung fixiert. Wird die Schmelze eingespritzt verschweißt sie mit dem zuvor eingelegten Label und der dekorierte Becher ist fertig [7].

3.2 Post-Consumer Materialien

Die in dieser Arbeit verwendeten Post-Consumer Verpackungen wurden von Jakob Lederer und Lea Gritsch vom Verfahrenstechnik Institut E166-01-1 zur Verfügung gestellt. Untersucht wurden zwei unterschiedliche Chargen.

3.2.1 1. Charge

Die erste Charge enthielt sortierte und per Hand gewaschene Polypropylenbecher, welche im Oktober 2021 in Wien entsorgt wurden. In dieser Charge wurde zwischen Entsorgung im gelben Sack (G/B) und Restmüll (RM) unterschieden. Es wurden einerseits die anfallenden Materialströme beibehalten und eine anteilige Mischung daraus erstellt. Andererseits wurden die einzelnen Kategorien näher betrachtet. Die verschiedenen Serien wurden bezüglich ihres Recyclings in ihren mechanischen und rheologischen Eigenschaften betrachtet. Die Tabelle 3 zeigt wieviel Material in der ersten Charge vorhanden war. Die bereits erwähnten Abkürzungen G/B und RM wurden verwendet um zwischen den Entsorgungsarten zu unterscheiden. In den einzelnen Fraktionen wurde zudem noch separat das spritzgegossene und das tiefgezogene Material abgewogen, um später daraus Rückschlüsse ziehen zu können. Da in den Fraktionen DD G/B, K3 G/B und KST-SI G/B ausreichend Material vorhanden war, wurden diese auch zur Mehrfachverarbeitung herangezogen um zu untersuchen, wie sich mehrmaliges Recycling auf die mechanischen und rheologischen Werkstoffeigenschaften auswirkt.

Tabelle 3: Menge der Materialien 1. Charge (Oktober 2021)

Bezeichnung	Masse [g]	Anteil am Materialstrom [%]	Anteil Spritzgussmaterial [%]
DD G/B	969.22	36.73	19.42
IML G/B	359.7	13.63	100
K3 G/B	579.26	21.95	0
KST-SI G/B	606.01	22.97	32.79
Unbedruckt G/B	124.32	4.71	60.68
DD RM	547.84	52.04	0
IML RM	32.75	3.11	100
K3 RM	280.55	26.65	0
KST-SI RM	159.33	15.13	29.57
Unbedruckt RM	32.34	3.07	92.05
Mischung G/B	100	-	31.15
Mischung RM	100	-	10.41

Da die Mischung G/B und Mischung RM anteilmäßig, nach dem in Tabelle 3 angeführten, Vorkommen im Müll erzeugt wurden, stellen sie ein Szenario dar, in dem die Becher nicht weiter nach der Dekoration sortiert werden, allerdings das PP von anderen Kunststoffen und Altstoffen getrennt wird. Da für die Durchführung aller Tests in etwa 100g Material pro Fraktion benötigt werden, wurden die Kategorien IML und Unbedruckt des RM Teils nicht separat getestet und sind nur in die Mischung eingeflossen.

3.2.2 2. Charge

Bei der zweiten Charge Material handelte es sich um nach Dekoration vorsortierte Becher aus dem gelben Sack. Sie wurden im Mai 2022 in Wien entsorgt. Die Becher wurden maschinell bei 60°C für 3min ohne Spülmittel gewaschen. Im Labor wurde noch eine weitere Handwäsche vorgenommen, da einige Verunreinigungen durch die automatisierte Wäsche nicht entfernt werden konnten. Hierbei war nicht das Ziel ein aussagekräftiges Gesamtbild über die Anteile der Becher im Abfallstrom zu erstellen. Vielmehr war das Ziel die nötigen Materialien zu sammeln, um geplante Folgeuntersuchungen anstellen zu können. Dennoch entsprechen die Mengen der DD und der KST-SI Serien dem Vorkommen im Abfallstrom, während für die IML Fraktion nur ausreichend Material gesammelt wurde, um sie für die Mehrfachverarbeitung heranziehen zu können. Tabelle 4 zeigt die Mengen der gesammelten Materialien, die folglich nicht eindeutig den zustande kommenden Masseströmen des Abfallstroms entsprechen.

Tabelle 4: Menge der Materialien 2. Charge (Mai 2022)

Bezeichnung	Masse [g]	Anteil [%]
DD G/B2 SG	154.9	30.98
DD G/B2 TZ	571.9	69.02
KST-SI G/B2 SG	144.92	21.3
KST-SI G/B2 TZ	322.85	78.7
IML G/B2	560.6	-

Da die Methode der Formgebung einen großen Einfluss auf die gewünschten Werkstoffeigenschaften hat, wurde bei den Kategorien DD und KST-SI eine Unterscheidung zwischen Tiefziehen (TZ) und Spritzgießen (SG) getroffen. Einerseits um zu untersuchen welchen Unterschied die Trennung auf die Eigenschaften des Rezyklates hat und ob eine solche Trennung sinnvoll wäre. Andererseits um auch eine Mischung zu testen, um zu untersuchen wie sehr sich die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften gegenseitig beeinflussen. Dafür wurde jeweils eine Fraktion von nur spritzgegossenem, nur tiefgezogenem und anteilmäßig gemischtem Material verarbeitet.

3.2.3 Zusammenfassung beider Chargen

Mit Hilfe der Materialien der beiden Chargen, wurden mehrere Aspekte untersucht. Einerseits die Unterschiede aufgrund der Entsorgungsart, also G/B und RM. Andererseits, wurden die Serien DD G/B, KST-SI G/B, K3 G/B und IML G/B2 dreifach bzw. fünffach verarbeitet, um den Einfluss von mehreren Verarbeitungszyklen auf die Qualität des Rezyklats zu untersuchen. Weiters, wurden in der zweiten Charge die Unterschiede aufgrund der ursprünglichen

Werkstoffe

Formgebung betrachtet, indem die Kategorien DD und KST-S1 jeweils nochmal in TZ, SG und eine anteilmäßige Mischung aufgeteilt wurden. Insgesamt ergaben sich dadurch 25 zu testende Fraktionen. Die Auflistung aller Fraktionen ist in Tabelle 5 zu sehen.

Tabelle 5: Auflistung aller untersuchten Fraktionen

Charge 1			Charge 2	
Gelber Sack	Restmüll	Mehrfachverarbeitung	Formgebung	Mehrfachverarbeitung
DD G/B	DD RM	DD G/B 3x	DD G/B2 TZ	IML G/B2
K3 G/B	K3 RM	DD G/B 5x	DD G/B2 SG	IML G/B2 3x
KST-S1 G/B	KST-S1 RM	K3 G/B 3x	DD G/B2 Mischung	IML G/B2 5x
Mischung G/B	Mischung RM	K3 G/B 5x	KST-S1 G/B2 TZ	
Unbedruckt G/B	-	KST-S1 G/B 3x	KST-S1 G/B2 SG	
IML G/B	-	KST-S1 G/B 5x	KST-S1 G/B2 Mischung	

Das generelle Vorgehen zur Analyse dieser Fraktionen wird im folgenden Kapitel genauer erläutert.

4. Methoden

4.1 Verarbeitung der Materialien

Die bereits vorgewaschenen und sortierten Polypropylenbecher wurden nochmals oberflächlich mit Papierhandtüchern gereinigt und Materialien wie Platinen, Klebstoffe und Sleeves weitestgehend entfernt, um Verunreinigung möglichst ausschließen zu können. Wie bereits in den theoretischen Grundlagen erwähnt, wirken sich Verunreinigungen und andere Materialien negativ auf die Eigenschaften des Rezyklats aus [16]. Im Folgenden wurden die Becher zur Dokumentation gewogen und wenn nötig auch nochmals in spritzgegossenes und tiefgezogenes Material unterteilt.

4.1.1 Herstellung Flakes

Anschließend wurden die Becher händisch, bzw. mit Scheren, zerkleinert, um später der Mühle zugeführt werden zu können. Als Mühle wurde eine Pulverisette 19 der Marke Fritsch mit einem 4mm Sieb verwendet. Diese Mühle wurde für alle Mahlvorgänge im Zuge dieser Arbeit verwendet.

4.1.2 Herstellung Mahlgut

Diese Flakes dienen als Ausgangsmaterial für die Extrusion, um das Material weiter zu homogenisieren. Der dafür verwendete Extruder ist ein Extron EX 18-26-1.5 (Einschneckenextruder) mit drei Heizzonen. Für den Großteil des Materials wurden Zone 1 auf 165°C, Zone 2 auf 240°C und Zone 3 (Flansch) ebenfalls auf 240°C eingestellt. Nur bei den In-Mold Serien und auch bei der Mehrfachverarbeitung von Direktdruck, K3 und Kunststoff-Sleeve, wurde die Zone 3 (Flansch) auf 220°C eingestellt um eine verbesserte Verarbeitung zu ermöglichen. Die Geschwindigkeit der Schnecke wurde bei allen Materialien auf 70 Umdrehungen pro Minute eingestellt. Nachdem das Material abgekühlt ist, wurde es nochmals gemahlen, um Rezyklat in Form von Mahlgut zu erhalten. Bei einigen Serien wurde dieser Vorgang mehrfach wiederholt, um auch die Werkstoffeigenschaften nach der dritten bzw. fünften Verarbeitung testen zu können.

4.1.3 Herstellung Prüfkörper

Nach Herstellung der Rezyklate wurde das hergestellte Mahlgut extrudiert und spritzgegossen, um Proben für den Zugversuch und den Schlagzugversuch herzustellen. Hierfür wurde ein Doppelschneckenextruder Haake Mini Lab II verwendet und das Material auf 230°C aufgeheizt und bei einer Nenndrehzahl von 100 Umdrehungen pro Minute in einen auf 230°C

Methoden

erhitzten Zylinder extrudiert. Danach wurde das Material direkt aus dem Zylinder mit einer Haake Mini Jet II bei 350bar und einer Einspritz- und Nachspritzzeit von je 10s in ein 40°C warmes Werkzeug spritzgegossen. Die Prüfkörper für den Zugversuch entsprachen dem Typ 5A laut Norm DIN EN ISO 527-2:2012. Die Geometrie ist in Abbildung 13 dargestellt.

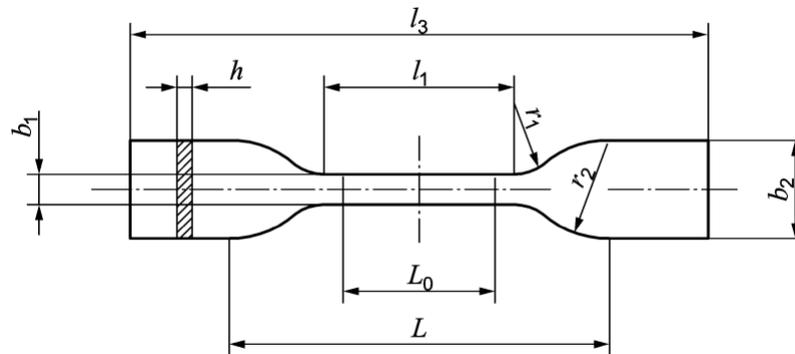


Abbildung 13: Prüfkörpergeometrie Typ 5A Zugversuch [22]

Maße:

Gesamtlänge $l_3 = \geq 75$ mm

Breite an den Enden $b_2 = 12,5 \pm 1$ mm

Länge des parallelen Teils $l_1 = 25 \pm 1$ mm

Breites des engen Teils $b_1 = 4 \pm 0,1$ mm

Kleiner Radius $r_1 = 8 \pm 0,5$ mm

Großer Radius $r_2 = 12,5 \pm 1$ mm

Anfangsabstand der Klemmen $L = 45 \pm 2$ mm

Messlänge $L_0 = 20 \pm 0,5$ mm

Dicke $h = 2 \pm 0,2$ mm

Vor der Durchführung der Zugprüfung wird der Anguss entfernt und der Prüfkörper entgratet.

Die Prüfkörper einer Serie sind in Abbildung 14 zu sehen.

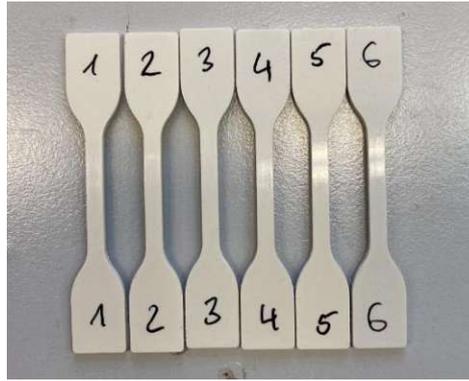


Abbildung 14: Prüfkörper Zugversuch

Als Prüfkörper für den Schlagzugversuch wurden die laut DIN EN ISO 8256:2004 als Typ 1 bezeichnete Geometrie verwendet. Diese ist in Abbildung 15 zu sehen.

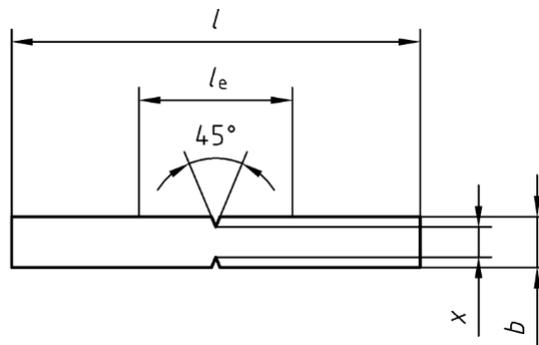


Abbildung 15: Prüfkörpergeometrie Typ 1 Schlagzug [23]

Maße:

Länge $l = 60 \pm 2$ mm

Breite $b = 10 \pm 0,2$ mm

Restbreite $x = 6 \pm 0,2$ mm

Einspannlänge $l_e = 30 \pm 2$ mm

Auch vor der Durchführung des Schlagzugversuches wird der Anguss entfernt und der Prüfkörper entgratet.

Um die Prüfkörper für die rheologische Untersuchung bzw. den Frequency Sweep herzustellen, wurde die Heizpresse P 200 P von Collin verwendet. Die erzeugten Prüfkörper sind runde Plättchen mit 25mm Durchmesser und 1,2mm Dicke. Das verwendete Heizprogramm ist in Tabelle 6 zu sehen.

Tabelle 6: Heizprogramm für die Rheologieproben

T [°C]	165	210	210	210	30
t [min]	12	8	5	1	13
p [bar]	0	10	50	50	50
r [K/min]	0	0	0	0	4

4.2 Rheologie

Das Wort Rheologie kommt aus dem Griechischen und leitet sich von *rheos*, das fließen bedeutet, ab. Es handelt sich hierbei also um die Wissenschaft der Deformation und des Fließens von Stoffen. Die Rheologie beschreibt, misst und erklärt, wie Flüssigkeiten und Feststoffe auf bestimmte Deformationen reagieren. Dies ist z. B. bei der Auslegung von Extrusions- oder Spritzgussmaschinen von besonderer Bedeutung. Grundsätzlich haben alle realen Materialien drei rheologische Eigenschaften: Viskosität, Plastizität und Elastizität. Diese sind je nach Beanspruchung, Temperatur, etc. unterschiedlich ausgeprägt. Kunststoffschmelzen besitzen in der Regel visko-elastisches Verhalten. Um die Stoffeigenschaften eines Materials zu ermitteln, können Viskosimeter oder Rheometer verwendet werden. Dabei gibt es verschiedene Funktionsweisen bzw. Bauarten. Für die Ermittlung der Daten in dieser Arbeit kam ein Rotationsrheometer zum Einsatz. Dabei rotiert der Messkörper in einer Probe, wodurch eine Schlepplströmung aufgebracht wird. Gemessen werden dann die Drehzahl und das Drehmoment, wodurch auf die Scherrate und die Schubspannung geschlossen werden können. Dafür ist es wichtig die Geometrie des Rheometers zu kennen. Im Falle dieser Arbeit handelt es sich um ein Platte-Platte-Rheometer, wovon eine schematische Darstellung in Abbildung 16 zu sehen ist [24].

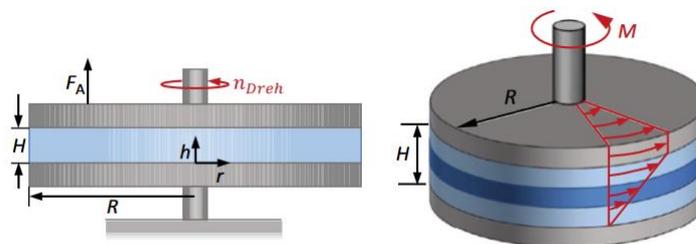


Abbildung 16: Platte-Platte-Rheometer [24]

4.2.1 Frequency Sweep

Bei dem verwendeten Modell handelt es sich um ein Anton Paar MCR 301 Rheometer mit Stickstoffatmosphäre und einem Spaltmaß (H) von 1mm. Durchgeführt wurde ein Frequency Sweep, wobei die Kreisfrequenz des Messkörpers bei vorgegebener Amplitude schrittweise reduziert wird. Gemessen wird von 628-0,1°rad/s bei 230°C. Aus der sich ergebenden

Methoden

Phasenverschiebung zwischen der Kreisfrequenz (Anregung) und dem Drehmoment (Antwort) können das Speichermodul (G' [Pa], elastischer Anteil) nach dem Hookschen Gesetz und das Verlustmodul (G'' [Pa], viskoser Anteil) nach dem Newtonschen Reibungsgesetz ermittelt werden. In Abbildung 17 sind Speicher- und Verlustmodul für einen Kunststoff dargestellt. Links des Cross Over Points (COP) der beiden Linien, also bei niedrigen Frequenzen, überwiegt das viskose Verhalten. Bei höheren Frequenzen, also rechts des COP überwiegt das elastische Verhalten [24].

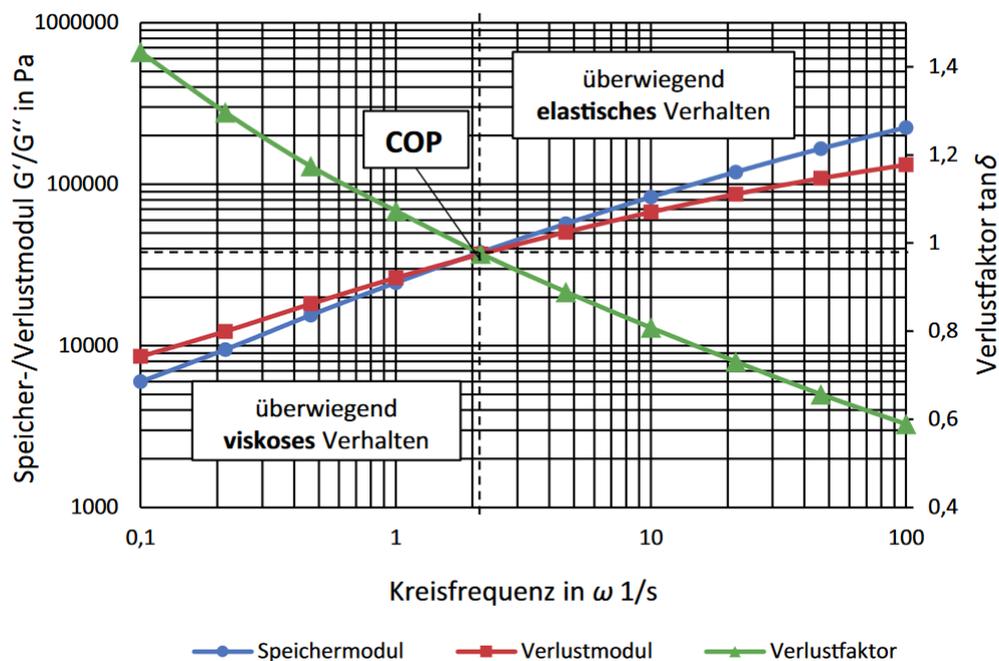


Abbildung 17: Speicher- und Verlustmodul [24]

Aus der Lage des Cross Over Points lassen sich Rückschlüsse auf die Molmassenverteilung schließen. Durch eine enge Molmassenverteilung wird der Schnittpunkt nach oben verschoben, während eine weite Verteilung den COP nach unten schiebt. Sind die Polymerketten des Prüfkörpers lang oder sehr verzweigt, so ist der COP eher links. Ist das Gegenteil der Fall, also kurze wenig verzweigte Ketten, so verschiebt sich der Punkt nach rechts. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 18 dargestellt [24].

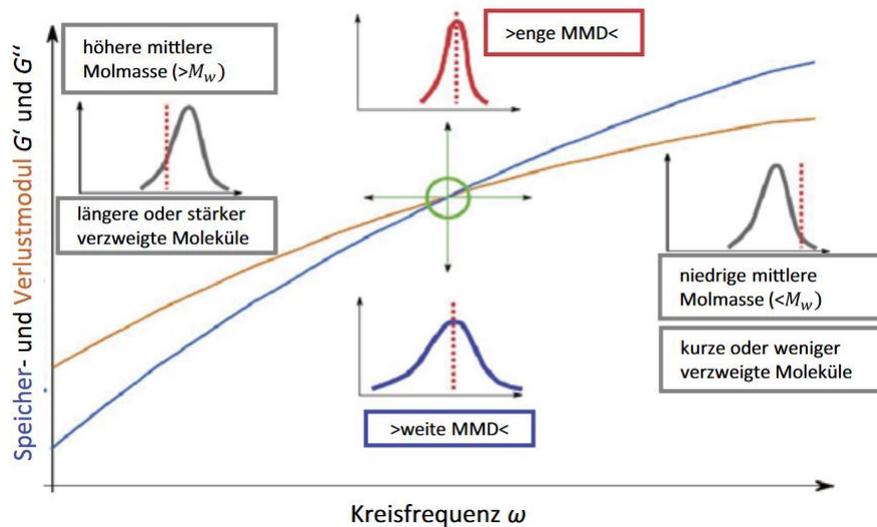


Abbildung 18: Verschiebung des COP abhängig von der Molmasse [24]

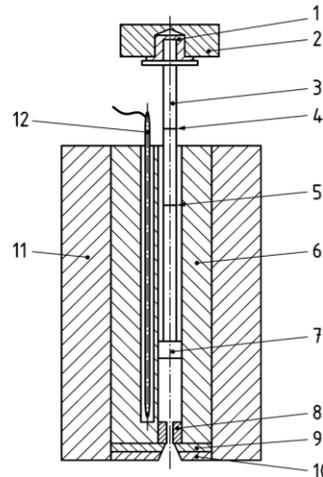
Im Zuge der rheologischen Prüfung wurden pro Serie jeweils mindestens zwei Frequency Sweeps durchgeführt. Bei Deckungsgleichheit wurde eine der Proben zur Auswertung herangezogen.

4.2.2 Melt Flow Rate

Die Melt Flow Rate (MFR), oder auch Schmelz-Massefließrate, wird laut Norm wie folgt definiert:

„Geschwindigkeit der Extrusion eines geschmolzenen Kunstharzes durch ein Extrusionswerkzeug von festgelegter Länge und festgelegtem Durchmesser unter vorgeschriebenen Bedingungen hinsichtlich Temperatur, Belastung und Lage des Kolbens im Zylinder eines Extrusionsplastometers, bestimmt durch die in einer festgelegten Zeitdauer extrudierte Masse“ [25]

Der typische Aufbau eines Geräts zur Bestimmung der MFR ist in Abbildung 19 schematisch dargestellt.



- Legende**
- 1 Wärmedämmung
 - 2 entfernbares Gewichtsstück
 - 3 Kolben
 - 4 obere Bezugsmarke
 - 5 untere Bezugsmarke
 - 6 Zylinder
 - 7 Kolbenkopf
 - 8 Extrusionswerkzeug
 - 9 Extrusionswerkzeug-Rückhalteplatte
 - 10 Dämmplatte
 - 11 Wärmedämmung
 - 12 Temperaturmessfühler

Abbildung 19: Typischer Aufbau eines Geräts zur Bestimmung der MFR [25]

Zur Bestimmung der MFR wurde ein MeltFloW basic der Firma KARG verwendet. Für PP wurde die Temperatur auf 230°C eingestellt und ein normgerechtes Gewicht von 2160g verwendet. Die Masse wurde alle 10s abgeschlagen und danach der Mittelwert der sechs Proben ermittelt und in folgende Formel eingesetzt, um eine MFR in Masse je zehn Minuten zu erhalten:

$$MFR = \frac{600 * W}{t}$$

Hierbei ist W die Masse in Gramm und t die Zeit in Sekunden. Die Bestimmung der MFR, wurde bei allen Materialien mehrmals durchgeführt. Zuerst vor der ersten Extrusion, also in Form von Flakes. Ein weiteres Mal wurde die MFR dann nach der ersten Verarbeitung bestimmt, also als Mahlgut. Bei der Mehrfachverarbeitung wurde die MFR außerdem noch nach der dritten und fünften Verarbeitung ermittelt.

4.3 Mechanische Prüfung

Neben den beschriebenen rheologischen Eigenschaften, spielen auch die mechanischen Eigenschaften eine wichtige Rolle für die Qualität des Rezyklats. Zur Bestimmung eben dieser

Eigenschaften wurden Zugversuche und Schlagzugversuche durchgeführt. Im Folgenden werden beide Versuchsarten kurz erklärt.

4.3.1 Zugversuch

Der Zugversuch wird bei Kunststoffen genauso wie bei Metallen zur Messung der mechanischen Eigenschaften herangezogen. Es handelt sich hierbei um eine quasistatische Belastung, da der Prüfkörper, verglichen mit realen Belastungen, eher langsam belastet wird. Abbildung 20 zeigt eine schematische Anordnung einer Zugprüfung nach DIN EN ISO 527 „Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften“ [8].

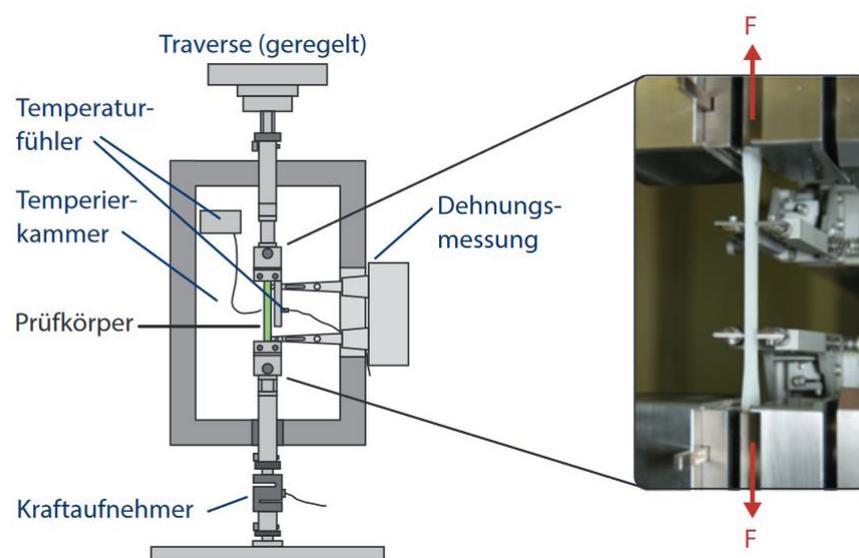


Abbildung 20: Schematischer Aufbau des Zugversuchs [8]

Über die geregelt verfahrbare Traverse wird mittels Einspannbacken eine Dehnung auf den Prüfkörper aufgebracht. Während des Vorgangs werden sowohl Dehnung, als auch Kraft gemessen. Dadurch können unter anderem E-Modul, Dehnungen und Festigkeiten des Werkstoffes ermittelt werden. Abbildung 21 zeigt ein typisches Spannungs-Dehnungs Diagramm für einen teilkristallinen Thermoplasten. Im linear-elastischen Bereich stellt sich die Deformation bei Entlastung sofort wieder zurück. Wird weiter gedehnt kommt man in den linear-viskoelastischen Bereich. Auch diese Deformationen stellen sich nach einiger Zeit nach der Entlastung wieder zurück. Im nichtlinear-viskoelastischen Bereich kommen irreversible Anteile hinzu und der Werkstoff stellt sich nach Entlastung nur mehr teilweise zurück. Wird die Streckgrenze überschritten, wird das viskose Verhalten dominant und die elastische Rückstellung wird sehr gering [8].

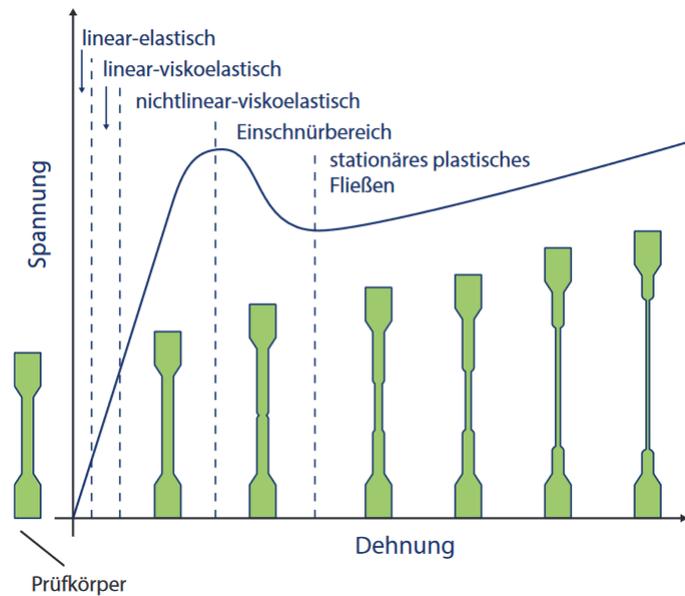


Abbildung 21: Verformungsverhalten bei der Zugprüfung [8]

Im Zuge dieser Arbeit wurde die Zwick Roell Z050 verwendet. Die Zugversuche wurden mit folgendem Ablauf durchgeführt: Die Prüfgeschwindigkeit betrug 20mm/min. Der E-Modul wurde mit einer dehnungsgeregelten Traversengeschwindigkeit von 1% pro Minute im Dehnungsbereich von 0,05% bis 0,25% bestimmt. Die Belastung wurde bis zum Bruch durchgeführt. Pro Serie wurden mindestens sechs Proben getestet und als Ergebnisse werden immer die Mittelwerte betrachtet.

4.3.2 Schlagzugversuch

Der Schlagzugversuch ist eine schnelle Art des Zugversuchs. Durchgeführt wird dieser mit einem Schlagpendel, dessen potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt wird, sobald es ausgelöst wird. Mittels einem 15g schweren Aluminium-Querjoch wird ein Prüfkörper so eingespannt, dass er durch den Aufprall des Schlagpendels nur uniaxial belastet wird. Dieser Vorgang ist Abbildung 22 zu entnehmen. Über den Pendelausschlag wird dann die zum Durchschlagen des Prüfkörpers verbrauchte Energie gemessen und ausgegeben. Es können hierbei sowohl gekerbte als auch ungekerbte Prüfkörper getestet werden [8].



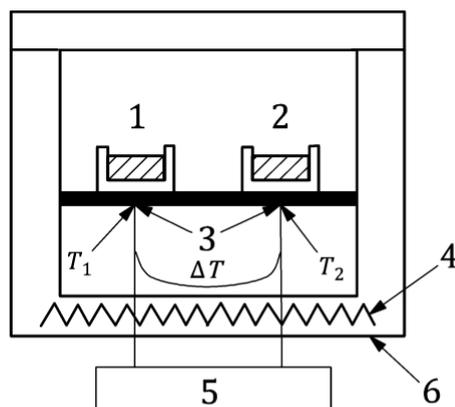
Abbildung 22: Schlagzugversuch [8]

Für die Schlagzugversuche im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Instron Ceast 9050 Pendelschlagwerk verwendet. Es verfügt über eine Länge von 231mm und eine maximale Schlagarbeit von 2J. Der Schlagzugversuch wurde, wie bereits erwähnt mit 2mm tief gekerbten Prüfkörpern durchgeführt. Auch hier wurden pro Serie sechs Proben getestet und als Schlagzugzähigkeit der Mittelwert der Ergebnisse errechnet. Die für das Durchschlagen des Prüfkörpers nötige Energie wird vom Schlagpendel direkt ausgegeben. Diese wurde dann durch die Querschnittsfläche an der gekerbten Stelle dividiert um auf die Zähigkeit in kJ/m^2 zu kommen.

4.4 Thermoanalytische Prüfung

4.4.1 DSC

Bei der *Differential Scanning Calorimetry (DSC)*, zu Deutsch *dynamische Differenzkalorimetrie* handelt es sich um ein Verfahren zur thermoanalytischen Prüfung von Stoffen nach DIN EN ISO 11357. Es wird eine Probe des Materials zusammen mit einer Referenzprobe einem zuvor definierten Temperaturprogramm unterzogen. Dabei wird sowohl die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Proben, als auch die zugeführte Wärme zu den jeweiligen Proben gemessen. Das Grundprinzip der dynamischen Wärmestrom-Differenzkalorimetrie ist in Abbildung 23 dargestellt.



Legende

- 1 Probekörperposition
- 2 Referenzposition
- 3 Thermoelemente
- 4 Einzelheizung
- 5 Stromkreis zur Messung von T_{specimen} , T_{ref} und ΔT
- 6 umgebender Ofen
- T_1 Temperatur bei der Probekörperposition (T_{specimen})
- T_2 Temperatur bei der Referenzposition (T_{ref})
- ΔT Temperaturdifferenz zwischen Probekörper- und Referenzposition

Abbildung 23: Grundprinzip DSC [26]

Diese Methode wird z. B. verwendet, um die spezifische Wärmekapazität zu bestimmen, Reaktionsenthalpien chemischer Reaktionen zu messen, oder auch um die chemische Zusammensetzung bzw. Verunreinigungen von Proben zu untersuchen [27]. Im Rahmen dieser Arbeit lag das Augenmerk auf der Untersuchung der chemischen Zusammensetzung bzw. den Verunreinigungen. Dafür wurde eine Q2000 von TA Instruments verwendet. Pro Fraktion wurden mindestens zwei Proben analysiert. Diese Analyse wurde allerdings erst nach der ersten Verarbeitung durchgeführt, um homogeneres Material zu untersuchen. Die Proben waren alle 5mg schwer, mit einer Toleranz von 10%, und wurden in einen Aluminiumtiegel eingesetzt. Das Temperaturprogramm bestand aus zwei Heizläufen und startete jeweils bei 20°C und lief in 10K/min bis 200°C. Zur thermischen Analyse der Fraktionen wurden mindestens zwei Proben pro Fraktion mittels DSC getestet. Bei Bedarf wurden weitere Proben gemessen. Zur Auswertung wurde jeweils der zweite Heizzyklus herangezogen.

4.5 Umfrage

Um zu evaluieren, ob eine Trennung anhand des Formgebungsverfahrens umsetzbar wäre, wurde am 06.03.2023 eine Umfrage an der TU Wien durchgeführt. Als Zielgruppe wurden junge Erwachsene ausgewählt, da laut einer Studie der ARA vor allem 18-34 Jährige angeben im Vergleich der letzten vier Jahre mehr Müll zu trennen [28]. Daher kann bei dieser

Methoden

Zielgruppe von einem besonderen Interesse an Mülltrennung ausgegangen werden. Erstellt wurde die Umfrage mit Unterstützung von Dr. Barbara Hartl von der Wirtschaftsuniversität Wien.

4.5.1 Vorgangsweise

Im Rahmen dieser Umfrage bekamen die teilnehmenden Personen je einen tiefgezogenen und einen spritzgegossenen weißen Becher und wurden gebeten die Unterschiede zwischen den Bechern aufzuschreiben. Da das Ziel war zusätzliche Reize, die durch Logos, Farben, Markennamen, etc. entstehen könnten auszuschließen, wurde versucht zwei möglichst idente Becher zu verwenden. Dabei handelte es sich um Coffee-To-Go Becher, einerseits der Marke Emi, und andererseits von S-Budget. Um die verschiedenen Reize zu verringern, wurden die Kunststoff-Sleeves entfernt. Die Becher von Emi sind spritzgegossen und die von S-Budget sind tiefgezogen. Der Anguss, welcher ein Indiz für Spritzguss ist, ist an der Unterseite der Becher zu erkennen. In Abbildung 24 sind die Unterseiten beider Becher dargestellt.



Abbildung 24: Hauptunterschiede Becher: S-Budget (links) Emi (rechts)

Ziel der Umfrage war es herauszufinden, ob Konsument_innen erkennen würden, dass die Becher unterschiedlich gefertigt wurden. Als Medium für die Umfrage wurde MS-Forms verwendet. Ein Ausdruck der Umfrage ist im Anhang zu sehen.

4.5.2 Pre Test

Am 25.01.2023 wurde ein Pre Test durchgeführt, um die Verständlichkeit der Frage im Hauptteil zu prüfen. Dieser wurde analog via Blattpapier im Zuge einer Lehrveranstaltung von Dr. Hartl durchgeführt und generierte 23 Rückmeldungen. Da sich nur eine der 23 teilnehmenden Personen auf den Boden der Becher bezogen hat, wurde als Ergebnis des Pre-Tests der zu betrachtende Bereich auf das untere Drittel der Becher eingeschränkt. Dafür wurde Abbildung 25 als Hilfestellung zu der Angabe des Hauptteils der Umfrage hinzugefügt.



Abbildung 25: Eingrenzung des Bereichs als Hilfestellung

4.5.3 Durchführung

Die Hauptstudie wurde am 06.03.2023 an der TU Wien im Hof des Getreidemarkts durchgeführt. Zwischen 8:30 Uhr und 10:30 Uhr wurden 52 Teilnehmende durch Crowd-Sourcing mit Hilfe von Jessica Schlossnikl akquiriert. Zu Beginn um 8:30 hatte es 4°C und am Ende um 10:30 hatte es 6°C, während es die ganze Zeit bewölkt blieb. Die vollständige Umfrage ist im Anhang zu finden.

5. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der im Kapitel 4. beschriebenen durchgeführten Tests vorgestellt und analysiert.

5.1 Rheologie

5.1.1 Frequency Sweep

Die Ergebnisse aller Frequency Sweeps sind in Abbildung 46 bis Abbildung 55 bzw. Tabelle 10 im Anhang zu sehen. Es wurden sowohl Speicher- und Verlustmodul, als auch die komplexe Viskosität aller Serien dargestellt. In vier Fällen (KST-SI G/B2 SG, IML G/B2, IML G/B2 3x und IML G/B2 5x) gab es im betrachteten Bereich keinen Schnittpunkt von Verlustmodul und Speichermodul. Bei diesen Materialien hat also während des gesamten Frequency-Sweeps das viskose Verhalten dominiert. Das ist auf das Formgebungsverfahren, und das dafür verwendet PP zurückzuführen [4]. Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse der Frequency Sweeps der Mehrfachverarbeitung von KST-SI G/B und IML G/B2. Es ist gut zu erkennen, dass die IML G/B2 Serien keinen Schnittpunkt von Verlustmodul und Speichermodul haben.

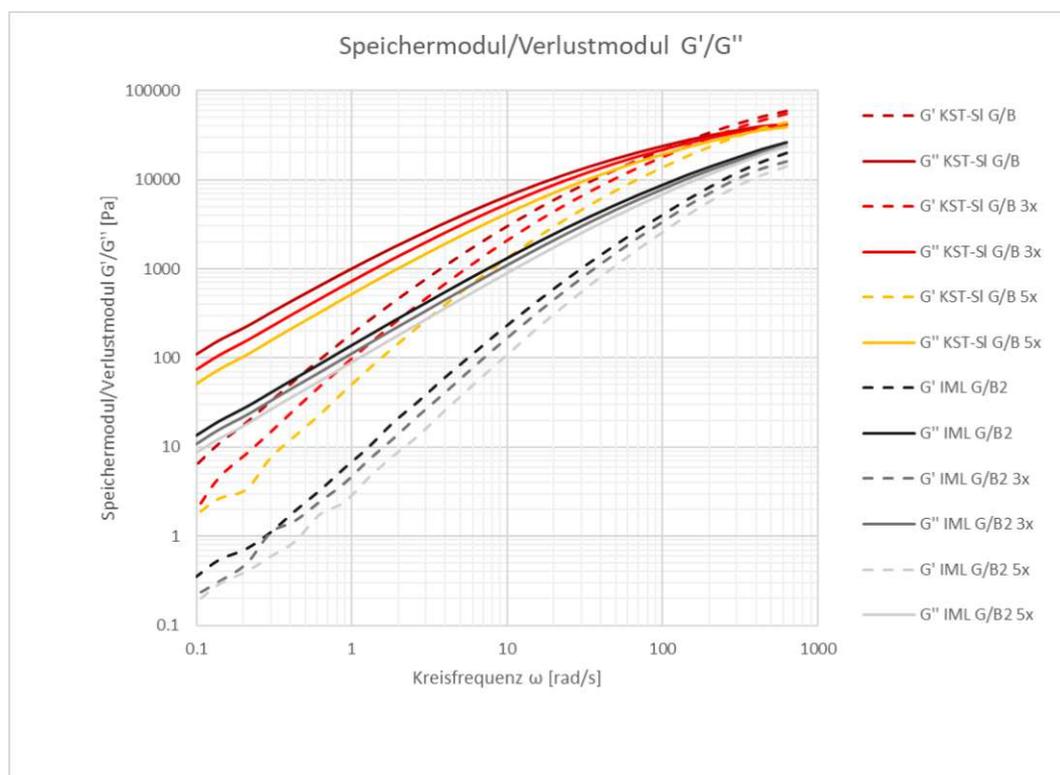


Abbildung 26: Speicher- und Verlustmodul Mehrfachverarbeitung KST-SI G/B und IML G/B2

Ergebnisse

In weiterer Folge wurde die Lage der Cross Over Punkte mittels Diagrammen weiter analysiert. Auf die normalerweise gängige logarithmische Skalierung der Achsen wurde verzichtet, da nur die COPs selbst und nicht der Verlauf von Speichermodul und Verlustmodul im Fokus liegen.

Der anfangs angestrebte Vergleich nach Art der Entsorgung wurde für die COPs in Abbildung 27 dargestellt. Die beiden Serien IML G/B und Unbedruckt G/B wurden nicht berücksichtigt, da es in der RM Charge keine IML bzw. Unbedruckt Serie gab. Es ist allerdings zu erwähnen, dass beide Materialien sehr viskoses Verhalten zeigten. Auch hier ist die niedrige Viskosität der Materialien auf die Formgebung bzw. die dementsprechende Materialwahl zurückzuführen. Die genauen Werte können Tabelle 10, bzw. Abbildung 54 und Abbildung 55 im Anhang entnommen werden. Der COP von DD G/B befindet sich deutlich weiter rechts und weiter unten als bei DD RM. Das ist auf den Anteil an Spritzgussmaterialien in der G/B Charge zurückzuführen, welche kürzere und weniger verzweigte Moleküle besitzen. Das viskose Verhalten dominiert und es führt zu einer weiteren Molmassenverteilung. Ähnliches zeigt sich auch bei der Betrachtung der beiden Mischungen. Auch hier kann der Unterschied auf den höheren Anteil an Spritzgussmaterial zurückgeführt werden [4]. Das K3 Material in beiden Chargen besitzt die höchste Viskosität und der Schnittpunkt von Speichermodul und Verlustmodul liegt daher bei eher niedrigen Kreisfrequenzen. Allerdings ist der COP der RM Serie höher gelegen, also die Molmassenverteilung enger. Eine Erklärung könnte ein homogenerer Materialstrom in der K3 RM Serie sein, wobei auch zu erwähnen ist, dass es sich nur um sehr geringe Änderungen handelt. Dementsprechend sollten die Ergebnisse auch nicht überinterpretiert werden. Beim Kunststoff-Sleeve Material liegt der Schnittpunkt der RM-Serie im Vergleich zu dem der G/B-Serie weiter links unten. KST-SI G/B besitzt also eine engere Molmassenverteilung und kürzere oder weniger verzweigte Moleküle [4, 24]. Aufgrund dessen, dass der Spritzgussanteil in beiden Fällen ca. 30% beinhaltet kann es nicht klar darauf zurückgeführt werden. Es zeigt jedoch die Heterogenität der Ströme, trotz vorhergehender Kategorisierung. Abschließend ist zu sehen, dass die K3 Becher die geringsten Kreisfrequenzen aufweisen, im Gegensatz zu den weiteren Kategorien. Dies stimmt mit der für die Formgebung notwendigen Schmelzefestigkeit für dieses eher dünnwandige Produkt gut überein.

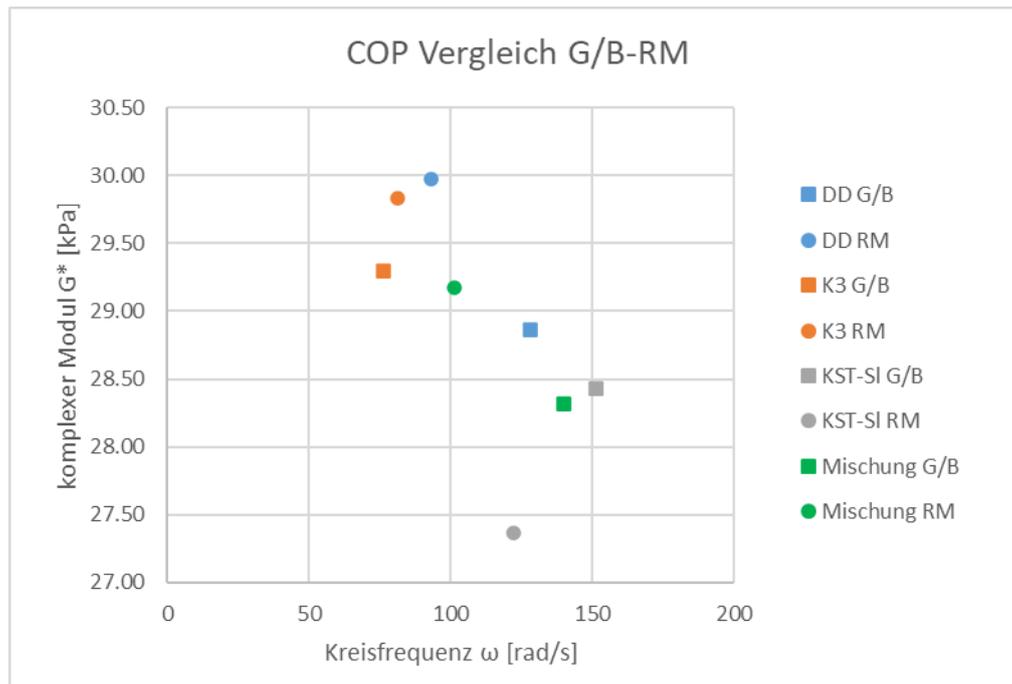


Abbildung 27: COP Vergleich G/B-RM

Die Cross Over Punkte der mehrfachverarbeiteten Serien sind in Abbildung 28 dargestellt. Da bei der Serie IML G/B2 keine Cross Over Punkte zu Stande kamen, konnten diese nicht in das Diagramm aufgenommen werden. Bei den Materialien K3, DD und KST-SI wird der COP im Laufe der Verarbeitungen immer weiter nach rechts verschoben, was auf einen Zerfall bzw. eine Verkürzung der Ketten schließen lässt [4, 6, 29, 30]. In Folge dessen überwiegt das viskose Verhalten des Materials bis zu höheren Kreisfrequenzen. Außerdem wandert der COP weiter nach oben was auf eine engere Molmassenverteilung im Laufe der Verarbeitungen hindeutet [24]. Auch bei Betrachtung der komplexen Viskositäten zeigt sich ein ähnliches Bild. Bei allen mehrfachverarbeiteten Serien, auch IML G/B2, sinkt die komplexe Viskosität im Laufe der Verarbeitungsvorgänge. Die Ursache dafür ist auch wiederum die Verkürzung der Ketten, und damit einhergehend ein geringeres Molekulargewicht [30]. Die Viskositäten sind in Abbildung 47 und Abbildung 49 dem Anhang zu entnehmen.

Ergebnisse

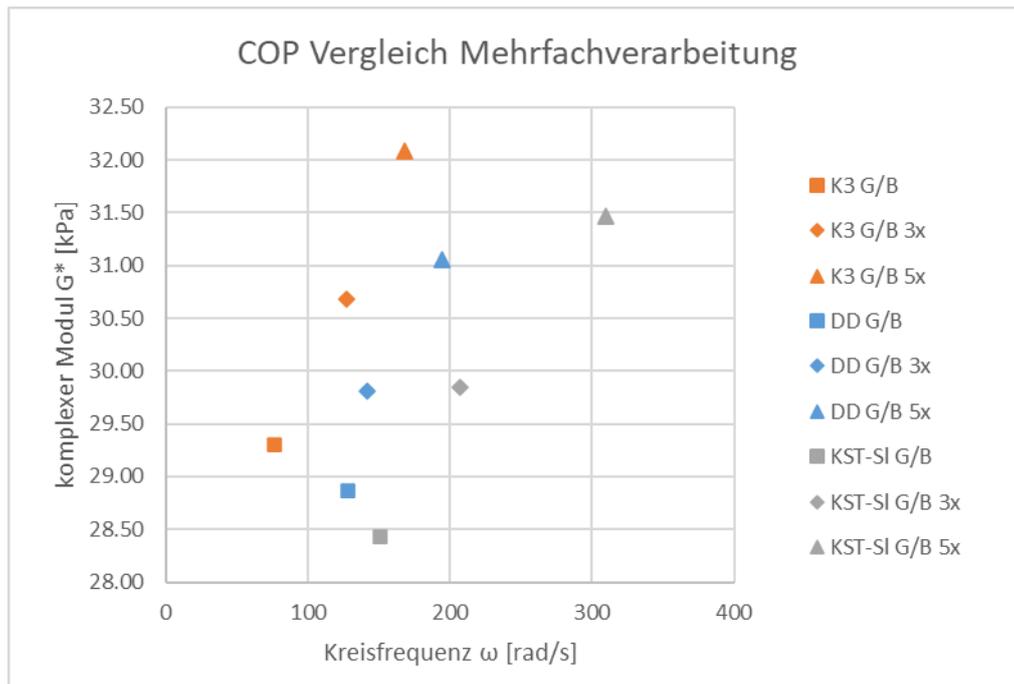


Abbildung 28: COP Vergleich Mehrfachverarbeitung

Auch in Abbildung 29, welche den Vergleich nach dem Formgebungsverfahren darstellt, fehlt ein Datenpunkt, da bei der Serie KST-SI G/B2 SG kein Schnittpunkt zu Stande kam.

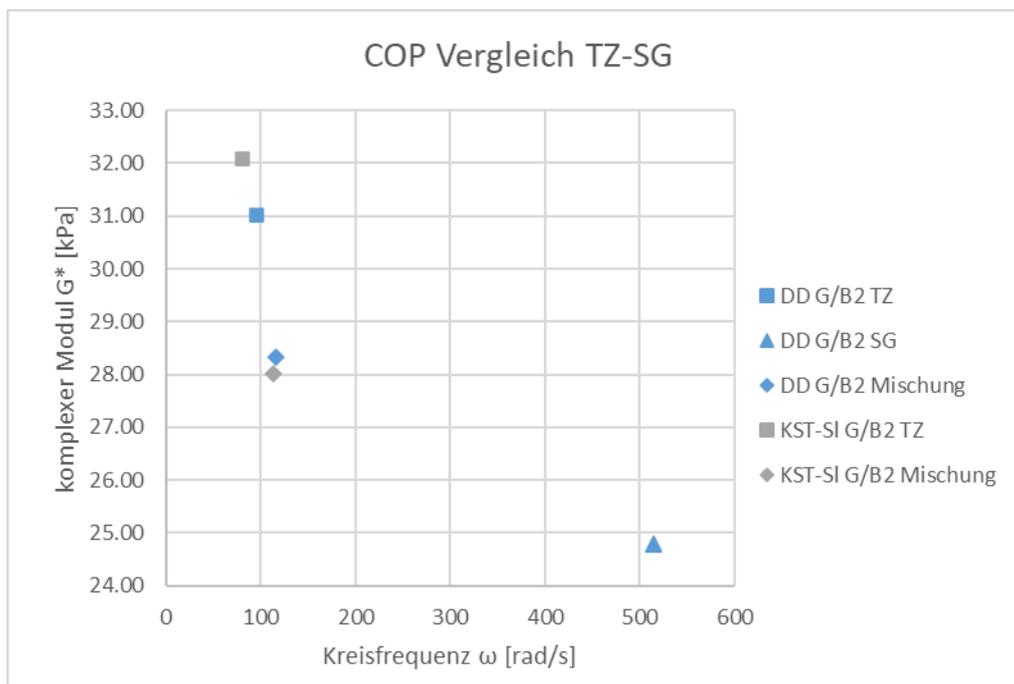


Abbildung 29: COP Vergleich TZ-SG

Es ist erkennbar, dass auch das spritzgegossene direktbedruckte Material bis zu sehr hohen Kreisfrequenzen viskoses Verhalten zeigt. Außerdem zeigt sich, dass das Beimischen von Spritzgussmaterial den COP der Mischungen deutlich nach unten verschiebt im Vergleich zu

Ergebnisse

den TZ Serien, also zu einer weiteren Molmassenverteilung führt. Zudem werden die COPs dadurch etwas nach rechts verschoben, also die Verkettungen kürzer [4, 24]. Diese Auswirkung ist im Vergleich jedoch eher gering. Bei einem Blick auf Abbildung 30 ist deutlich erkennbar, dass die beiden spritzgegossenen Serien eine niedrigere komplexe Viskosität aufweisen und die Mischungen sich jeweils dazwischen anordnen. Der Spritzgussanteil von ca. 30% bzw ca. 20% in den Mischungen führt dazu, dass die komplexen Viskositäten weiterhin in Größenordnungen der tiefgezogenen Materialien fallen.

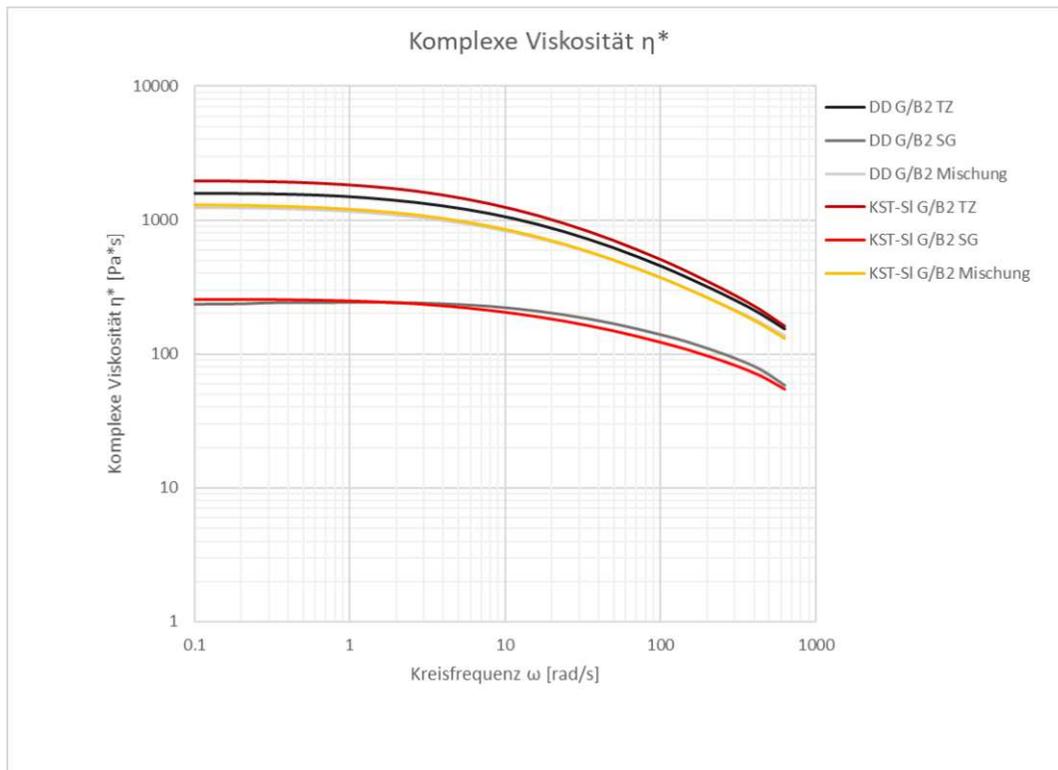


Abbildung 30: Komplexe Viskosität Vergleich TZ-SG

5.1.2 Melt-Flow-Rate

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 erwähnt wurde die MFR der Materialien mehrmals bestimmt. Einerseits in Flake-Form und andererseits als Rezyklat. Die Ergebnisse davon sind in Tabelle 7 zu sehen. Da die mehrfachverarbeiteten Serien nicht mehr als Flakes vorliegen können, finden diese sich ausschließlich in der Spalte *Rezyklat* wieder. Wo keine Standardabweichung eingetragen ist, konnte aufgrund zu niedriger Viskosität nur eine Probe unter den in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Bedingungen abgeschlagen werden.

Tabelle 7: Ergebnisse MFR

	Flakes	Rezyklat
Bezeichnung	MFR [g/10min]	MFR [g/10min]
DD G/B	10.90 ± 0.74	11.56 ± 0.29
DD G/B 3x	-	13.97 ± 0.21
DD G/B 5x	-	16.40 ± 0.65
K3 G/B	8.35 ± 0.68	9.88 ± 0.28
K3 G/B 3x	-	10.44 ± 0.16
K3 G/B 5x	-	13.33 ± 0.20
KST-SI G/B	15.13 ± 0.32	14.47 ± 0.20
KST-SI G/B 3x	-	18.40 ± 0.56
KST-SI G/B 5x	-	25.81 ± 0.89
IML G/B	53.66 ± 8.64	62.95 ± 3.70
Unbedruckt G/B	32.14 ± 6.10	29.99 ± 1.37
Mischung G/B	15.82 ± 1.18	12.90 ± 0.21
DD RM	6.06 ± 0.08	7.63 ± 0.09
K3 RM	5.80 ± 0.21	8.39 ± 0.63
KST-SI RM	14.90 ± 0.96	11.86 ± 0.28
Mischung RM	8.29 ± 0.17	8.07 ± 0.15
DD G/B2 TZ	6.44 ± 0.06	9.96 ± 0.14
DD G/B2 SG	53.75 ± 8.26	74.00
DD G/B2 Mischung	12.21 ± 1.12	10.79 ± 0.13
KST-SI G/B2 TZ	10.02 ± 1.57	7.69 ± 0.11
KST-SI G/B2 SG	65.95	72.88
KST-SI G/B2 Mischung	14.25 ± 0.91	10.99 ± 0.14
IML G/B2	71.61	76.67
IML G/B2 3x	-	104.00
IML G/B2 5x	-	131.41

Es ist erkennbar, dass die Standardabweichung bei den Flakes fast in allen Serien über der des Rezyklats liegt. Das ist auf die Homogenisierung des Materials während der Extrusion und des anschließenden Mahlens zurückzuführen. Die spritzgegossenen Materialien haben eine deutlich höhere MFR als tiefgezogene Materialien. Dies ist auf die Nutzung von

Ergebnisse

niedrigviskosem PP für Spritzgussanwendungen zurückzuführen [4]. Das zeigen einerseits die sehr hohen Werte von 62,95 g/10min von IML G/B bzw. 76,67 g/10min von IML G/B2, welche durchgängig spritzgegossen wurden. Andererseits auch durch die MFR von 29,99 g/10min des unbedruckten Materials, welches zu ca. 60% aus Spritzgussmaterial bestand. Hier ist anzumerken, dass die 40% TZ-Material die MFR möglicherweise senkten, oder Spritzgussanwendungen mit geringer MFR vorhanden waren. Selbiges zeigt sich auch bei Betrachtung der DD Serien. Während in DD RM ausschließlich tiefgezogenes Material vorhanden war, war in der DD G/B ca. 19% spritzgegossenes Material vorhanden. Die Werte von 7,63 g/10min (RM) bzw. 11,56 g/10min (G/B) zeigen diesen Unterschied. Bei den Kunststoff-Sleeve Serien, welche auch gemischt vorlagen gibt es keine großen Unterschiede. Hier war auch der Anteil von Spritzgussmaterial mit ca. 29% in KST-SL RM und ca. 32% in KST-Sl G/B sehr ähnlich. Die MFR der Serie Mischung G/B ist mit 12,9 g/10min um ca. 37% höher als die der Mischung RM. Auch dies lässt sich auf den Anteil an SG-Material von ca. 31% in Mischung G/B und ca 10% in Mischung RM zurückführen. Die Mischungsverhältnisse sind in Tabelle 3 in Kapitel 3.2.1 zu sehen. Der Vergleich nach Entsorgungsart ist in Abbildung 31 als Punktdiagramm dargestellt. Daraus wird die Heterogenität der Kunststoffströme sehr deutlich. So zeigen, die nach derselben Kategorie sortierten Stoffströme deutliche Abweichungen, je nach Entsorgungsstrom G/B bzw. RM. Es ist allerdings davon auszugehen, dass dies nicht an der Entsorgung selbst liegt, sondern an der unterschiedlichen Zusammensetzung der Stoffströme.

Ergebnisse

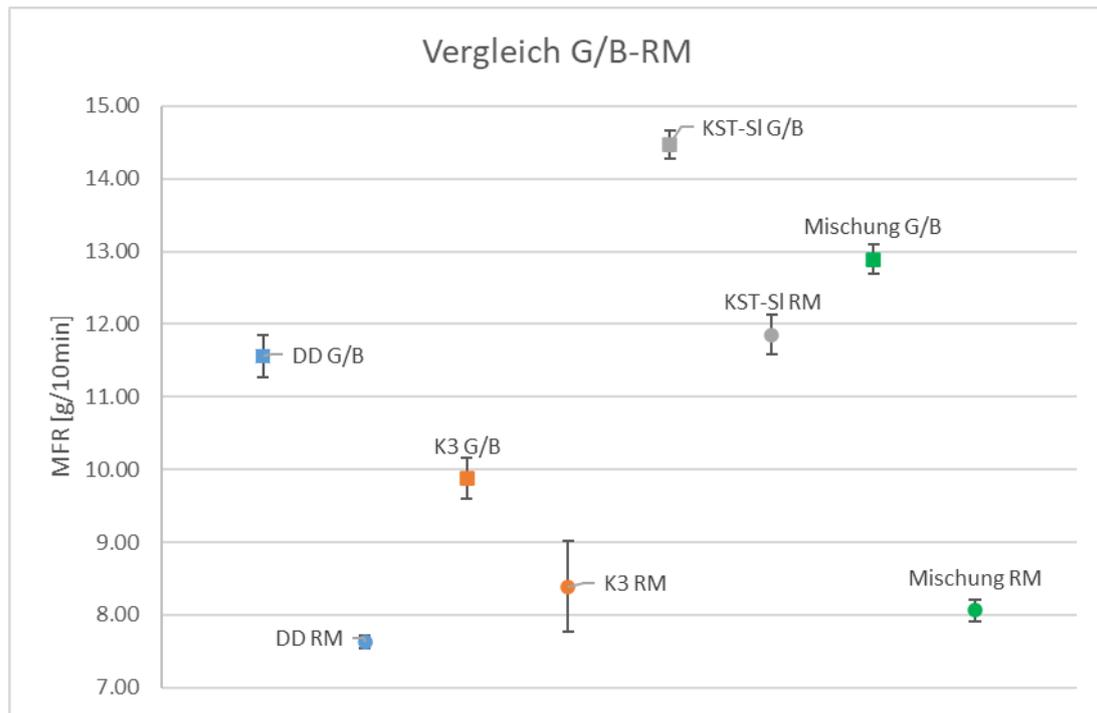


Abbildung 31: MFR Vergleich G/B-RM

Um diese Heterogenität zu minimieren wurde in der zweiten Charge der Fokus auf die Formgebung der Becher gelegt. Sowohl die Ergebnisse der Serien DD G/B2 TZ mit 9,96 g/10min und DD G/B2 SG mit 74,00 g/10min, als auch die der Serien KST-SI G/B2 TZ mit 7,69 g/10min und KST-SI G/B2 SG mit 72,88 g/10min zeigen deutlich, wie groß die Unterschiede aufgrund des Formgebungsverfahrens sind. Die Serie DD G/B2 Mischung kam auf eine MFR von 10,79 g/10min durch das Beimengen von 30,98% SG-Material. Dies entspricht einer Steigerung von ca. 8% im Vergleich zu DD G/B2 TZ. Außerdem kam die Serie KST-SI G/B2 Mischung, mit 21,3% SG-Material, auf eine MFR von 10,99 g/10min, was wiederum einer Steigerung von ca. 43% im Vergleich zu KST-SI G/B2 TZ entspricht. Auf die Erstellung eines Diagramms für den Vergleich TZ-SG wurde hier verzichtet, da die MFR des spritzgegossenen Materials beim Direktdruck um über 600% höher ist als die des tiefgezogenen Materials. Bei den Kunststoff Sleeves liegt der Unterschied bei über 800%. Die Werte können Tabelle 7 entnommen werden.

Bei den Serien, die dreifach bzw. fünffach verarbeitet wurden, ist in Abbildung 32 gut erkennbar, dass die MFR mit jeder Verarbeitung steigt. Vor allem beim KST-SI Material ist der Anstieg zwischen dreifacher und fünffacher Verarbeitung, von 18,40 g/10min auf 25,81g/10min, sehr stark. Das ist ein Hinweis darauf, dass die ursprüngliche Qualität des Materials abnimmt. Das kann auf den Verlust der Knäuelgestalt der Makromoleküle und in weiterer Folge den Kettenzerfall durch das wiederholte Erhitzen des Kunststoffs in Verbindung

Ergebnisse

mit dem Einwirken von Scherkräften zurückgeführt werden [4, 6, 29, 30]. Die IML Serien wurden in Abbildung 32 nicht aufgenommen, da sie mit MFRs von 76,67 g/10min (einfach), 104,00 g/10min (dreifach) und 131,41 g/10min (fünffach) nicht sinnvoll im selben Diagramm darstellbar waren. Aber auch hier zeigt sich, dass die MFR bei Mehrfachverarbeitung ansteigt.

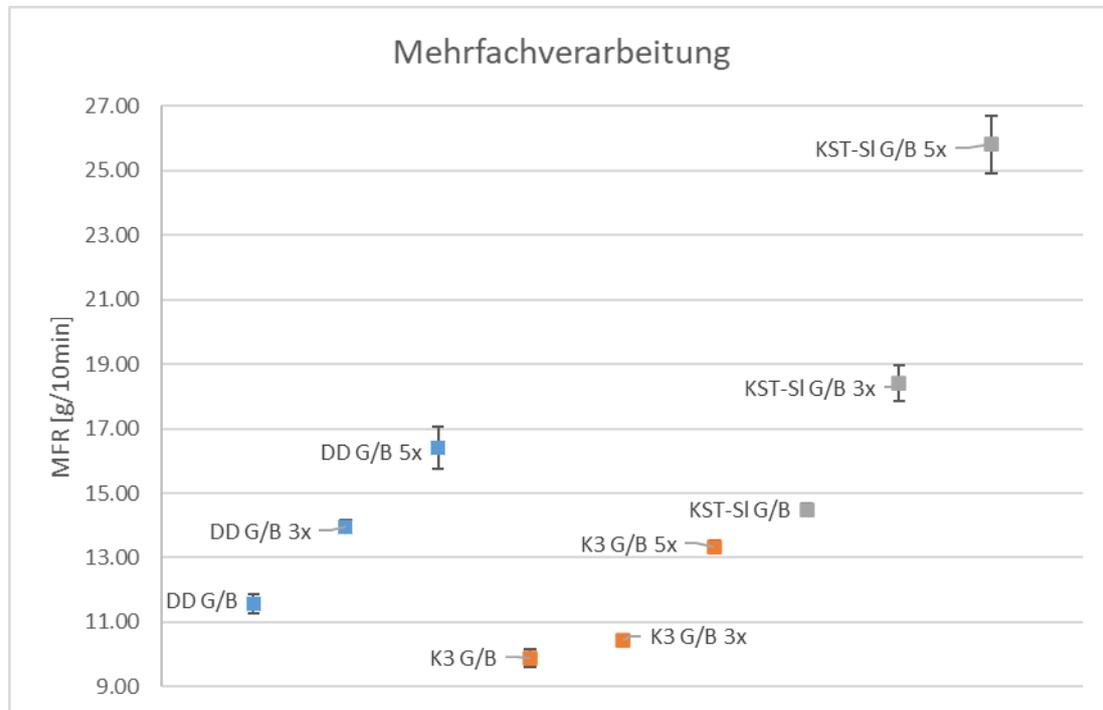


Abbildung 32: MFR Mehrfachverarbeitung

5.2 Mechanische Prüfung

5.2.1 Zugversuch

Als wichtigste Kennwerte wurden der E-Modul und die Bruchdehnung genauer betrachtet, weiters wurde die Zugfestigkeit ausgewertet. Jeweils der Mittelwert und die dazugehörige Standardabweichung sind Tabelle 11 im Anhang zu entnehmen.

Die Bruchdehnung im Vergleich nach der Art der Entsorgung ist in Abbildung 33 dargestellt. Vor allem beim Direktdruck ist die Bruchdehnung in der Restmüll Charge etwas höher als im gelben Sack. Auch die zugehörige Standardabweichung ist beim Restmüll um fast 3,5% niedriger. Beides spricht dafür, dass sich die ca. 19% Spritzgussanteil in der G/B-Charge negativ auf die Bruchdehnung des Rezyklats auswirken, da Spritzgussmaterial in der Regel kürzere Molekülketten aufweist [4]. Noch extremer ist dieser Unterschied bei den beiden Mischungen zu erkennen. Hier ist die Bruchdehnung in der Restmüll-Charge um ca 120% (absolut) höher als in der G/B-Charge. Außerdem steht eine Standardabweichung von 13,02%

Ergebnisse

der Mischung G/B, einer Standardabweichung von 1,88% der Mischung RM gegenüber. Die hohe Standardabweichung der Mischung G/B spricht für sehr heterogene Proben.

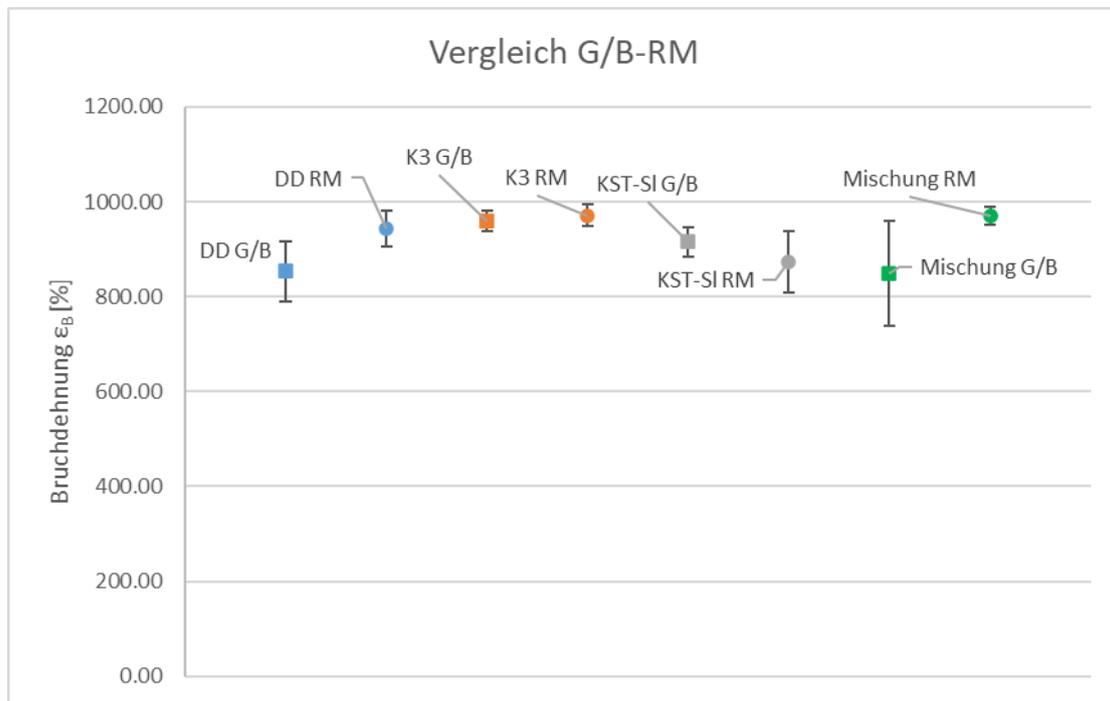


Abbildung 33: Bruchdehnung Vergleich G/B-RM

Des Weiteren ist der E-Modul im Vergleich nach Entsorgungsart in Abbildung 34 dargestellt. Der E-Modul der DD-RM Serie ist um ca. 50 MPa höher als in der DD-G/B Serie. Auch der E-Modul der Serie Mischung RM ist um ca. 60 MPa höher als jener der Serie Mischung G/B. In Anbetracht der hohen Werte des E-Moduls sind dies geringe Einbußen, trotzdem könnte der Unterschied auf den höheren Anteil an Spritzgussmaterial zurückzuführen sein. Während bei den Bruchdehnungen der K3 Serien kaum Unterschiede existieren, zeigt sich dies auch im E-Modul mit nur einem geringfügig höheren Mittelwert, doch berücksichtigt man die Standardabweichung, liegen sie im selben Bereich. Allerdings ist die Standardabweichung der K3 G/B Serie mit 5,13% eine der höchsten aller Serien. Bei den beiden Kunststoff-Sleeve Serien zeigt sich kein eindeutiger Trend. Während die Bruchdehnung der KST-SI G/B Serie, bei geringerer Standardabweichung, um 4,85% höher ist als jene der KST-SI RM Serie, zeigt sich bei Betrachtung des E-Moduls ein anderes Bild. Hier ist der E-Modul der KST-SI RM Serie um fast 100 MPa höher als jener der KST-SI G/B Serie. Wobei erwähnt werden muss, dass beide Serien eine Standardabweichung von fast 5% aufweisen.

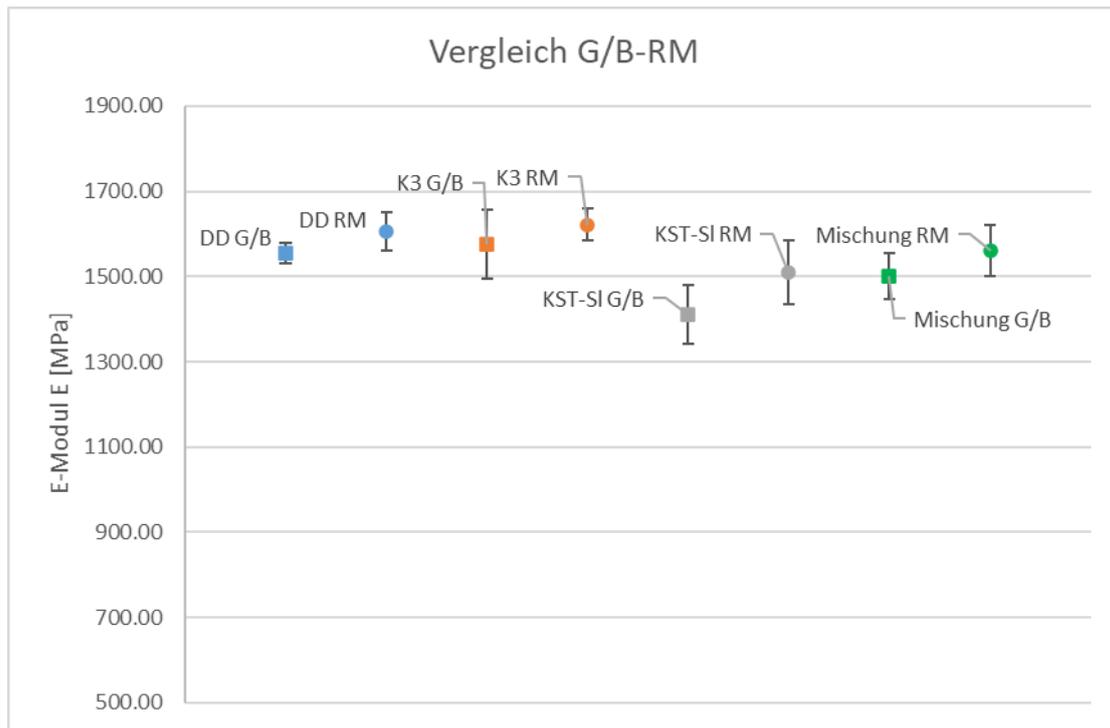


Abbildung 34: E-Modul Vergleich G/B-RM

Die Auswirkung der Mehrfachverarbeitung auf die Bruchdehnung des Rezyklats ist in Abbildung 35 dargestellt. Hier wird deutlich, dass die Standardabweichung der Bruchdehnung, also die Streuung zwischen den Prüfkörpern einer Serie bei mehrfacher Verarbeitung steigt. Während sich DD und KST-SI nach fünffacher Verarbeitung bei ca 15% Standardabweichung befinden, hat K3 mit 4,68% eine deutlich niedrigere Streuung. Da die Serie K3 G/B auch schon eine sehr niedrige Standardabweichung aufweist, könnte das auf einen homogenen Materialstrom zurückgeführt werden. Auch die Bruchdehnung selbst bleibt im Vergleich zu den anderen Kategorien bei K3 sehr konstant. Da die Werte der mehrfachverarbeiteten IML-Serien um ca. Faktor 100 niedriger sind wurden sie nicht mit in das Diagramm der Bruchdehnungen genommen. Allerdings ist zu erwähnen, dass die Bruchdehnung, auf einem niedrigen Niveau konstant geblieben ist. Die Standardabweichung der Bruchdehnung hat sich sogar von 28,92% nach der ersten Verarbeitung, auf 16,29% nach der fünften Verarbeitung verbessert. Die sinkende Bruchdehnung im Zuge der Mehrfachverarbeitung ist durch Kettenzerfall, und damit geringerem Molekulargewicht erklärbar [4, 6, 29, 30].

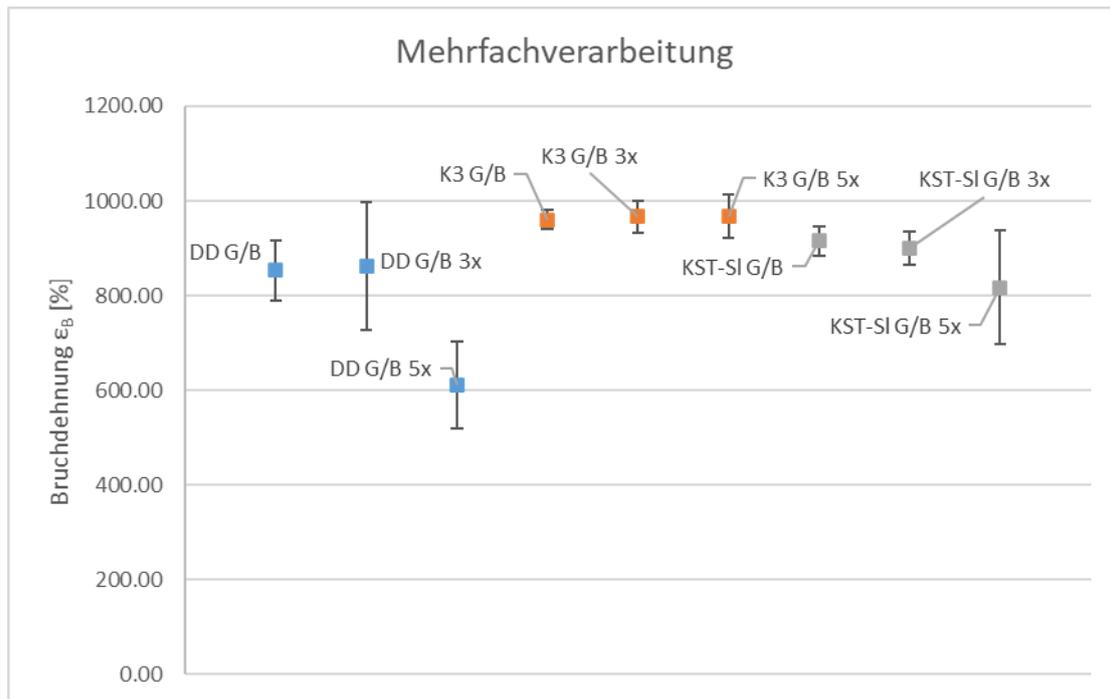


Abbildung 35: Bruchdehnung Mehrfachverarbeitung

In das Diagramm der E-Module wurden die IML-Serien inkludiert, da die Werte zwar die niedrigsten, aber vergleichbar, waren. Bei Betrachtung der E-Module und deren Standardabweichungen in Abbildung 36 fällt auf, dass nur in der DD G/B Serie die Standardabweichung im Laufe der Verarbeitungen steigt. Die anderen drei Materialien weisen nach der fünften Verarbeitung eine niedrigere Standardabweichung des E-Moduls auf als nach der ersten Verarbeitung. Besonders groß ist der Unterschied bei K3, von 5,13% nach der ersten Verarbeitung auf 2,62% nach der fünften Verarbeitung. Auffällig ist auch, dass bei K3, KST-SI und IML die Standardabweichungen nach der dritten Verarbeitung jeweils am niedrigsten sind. Der E-Modul selbst sinkt bei allen vier Kategorien im Laufe der Verarbeitungen. Nur in der IML Serie bleibt der E-Modul zwischen erster und dritter Verarbeitung konstant, bevor er dann wieder sinkt. Bei den anderen drei Kategorien sinkt der E-Modul kontinuierlich, wobei bei den KST-SI zwischen dritter und fünfter Verarbeitung nur ein Unterschied von ca. 13 MPa zu verzeichnen ist. Das Sinken des E-Moduls bei Mehrfachverarbeitung kann auf eine steigende Kristallinität des Materials im Zuge der Verarbeitungen zurückgeführt werden [30].

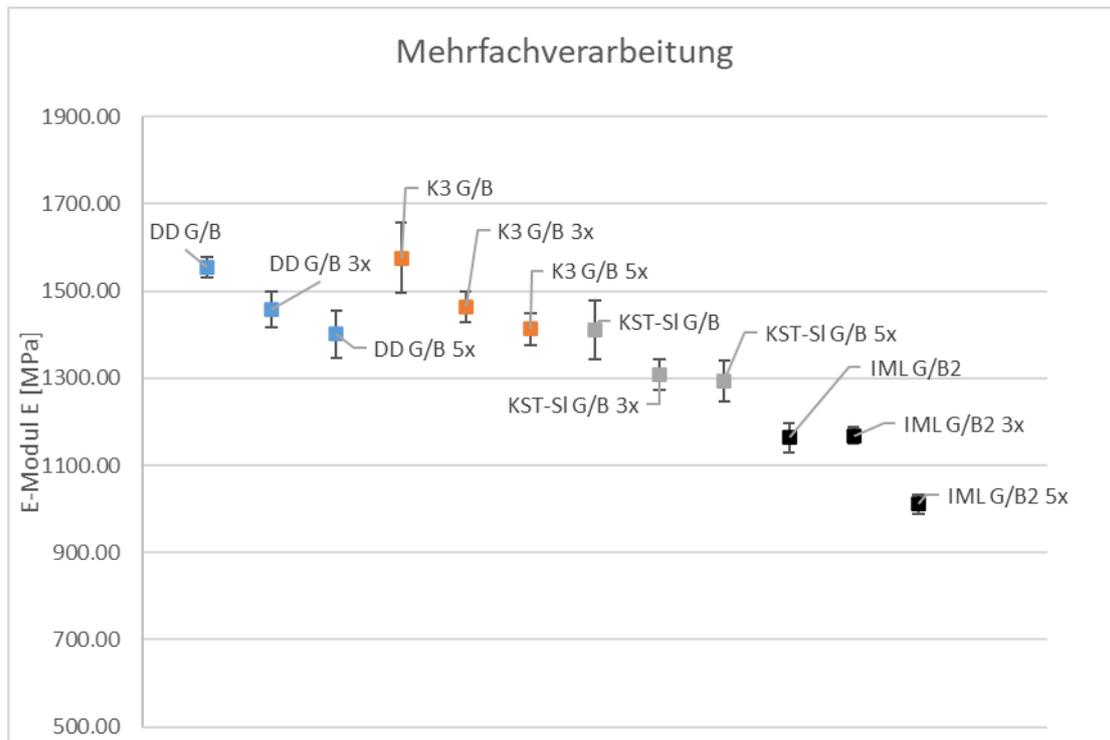


Abbildung 36: E-Modul Mehrfachverarbeitung

Die Unterschiede in der Bruchdehnung zwischen spritzgegossenem und tiefgezogenem Material sind in Abbildung 37 dargestellt. Sowohl bei DD als auch bei KST-SI sind die Ergebnisse mit je über 900% Bruchdehnung beim tiefgezogenen und unter 50% beim spritzgegossenen Material sehr eindeutig. Bei dem Material DD G/B2 SG wurde der Zugversuch mit einer zweiten Serie wiederholt, da die Ergebnisse der ersten Serie aufgrund zu hoher Streuung keine Rückschlüsse zuließen. Die Mischungen befinden sich jeweils auf einem hohen Niveau, und werden nur wenig beeinträchtigt durch den SG Anteil, von ca. 31% bei DD und ca. 21% bei KST-SI.

Ergebnisse

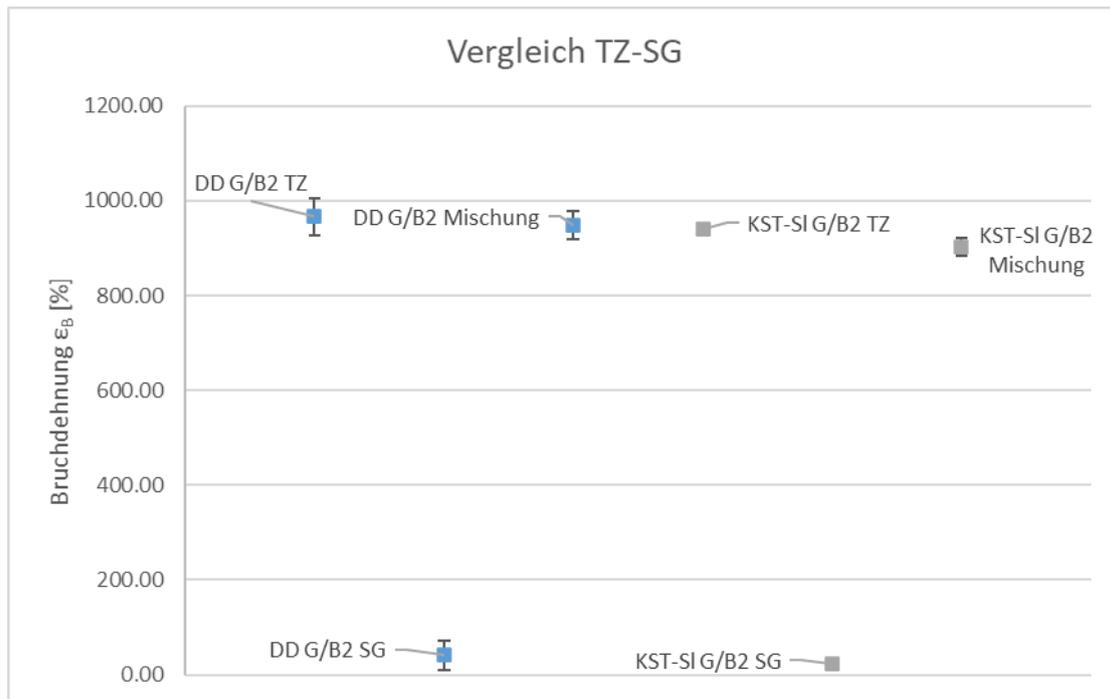


Abbildung 37: Bruchdehnung Vergleich TZ-SG

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Betrachtung der E-Module in Abbildung 38, wobei der Unterschied zwischen TZ und SG mit ca. 355 MPa beim Direktdruck und ca. 377 MPa beim Kunststoff-Sleeve Material nicht so ins Gewicht fällt. Allerdings war der Anteil des Spritzgussmaterials bei beiden Mischungen scheinbar zu gering um Bruchdehnung, oder die Standardabweichung dieser, wirklich negativ zu beeinflussen. Der Einfluss auf den E-Modul ist jedoch höher als auf die Bruchdehnung. Während die Bruchdehnung der Mischungen nur minimal an Dehnung einbüßt in Bezug auf die tiefgezogenen Materialien, wird der E-Modul geringfügig mehr beeinflusst mit ca. 118 MPa (KST-SI) und ca. 136 MPa (DD) niedrigeren Werten als bei den rein tiefgezogenen Materialien.

Ergebnisse

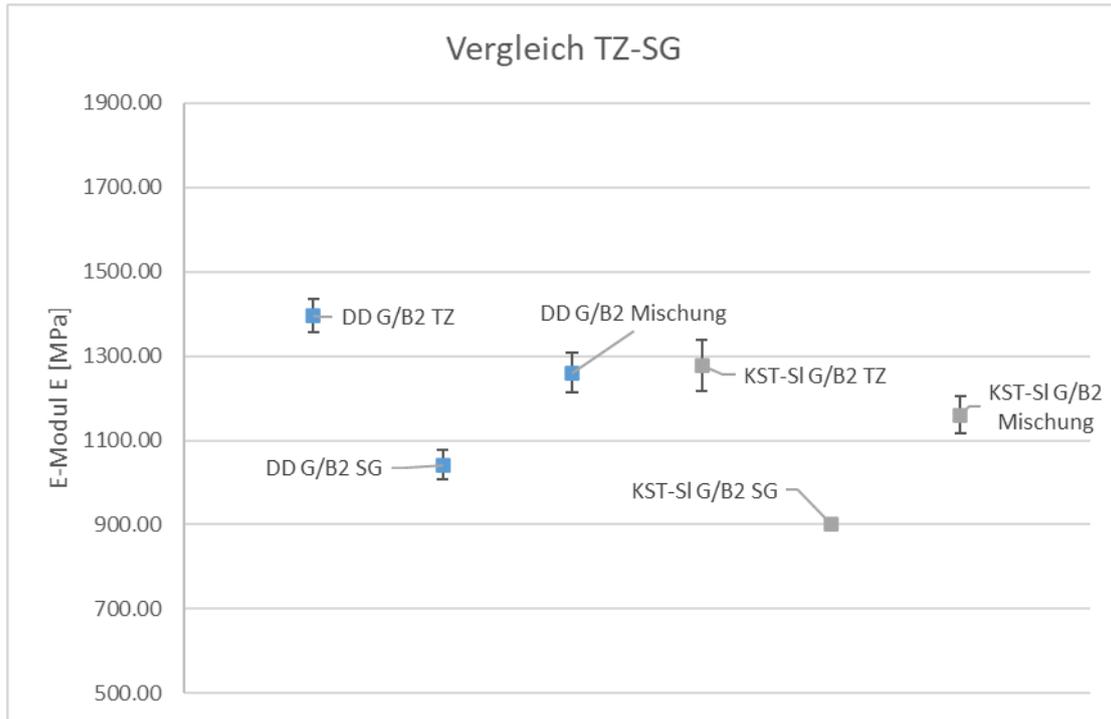


Abbildung 38: E-Modul Vergleich TZ-SG

5.2.2 Schlagzugversuch

Die Ergebnisse des Schlagzugversuchs für alle 25 Serien sind Tabelle 8 zu entnehmen. Insgesamt befinden sich die Schlagzugfähigkeitswerte aller Proben zwischen 26,22 kJ/m² und 69,53 kJ/m². Die geringste Schlagzugfähigkeit resultiert aus der Serie IML G/B2 5x. Schon nach der einfachen Verarbeitung hatte IML G/B2 den niedrigsten Ausgangswert, welcher durch die Mehrfachverarbeitung kontinuierlich weiter sinkt. Auch das unbedruckte Material liefert einen eher niedrigen Wert. Folglich haben die Serien mit den höchsten MFRs die niedrigsten Schlagzugfähigkeiten. Laut [31] besteht eine Korrelation zwischen den beiden Werten, wonach bei geringen mittleren molaren Massen, die MFR steigt und die Schlagzugfähigkeit sinkt. Den höchsten Wert erreicht KST-SI G/B2 TZ. Auch die anderen Kunststoff-Sleeve Serien erzielen, mit Ausnahme von KST-SI G/B2 SG, durchwegs hohe Werte.

Tabelle 8: Ergebnisse Schlagzugversuch

Bezeichnung	Schlagzugfähigkeit [kJ/m ²]
	a _{tN}
DD G/B	45.27 ± 4.46
DD G/B 3x	44.34 ± 3.05
DD G/B 5x	39.22 ± 2.90
K3 G/B	50.80 ± 4.11
K3 G/B 3x	34.26 ± 6.03
K3 G/B 5x	37.71 ± 2.86
KST-SI G/B	54.64 ± 5.00
KST-SI G/B 3x	51.93 ± 2.77
KST-SI G/B 5x	51.69 ± 2.63
IML G/B	39.78 ± 2.14
Unbedruckt G/B	41.21 ± 6.40
Mischung G/B	51.96 ± 4.81
DD RM	52.02 ± 2.36
K3 RM	49.19 ± 6.65
KST-SI RM	61.78 ± 4.00
Mischung RM	56.99 ± 4.40
DD G/B2 TZ	48.39 ± 3.41
DD G/B2 SG	48.08 ± 3.06
DD G/B2 Mischung	52.87 ± 4.82
KST-SI G/B2 TZ	69.35 ± 7.05
KST-SI G/B2 SG	44.80 ± 2.46
KST-SI G/B2 Mischung	63.05 ± 5.97
IML G/B2	32.54 ± 2.31
IML G/B2 3x	33.96 ± 2.59
IML G/B2 5x	26.22 ± 2.62

Die in Charge 1 durchgeführte Trennung nach der Art der Entsorgung ist in Abbildung 39 dargestellt. Einzig bei K3 kommt die G/B Serie auf eine höhere Schlagzugfähigkeit. Allerdings

Ergebnisse

ist die Standardabweichung von K3 RM mit 13.51% doch sehr hoch, was auf eine schlechte Homogenisierung hindeuten könnte.

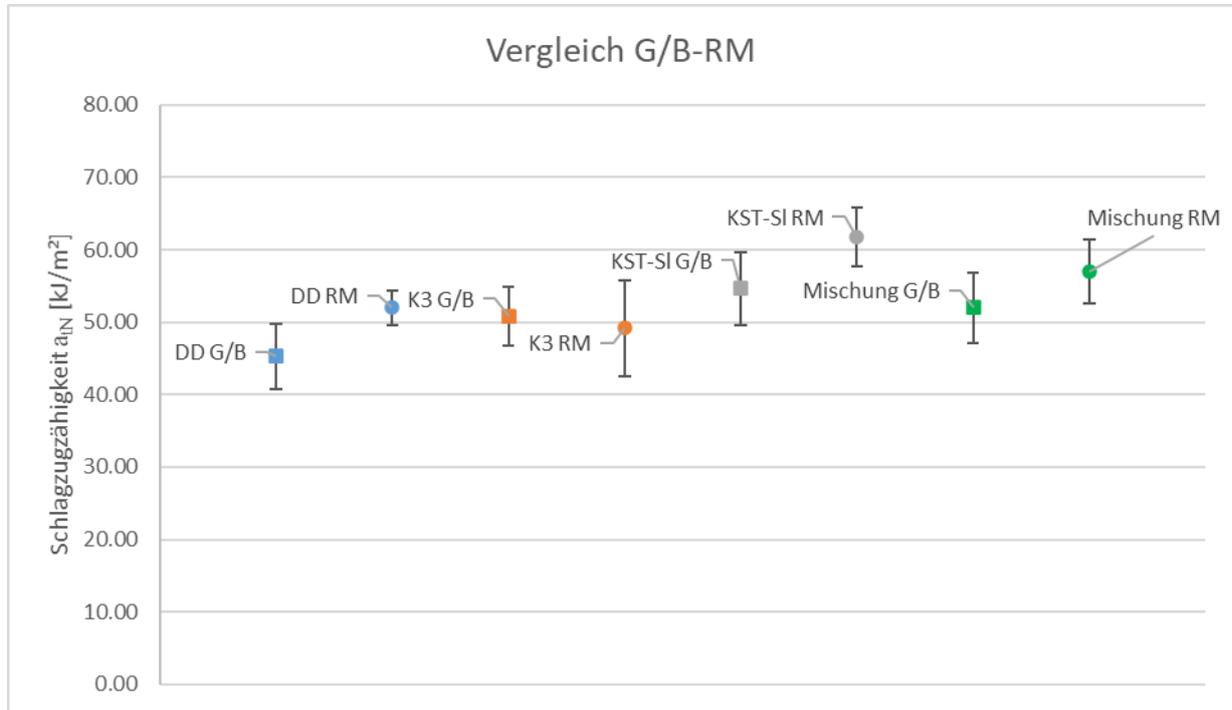


Abbildung 39: Schlagzug Vergleich G/B-RM

Die Ergebnisse der mehrfachverarbeiteten Serien sind in Abbildung 40 illustriert. Bei der Mehrfachverarbeitung nimmt die Schlagzugzähigkeit kontinuierlich ab, was auf den Kettenzerfall durch wiederholtes Erhitzen und Scherung des Werkstoffes zurückgeführt werden kann [4, 6, 29, 30]. Hier ist vor allem bei dem K3 Material ein großer Abfall von über 16 kJ/m² zwischen einfach und dreifach verarbeitetem Material zu erkennen, während die Zähigkeit dann sogar wieder zunimmt. Allerdings streuten die Werte bei der dreifach verarbeiteten K3 Serie sehr. Einzig beim IML Material nimmt die Standardabweichung zwischen erster und fünfter Verarbeitung minimal zu.

Ergebnisse

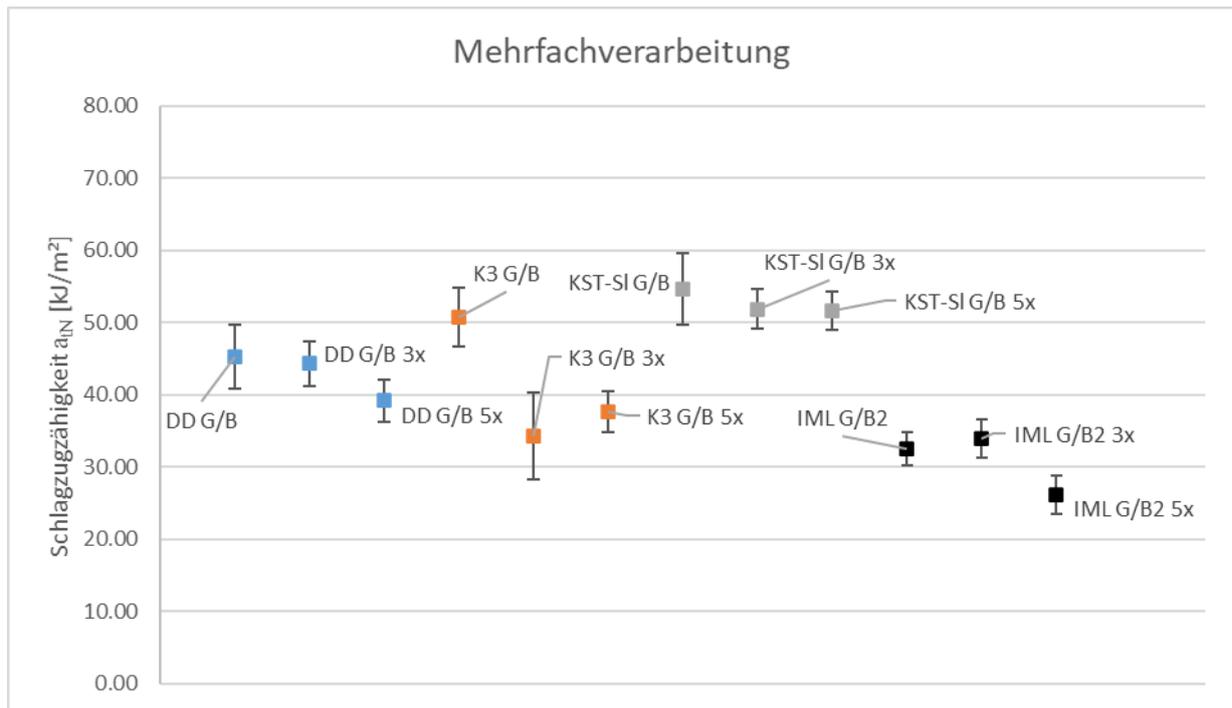


Abbildung 40: Ergebnisse Schlagzugversuch Mehrfachverarbeitung

Abbildung 41 zeigt, dass bei dem Material der Kunststoff Sleeve Becher ein großer Unterschied zwischen tiefgezogenem und spritzgegossenem Material besteht. Gleichzeitig ist der Unterschied bei dem direktbedruckten Material vernachlässigbar gering.

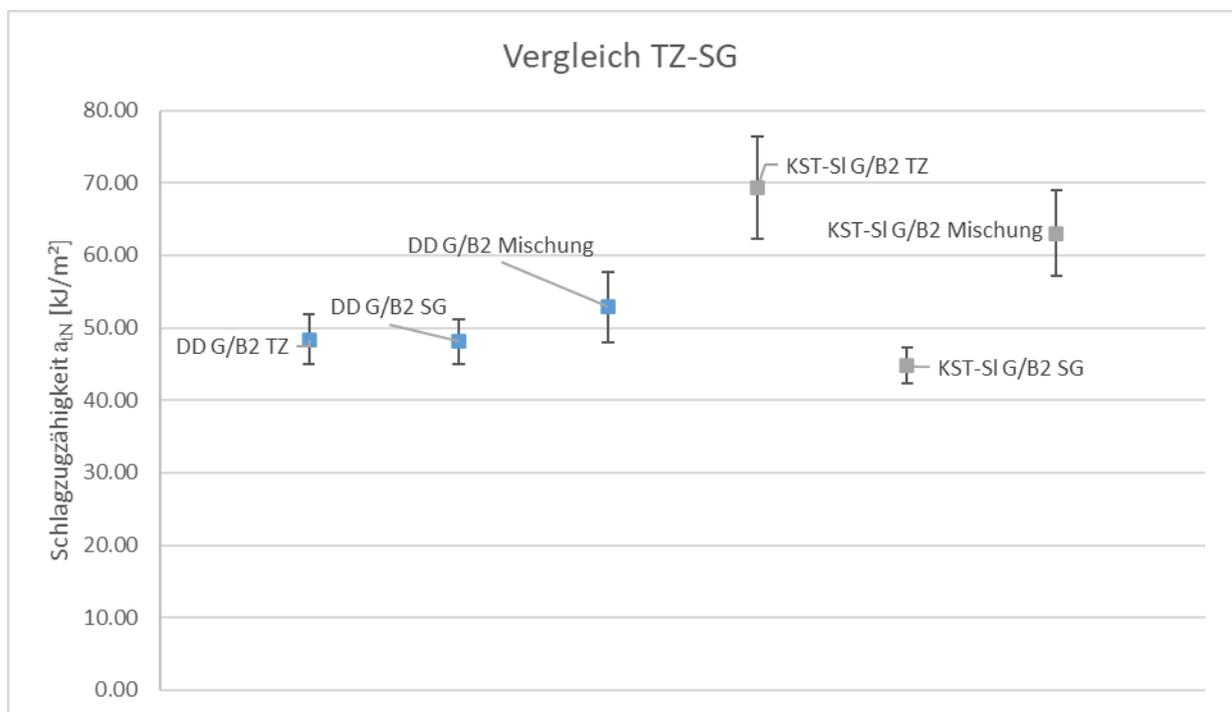


Abbildung 41: Schlagzug Vergleich TZ-SG

5.3 Thermoanalytische Prüfung

5.3.1 DSC

Die Schmelztemperaturen und die Kristallisationstemperaturen mit den jeweiligen Enthalpien können Tabelle 9 entnommen werden.

Tabelle 9: Ergebnisse DSC

Bezeichnung	Schmelztemperatur [°C]	Schmelzenthalpie [J/g]	Kristallisationstemperatur [°C]	Kristallisationsenthalpie [J/g]
	T_m	ΔH_m	T_c	ΔH_c
DD G/B	165.55	69.33	125.77	83.34
DD G/B 3x	165.94	65.18	125.46	78.56
DD G/B 5x	165.02	71.10	126.17	85.93
K3 G/B	167.32	72.60	128.72	88.23
K3 G/B 3x	166.12	76.20	129.56	91.92
K3 G/B 5x	165.41	77.30	130.76	93.61
KST-SI G/B	165.24	68.79	126.21	83.82
KST-SI G/B 3x	164.23	71.48	126.61	86.92
KST-SI G/B 5x	164.65	66.51	126.19	78.92
IML G/B	163.33	67.13	128.20	80.12
Unbedruckt G/B	160.67	42.85	125.44	72.43
Mischung G/B	165.42	66.52	127.05	81.77
DD RM	166.62	67.88	125.35	80.35
K3 RM	166.25	71.65	127.49	87.10
KST-SI RM	164.96	72.00	125.79	87.20
Mischung RM	166.14	70.42	126.80	86.10
DD G/B2 TZ	166.03	74.96	125.71	83.29
DD G/B2 SG	162.15	60.87	127.03	72.13
DD G/B2 Mischung	164.70	72.82	126.39	83.72
KST-SI G/B2 TZ	164.46	79.57	126.38	89.55
KST-SI G/B2 SG	163.10	60.01	123.35	71.02
KST-SI G/B2 Mischung	165.01	68.55	126.34	76.41
IML G/B2	163.84	74.80	127.60	81.68
IML G/B2 3x	163.73	65.81	127.91	75.18
IML G/B2 5x	163.73	67.79	128.00	79.77

Die DSC ergab außerdem, dass es sich bei allen Fraktionen um sehr reines PP handelt, da keine zusätzlichen Peaks auffindbar waren. Weiters liegen die Schmelztemperaturen zwischen 160,67°C und 167,32°C was für PP üblich ist. Als Beispiel sind in Abbildung 42 die Kurven der Serien DD G/B 3x, K3 G/B 3x und KST-SI G/B 3x inklusive der Schmelz- und Kristallisationstemperaturen angegeben.

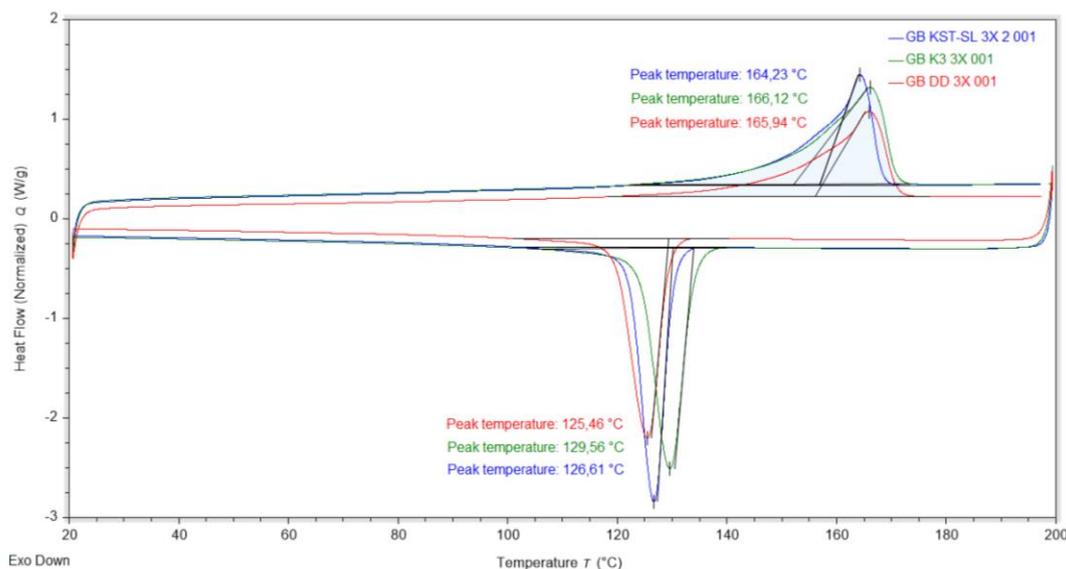


Abbildung 42: DSC Analyse Beispiele

5.4 Umfrage

Ein Ausdruck der Umfrage ist im Anhang zu sehen. Von den 52 Teilnehmenden waren 35 männlich und 17 weiblich. Alle teilnehmenden Personen sind zwischen 1993 und 2004 geboren. Die Verteilung des höchsten Bildungsgrades der teilnehmenden Personen ist in Abbildung 43 zu sehen. Bei 32 Personen war der höchste Bildungsgrad die Matura, während jeweils neun Personen schon einen Bachelor oder Master/Magister/Diplomingenieur hatten. Bei lediglich zwei der teilnehmenden Personen wurde Hauptschule oder AHS Unterstufe angegeben.

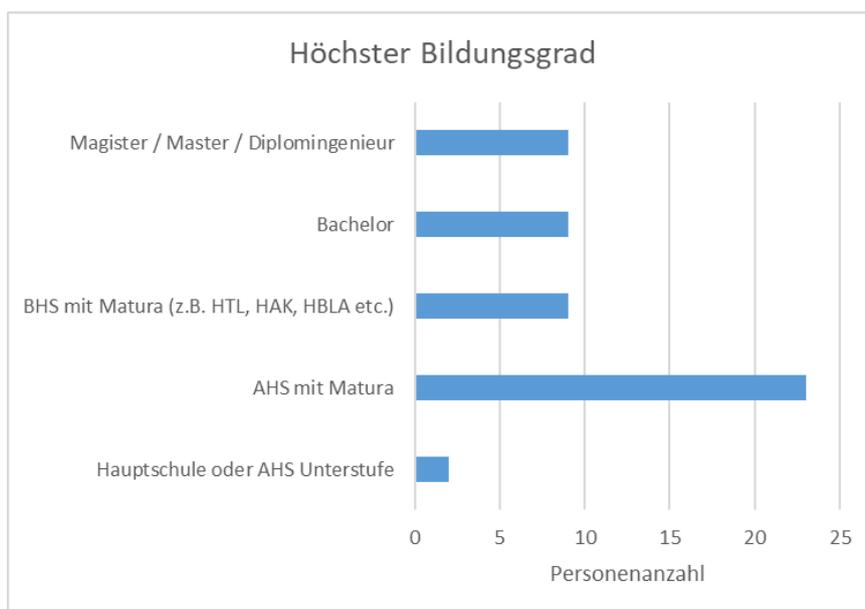


Abbildung 43: Höchster Bildungsgrad der teilnehmenden Personen

Ergebnisse

Die am häufigsten vertretenen Studienrichtungen waren Technische Chemie mit 23 Personen gefolgt von Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau mit zehn und Maschinenbau mit acht. Die sonstigen TU-Studienrichtungen waren Verfahrenstechnik, Informatik, Materialwissenschaften und Biomedical Engineering. Nur eine teilnehmende Person war nicht an der TU inskribiert.

Von den 52 teilnehmenden Personen haben nur zwei explizit die Formgebung, also Spritzgießen und Tiefziehen, als Unterschied zwischen den beiden Bechern erwähnt. Weitere 15 Personen nahmen in ihren Antworten Bezug auf mögliche Unterschiede im Material wie Härte oder Wandstärke. 37 der 52 Teilnehmenden haben in ihren Antworten die Beschriftungen bzw. Symbole am Boden der Becher erwähnt.

Als Durchschnittsantwort (Skala von 1-5 (1 sehr unwahrscheinlich/5 sehr wahrscheinlich)) auf die Frage „Auf dem Boden der Becher siehst du einige kleine Zeichen. Würdest du diese zur Hilfe nehmen, um sie einem bestimmten Abfallbehälter zuzuordnen?“ wurde 2,63 angegeben. Auf die Folgefrage „Wie sinnvoll würdest du eine Trennung anhand dieser Symbole finden?“, mit 1 als gar nicht sinnvoll und 5 als sehr sinnvoll, war die Durchschnittsantwort 3,17, also eine stärkere Tendenz in Richtung, dass es für eher sinnvoll gehalten wird.

Die Antwort auf die Frage nach der Entsorgung der beiden Becher im eigenen Haushalt ist in Abbildung 44 zu sehen. Die Mehrheit der teilnehmenden Personen würden die Becher in den Leichtverpackungen entsorgen, weitere zehn Personen im Restmüll und nur eine Person im Bio-Müll.

● Im Restmüll	10
● In den Leichtverpackungen	41
● Im Altpapier	0
● Im Bio-Müll	1
● Im Altglas Container	0

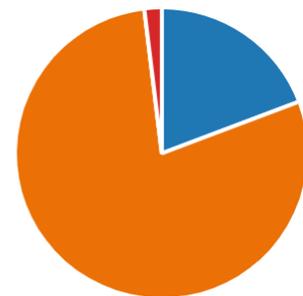


Abbildung 44: Antwort auf die Frage: Die zwei Becher die du nun schon näher betrachtet hast, wo würdest du diese in deinem Haushalt entsorgen?

Die Folgefrage „Wusstest du, dass seit 01.01.2023 Kunststoffe in Wien anders gesammelt werden?“ wurde im Zusammenhang mit der Umstellung des Plastiksammelsystems in Wien bzw. Österreich gestellt. Seit 01.01.2023 werden alle Kunststoffverpackungen in der gelben Tonne gesammelt [32]. 29 der teilnehmenden Personen haben diese mit „Ja“ beantwortet. Von

Ergebnisse

den Personen die mit „Nein“ geantwortet haben, hat eine angegeben aus Deutschland zu kommen und eine weiter nicht in Wien zu wohnen. Von den elf Personen, die die Becher nicht in den Leichtverpackungen entsorgen würden, haben zwei angegeben, dass sie wissen, dass Kunststoffe in Wien jetzt anders gesammelt werden. Daraus lässt sich schließen, dass die Dringlichkeit des Themas Recycling noch nicht weitgehend bekannt ist, und besser kommuniziert werden muss. Umgekehrt, haben 14 der 41 Personen, die die Becher in den Leichtverpackungen entsorgen würden angegeben, dass sie nicht über die Änderung in der Sammlung der Kunststoffe Bescheid wissen. Daraus kann hingegen geschlossen werden, dass vor allem bei jüngeren bildungsnahen Bevölkerungsgruppen das Trennen von Kunststoffen von anderen Abfällen zum Allgemeinverständnis gehört.

Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass es durchaus möglich wäre genauere Kunststofftrennung in Österreich durchzuführen, wenn darauf hingewiesen wird auf die Recyclingcodes zu achten. Allerdings wäre mit hoher Wahrscheinlichkeit eine ausgedehnte Kampagne von Nöten, um dies gut zu kommunizieren und den Menschen die Sinnhaftigkeit klarzumachen. Trotzdem wäre eine Teilnahme der Personen nicht gesichert. Des Weiteren stellt die durchgeführte Umfrage, vor allem in Bezug auf Bildung einen nicht repräsentativen Querschnitt der Bevölkerung Österreichs dar. Es ist also fraglich, ob das Verständnis für so eine Umsetzung auch bei Menschen aus anderen Bildungsschichte, Altersklassen, etc. Anklang finden würde. Außerdem werden bei Umfragen oft sozial erwünschte Antworten gegeben, während bei einem Feldexperiment das tatsächliche Verhalten beobachtet werden kann [18].

6. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es Post-Consumer Polypropylen Abfälle in Form von Bechern zu recyceln und sie dabei sowohl nach der Entsorgungsart, als auch, nach der Art der Dekoration zu kategorisieren. Das wurde gemacht um herauszufinden, ob die verschiedenen gängigen Dekorationsarten einen Einfluss auf die Qualität des Rezyklats haben. Um eben diese Qualität zu testen, wurden mechanische und rheologische Prüfverfahren, sowie eine thermische Analyse, mit Hinblick auf Verunreinigungen durch andere Polymere, durchgeführt. Weiters wurde eine Mehrfachverarbeitung durchgeführt, um mögliche Auswirkungen davon erfassen zu können. Die Kategorisierung ergab 25 zu testende Fraktionen, die sich aus zwei Chargen zusammensetzten.

Erste Charge: Beim Vergleich der verschiedenen Dekorationsvarianten ergaben sich vor allem bei Direktdruck (DD), Karton-Kunststoff-Kombination (K3), Kunststoff-Sleeve (KST-SI) und auch den Mischungen sowohl in der gelben Sack Fraktion (G/B), als auch in der Restmüll Fraktion (RM) keine großen Unterschiede mit Blick auf die mechanischen Eigenschaften. Zwei weitere Fraktionen, die nur im gelben Sack vorhanden sind, sind In-Mold (IML) und Unbedruckt. Hierbei zeigt die unbedruckte Fraktion mit 60% Spritzgussanteil sehr ähnliche Bruchdehnungen wie die anfangs genannten Fraktionen. Im Gegensatz dazu fällt die IML-Fraktion, welche nur aus Spritzguss (SG) besteht, ganz eindeutig ab hinsichtlich der Bruchdehnung. Dies ist durch die für Spritzgussmaterial gewünschten Eigenschaften zu erklären. Mit Blick auf die rheologischen Tests ergeben sich ähnliche Schlussfolgerungen. Die Serien mit dem höchsten Anteil an Spritzgussmaterial zeigen deutlich andere Eigenschaften, in dem Fall niedrigere Viskositäten. So zeigen die Fraktionen mit keinem oder wenig Spritzgussanteil die höchsten Viskositäten. Darauf folgt die Unbedruckt Serie mit einem relativ hohen Anteil an Spritzguss und IML zeigt eindeutig die niedrigste Viskosität. Wiederum sind die Ergebnisse von DD, K3, KST-SI und den Mischungen vergleichbar, wobei K3 nach beiden Entsorgungsarten die höchste Viskosität aufweist. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass es sich bei K3 Material ausschließlich um sehr dünnwandige, tiefgezogene Becher handelt. Für die Formgebung ist also eine hohe Viskosität erforderlich.

Der Vergleich derselben Dekorationsvarianten nach den beiden Entsorgungsvarianten, also Restmüll und gelber Sack ergab keine großen Unterschiede. Sowohl bei den rheologischen, als auch bei den mechanischen Prüfverfahren schnitten die Restmüll-Fraktionen meistens eine

Zusammenfassung

Spur besser ab. Das kann aber mit großer Wahrscheinlichkeit dem höheren Anteil an Spritzgussmaterial in den Fraktionen aus dem gelben Sack zugeschrieben werden, und nicht der Entsorgungsart. Da beide Fraktionen gewaschen wurden und äußerlich kaum Verschmutzungen aufwiesen, kann daraus geschlossen werden, dass die höhere Kontamination in Folge der Entsorgung im Restmüll, bei entsprechender Reinigung, keine Auswirkungen auf die mechanischen und rheologischen Eigenschaften hat. Allerdings ist die Verschmutzung der Becher auch bei Entsorgung im gelben Sack oft enorm. Dies ist in Abbildung 45 anhand von IML-Bechern aus der 2. Charge zu sehen.



Abbildung 45: Verschmutzte Becher aus dem gelben Sack (2. Charge)

Mehrfachverarbeitung: Nachdem die ersten Tests vollständig durchgeführt wurden, wurden die Serien DD G/B, K3 G/B und KST-SI G/B noch dreifach bzw. fünffach verarbeitet und mechanische, rheologische und thermische Tests wurden durchgeführt. Ergänzt wurde dieser Teil der Mehrfachverarbeitung durch In-Mold Material, welches zum Zweck der Mehrfachverarbeitung berücksichtigt wurde. Also wurde auch die Serie IML G/B2 dreifach bzw. fünffach verarbeitet, um zu sehen ob die niedrigen Werte über mehrere Zyklen konstant bleiben. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass bei allen vier Fraktionen die Viskosität im Laufe der Verarbeitungszyklen abnahm. Auch die mechanischen Eigenschaften zeigten eine ähnliche Entwicklung und Bruchdehnung, E-Modul, Zugfestigkeit und Schlagzugzähigkeit nahmen im Laufe der Verarbeitungen ab. Einzig die Bruchdehnung der K3 Serien blieb im Laufe der Verarbeitungszyklen konstant. Und auch die Schlagzugzähigkeit der KST-SI Serien blieb im Vergleich relativ konstant.

Zweite Charge: Nachdem die Becher in der ersten Charge zusätzlich zu der Trennung nach Dekorationsvariante auch noch nach der Entsorgungsart sortiert wurden, wurde aufgrund der Erkenntnisse aus der ersten Charge, in der zweiten Charge der Fokus auf die Formgebung gelegt. Neben dem schon erwähnten IML-Material für die Mehrfachverarbeitung wurde weiteres DD-Material und KST-SI-Material gesammelt und nach der Formgebung getrennt. Die Ergebnisse zeigen deutlich, welchen Einfluss die Formgebung auf die Materialeigenschaften hat. In den mechanischen Prüfverfahren war dieser Einfluss auf die Bruchdehnung am eindeutigsten, während die Schlagzugzähigkeit der beiden DD Serien in etwa gleich war. Die rheologischen Tests ergaben, dass die Viskosität des SG Materials wie erwartet deutlich niedriger ist als die des tiefgezogenen Materials. Über alle Tests hinweg schnitten die beiden Mischungen aus SG und TZ zwar schlechter ab als das rein tiefgezogene Material, wurden aber nicht allzu negativ beeinflusst.

Umfrage: Da die mechanischen Ergebnisse gezeigt haben, dass eine Trennung der Polypropylenabfälle nach Formgebungsverfahren Sinn machen könnte, um die angestrebten Werkstoffeigenschaften von tiefgezogenem und spritzgegossenem Material zu behalten, wurde eine Umfrage durchgeführt. Ziel war es zu überprüfen, ob den teilnehmenden Personen der Unterschied zwischen zwei nahezu identischen Bechern, von denen einer spritzgegossen und einer tiefgezogen ist auffällt. Da der eindeutigste Hinweis darauf der Anguss am Boden des spritzgegossenen Bechers ist, wurden die Teilnehmenden darauf hingewiesen sich auf das untere Drittel des Bechers zu konzentrieren. Die Ergebnisse zeigen, dass die Formgebung fast niemandem auffällt, während die Unterschiede an den Recyclingcodes und andere Zeichen am Boden der Becher dem Großteil der teilnehmenden Personen aufgefallen sind. Daraus lässt sich schließen, dass durchaus Potential in der Nutzung der Recyclingcodes als Grundlage für die Trennung von Plastikmüll liegt.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Unterschiede in der Qualität des Polypropylen-Rezyklats, basierend auf einer Fraktionierung nach Dekorationsvarianten vernachlässigbar gering sind. Voraussetzung dafür ist natürlich, dass etwaige Sleeves von den Konsument_innen oder einer gut funktionierenden Windsichtung entfernt wurden. Einzige Ausnahme ist die In-Mold Dekorationsvariante, da es sich hierbei um ein Spritzgussverfahren handelt. Die Unterschiede in den restlichen Fraktionen sind auch größtenteils auf den Anteil an Spritzgussmaterial zurückzuführen. Eine ähnliche Aussage kann über die Unterschiede zwischen den beiden Entsorgungsarten getroffen werden. Die weiterführenden Tests in der

Zusammenfassung

zweiten Charge haben die Ergebnisse bezüglich des Einflusses des Spritzgussmaterials bestätigt.

7. Ausblick und Fazit

Die Kombination von den vielen Vorteilen, die mit der Nutzung von Polypropylen als Verpackungsmaterial einhergehen und dem zunehmenden Knappwerden der Ressourcen bei gleichzeitig steigendem Konsum weltweit zeigt, wie wichtig Recycling in Zukunft sein wird. Um Rezyklate als Standardwerkstoffe zu etablieren muss nicht nur gezeigt werden, dass Polypropylen wirtschaftlich recycelt werden kann, sondern auch, dass die Werkstoffeigenschaften des Rezyklats gut genug sind um nicht von Downcycling sprechen zu müssen. Ein möglicher Schritt in diese Richtung kann das genauere Trennen der Polypropylenabfälle sein. Diese Arbeit hat gezeigt, dass die Dekoration der Becher keinen signifikanten Einfluss auf die Qualität des Rezyklats hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften hat, während der Einfluss der ursprünglichen Formgebung des Bechers immens ist. Da je nach Formgebungsvariante grundsätzlich verschiedene Materialeigenschaften gefordert sind, könnte es Sinn machen das Polypropylen anhand dieser zu trennen, um diese Eigenschaften zu erhalten. Weiters ist noch mehr Forschung nötig, um zu ermitteln ab welchem Mischungsverhältnis sich das Spritzgussmaterial signifikant negativ auf die Eigenschaften des tiefgezogenen Materials auswirkt. Ob sich eine solche Trennung jemals in der Industrie durchsetzen und wirtschaftlich betrieben werden kann, bleibt allerdings zu bezweifeln und wird auch stark von der Politik und der Bereitschaft der Bevölkerung abhängen.

Abkürzungsverzeichnis

ARA	Altstoff Recycling Austria
a _{tN}	Schlagzugzähigkeit
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Centimeter
COP	Cross Over Point
CR-PP	Controlled-Rheology Polypropylen
DD	Direktdruck
DIN	Deutsches Institut für Normung
Dr	Doktor
DSC	Differential Scanning Calorimetry
E-Modul	Elastizitätsmodul
Etc.	et cetera
g	Gramm
G'	Speichermodul
G''	Verlustmodul
G*	Komplexer Modul
G/B	gelber Sack
H	Spaltmaß
HDPE oder HD-PE	High-Density Polyethylen
IML	In-Mold
J	Joule
K	Kelvin
K3	Karton-Kunststoff-Kombination
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KST-SI	Kunststoff-Sleeve
LDPE oder LD-PE	Low-Density Polyethylen
MFR	Melt Flow Rate
mg	Milligramm
min	Minuten
mio	Millionen
mm	Millimeter
MPa	Mega Pascal
MS	Microsoft
p	Druck
Pa	Pascal
PA	Polyamid
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
r	Rampe

Abkürzungsverzeichnis

RM	Restmüll
s	Sekunden
SG	Spritzgießen
t	Zeit
T	Temperatur
T_c	Kristallisationstemperatur
TZ	Tiefziehen
T_m	Schmelztemperatur
TU	Technische Universität
UV	ultraviolett
W	Masse in Gramm
z.B	zum Beispiel
ZSVR	Zentrale Stelle Verpackungregister
ΔH_c	Kristallisationsenthalpie
ΔH_m	Schmelzenthalpie
§	Paragraph
$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius
ϵ_B	Bruchdehnung
η^*	komplexe Viskosität
σ	Standardabweichung
ω	Kreisfrequenz

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kunststoff und Stahlproduktion in Volumen [2].....	1
Abbildung 2: Wattlebauschsstruktur eines amorphen Thermoplasten [6].....	4
Abbildung 3: Struktur teilkristalliner Thermoplaste [6]	5
Abbildung 4: chemischer Aufbau Propylen [6]	5
Abbildung 5: chemischer Aufbau PP [6]	6
Abbildung 6: Extruder mit verschiedenen Funktionszonen [7].....	8
Abbildung 7: Schematische Darstellung einer Spritzgussmaschine [7]	9
Abbildung 8: Stempelunterstütztes Tiefziehen eines Bechers [7]	9
Abbildung 9: Prinzip der Kreislaufwirtschaft [11]	10
Abbildung 10: Kunststoffabfallverwertung in Deutschland im Jahr 2015 [16]	12
Abbildung 11:Verträglichkeitsmatrix für Polymere [16]	13
Abbildung 12: Recycling Codes [17]	14
Abbildung 13: Prüfkörpergeometrie Typ 5A Zugversuch [22]	22
Abbildung 14: Prüfkörper Zugversuch	23
Abbildung 15: Prüfkörpergeometrie Typ 1 Schlagzug [23]	23
Abbildung 16: Platte-Platte-Rheometer [24]	24
Abbildung 17: Speicher- und Verlustmodul [24]	25
Abbildung 18: Verschiebung des COP abhängig von der Molmasse [24]	26
Abbildung 19: Typischer Aufbau eines Geräts zur Bestimmung der MFR [25].....	27
Abbildung 20: Schematischer Aufbau des Zugversuchs [8].....	28
Abbildung 21: Verformungsverhalten bei der Zugprüfung [8]	29
Abbildung 22: Schlagzugversuch [8].....	30
Abbildung 23: Grundprinzip DSC [26]	31
Abbildung 24: Hauptunterschiede Becher: S-Budget (links) Emi (rechts)	32
Abbildung 25: Eingrenzung des Bereichs als Hilfestellung	33
Abbildung 26: Speicher- und Verlustmodul Mehrfachverarbeitung KST-SI G/B und IML G/B2	34
Abbildung 27: COP Vergleich G/B-RM.....	36
Abbildung 28: COP Vergleich Mehrfachverarbeitung	37
Abbildung 29: COP Vergleich TZ-SG	37
Abbildung 30: Komplexe Viskosität Vergleich TZ-SG	38
Abbildung 31: MFR Vergleich G/B-RM.....	41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 32: MFR Mehrfachverarbeitung	42
Abbildung 33: Bruchdehnung Vergleich G/B-RM.....	43
Abbildung 34: E-Modul Vergleich G/B-RM.....	44
Abbildung 35: Bruchdehnung Mehrfachverarbeitung	45
Abbildung 36: E-Modul Mehrfachverarbeitung	46
Abbildung 37: Bruchdehnung Vergleich TZ-SG.....	47
Abbildung 38: E-Modul Vergleich TZ-SG.....	48
Abbildung 39: Schlagzug Vergleich G/B-RM.....	50
Abbildung 40: Ergebnisse Schlagzugversuch Mehrfachverarbeitung	51
Abbildung 41: Schlagzug Vergleich TZ-SG.....	51
Abbildung 42: DSC Analyse Beispiele.....	53
Abbildung 43: Höchster Bildungsgrad der teilnehmenden Personen	53
Abbildung 44: Antwort auf die Frage: Die zwei Becher die du nun schon näher betrachtet hast, wo würdest du diese in deinem Haushalt entsorgen?	54
Abbildung 45: Verschmutzte Becher aus dem gelben Sack (2. Charge).....	57
Abbildung 46: Speicher- und Verlustmodul Mehrfachverarbeitung DD G/B und K3 G/B	VI
Abbildung 47: Komplexe Viskosität Mehrfachverarbeitung DD G/B und K3 G/B.....	VI
Abbildung 48: Speicher- und Verlustmodul Mehrfachverarbeitung KST-SI G/B und IML G/B2	VII
Abbildung 49: Komplexe Viskosität Mehrfachverarbeitung KST-SI G/B und IML G/B2... ..	VII
Abbildung 50: Speicher- und Verlustmodul Unterscheidung nach Formgebung.....	VIII
Abbildung 51: Komplexe Viskosität Unterscheidung nach Formgebung	VIII
Abbildung 52: Speicher- und Verlustmodul RM-Teil Charge 1	IX
Abbildung 53: Komplexe Viskosität RM-Teil Charge 1	IX
Abbildung 54: Speicher- und Verlustmodul IML/Mischung/Unbedruckt G/B.....	X
Abbildung 55: Komplexe Viskosität IML/Mischung/Unbedruckt G/B	X
Abbildung 56: Foto als Hilfestellung bei der Umfrage	XIV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der Kunststoffe [6]	3
Tabelle 2: Eigenschaften von Polyethylen und Polypropylen [6]	6
Tabelle 3: Menge der Materialien 1. Charge (Oktober 2021)	18
Tabelle 4: Menge der Materialien 2. Charge (Mai 2022)	19
Tabelle 5: Auflistung aller untersuchten Fraktionen	20
Tabelle 6: Heizprogramm für die Rheologieproben	24
Tabelle 7: Ergebnisse MFR	39
Tabelle 8: Ergebnisse Schlagzugversuch.....	49
Tabelle 9: Ergebnisse DSC	52
Tabelle 10: Ergebnisse Frequency Sweep	V
Tabelle 11: Ergebnisse Zugversuch	XI

Literatur

1. Arnold, Bozena (2017): Werkstoffe und ihre Bedeutung. In : Werkstofftechnik für Wirtschaftsingenieure: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, pp. 1–14.
2. Orth, Peter; Bruder, Jürgen; Rink, Manfred (2022): Kunststoff – ein nachhaltiger Werkstoff. In : Kunststoffe im Kreislauf: Springer Vieweg, Wiesbaden, pp. 11–18.
3. Degischer, H. Peter; Fechter, Thomas Albert (2018): Nachhaltige Produktion – Emissionen vermeiden, Ressourcen schonen. In : Maschinenbau: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, pp. 1161–1178.
4. Kaiser, Wolfgang (2021): Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung, 5. Auflage, München: Hanser, Carl.
5. Förstner, Ulrich (2012): Recycling. In : Umweltschutztechnik: Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 439–470.
6. Krüger, Oswald (2012): Kunststoffe. In : Werkstoffkunde: Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 397–484.
7. Schüle, Helmut; Eyerer, Peter (2020): Verarbeitung von Kunststoffen zu Bauteilen. In: Polymer Engineering 2: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, pp. 1–414.
8. Bonten, Christian (Ed.) (2020): Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen. 3., aktualisierte Auflage. München: Hanser, Carl.
9. Koltzenburg, Sebastian; Maskos, Michael; Nuyken, Oskar (2013): Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen: Springer Spektrum Berlin, Heidelberg.
10. Weißbach, Wolfgang; Dahms, Michael; Jaroschek, Christoph (2018): Werkstoffe und ihre Anwendungen: Metalle, Kunststoffe und mehr: 20. Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden.
11. Schaller, Florian; Randhahn, Annette; Bösche, Eyk; Michelmann, Jakob (2020): Kreislaufwirtschaft als Säule des EU Green Deal. In : Klima: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, pp. 233–251.
12. Orth, Peter; Bruder, Jürgen; Rink, Manfred (2022): Kunststoffe im Kreislauf: Vom Recycling zur Rohstoffwende. Springer Vieweg, Wiesbaden

Literatur

13. RecyClass. Design for Recycling Guidelines. <https://recyclclass.eu/recyclability/design-for-recycling-guidelines/>. Zugegriffen: 11.04.2023.
14. Martens, Hans; Goldmann, Daniel (2016): Grundlagen der Kreislaufwirtschaft. In : Recyclingtechnik: Springer Vieweg, Wiesbaden, pp. 1–17.
15. Westkämper, Engelbert; Warnecke, Hans-Jürgen (2010): Recycling. In : Einführung in die Fertigungstechnik: Vieweg+Teubner, pp. 267–283.
16. Woidasky, Jörg; Seiler, Elisa; Henning, Frank; Wolf, Marc-Andree; Harsch, Matthias (2020): Kunststoffe und Bauteile – Umwelt und Recycling. In : Polymer Engineering 3: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, pp. 89–139.
17. Francis, Raju (2016): Recycling of Polymers: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA..
18. Krumpal, Ivar; Näher, Anatol-Fiete (2012): Entstehungsbedingungen sozial erwünschten Antwortverhaltens: Eine experimentelle Onlinestudie zum Einfluss des Wordings und des Kontexts bei unangenehmen Fragen. In *Soziale Welt* 63 (1), pp. 65–89.
19. SurveyMonkey. Warum eigentlich Umfragen? <https://www.surveymonkey.de/mp/why-survey-understanding-survey-methodology/>. Zugegriffen: 25.04.2023
20. Manstead, Antony S. R.; Livingstone, Andrew G. (2014): Forschungsmethoden in der Sozialpsychologie. In : Sozialpsychologie: 6. Auflage. Springer Berlin, Heidelberg, pp. 29-64.
21. Greiner. K3 - Karton - Kunststoff - Kombinationen. <https://www.greiner-gpi.com/de/Produkte/Dekoration/K3-Karton-Kunststoff-Kombinationen>. Zugegriffen: 11.04.2023
22. DIN (2012). Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO 527-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-2:2012.
23. DIN (2005). Kunststoffe – Bestimmung der Schlagzugzähigkeit (ISO 8256:2004); Deutsche 56 Fassung EN ISO 8256:2004.

Literatur

24. Schröder, Thomas (2020): Rheologie der Kunststoffe. Theorie und Praxis. 2. aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser, Carl.
25. DIN (2012). Kunststoffe – Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten – Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren (ISO 1133-1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 1133-1:2011.
26. DIN (2017). Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO 11357-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 11357-1:2016.
27. Bauch, Jürgen; Rosenkranz, Rüdiger (2017): DSC - Dynamische Differenzkalorimetrie. In : Physikalische Werkstoffdiagnostik: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, pp. 92–93.
28. ARA. ARA - Recycling - Studie. <https://www.ara.at/news/ara-recycling-studie>
Zugegriffen: 11.04.2023
29. Canevarolo Jr., Sebastião V. (2020): Polymer Science: A Textbook for Engineers and Technologists. München: Hanser, Carl.
30. Hamad, Kotiba; Kaseem, Mosab; Deri, Fawaz (2013): Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. In *Polymer Degradation and Stability* 98 (12), pp. 2801–2812. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.025.
31. Maier, Ralph D.; Schiller, Michael (2016): Handbuch Kunststoff-Additive. 4. Auflage. München: Hanser, Carl.
32. ORF. Jedes Plastik Künftig in die gelbe Tonne. <https://wien.orf.at/stories/3179752/>
Zugegriffen: 11.04.2023

Anhang

Tabelle 10: Ergebnisse Frequency Sweep

Bezeichnung	komplexer Modul [kPa]	Kreisfrequenz [rad/s]	Nullviskosität [Pa*s]
	G^*	ω	η^*
DD G/B	28.86	128	1436.50
DD G/B 3x	29.81	142	1098.10
DD G/B 5x	31.06	194	831.16
K3 G/B	29.30	75.9	2177.80
K3 G/B 3x	30.68	127	1324.70
K3 G/B 5x	32.09	168	906.82
KST-SI G/B	28.43	151	1106.70
KST-SI G/B 3x	29.84	207	740.53
KST-SI G/B 5x	31.47	310	510.77
IML G/B	20.52	578	228.91
Unbedruckt G/B	30.39	422	452.31
Mischung G/B	28.32	140	1260.50
DD RM	29.98	93	1902.70
K3 RM	29.84	81	2075.00
KST-SI RM	27.37	122	1456.30
Mischung RM	29.17	101	1661.50
DD G/B2 TZ	31.02	95	1576.70
DD G/B2 SG	24.79	515	235.78
DD G/B2 Mischung	28.32	116	1241.40
KST-SI G/B2 TZ	32.07	81.4	1953.80
KST-SI G/B2 SG	-	-	255.02
KST-SI G/B2 Mischung	28.01	113	1296.60
IML G/B2	-	-	136.18
IML G/B2 3x	-	-	109.45
IML G/B2 5x	-	-	86.68

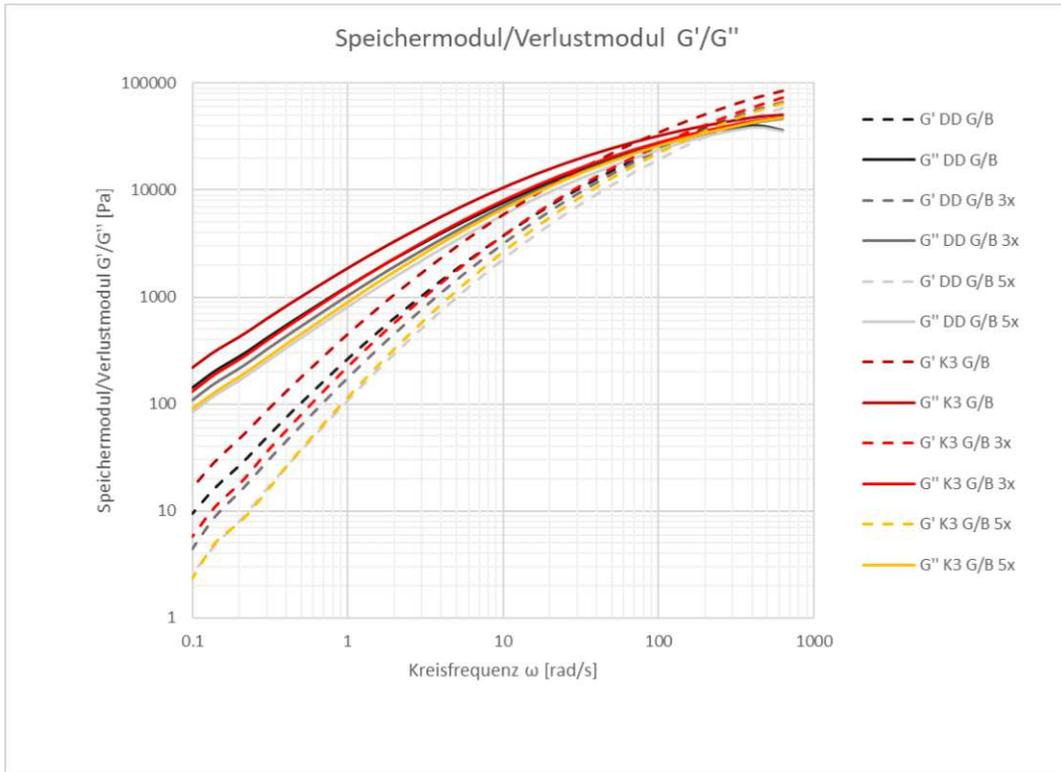


Abbildung 46: Speicher- und Verlustmodul Mehrfachverarbeitung DD G/B und K3 G/B

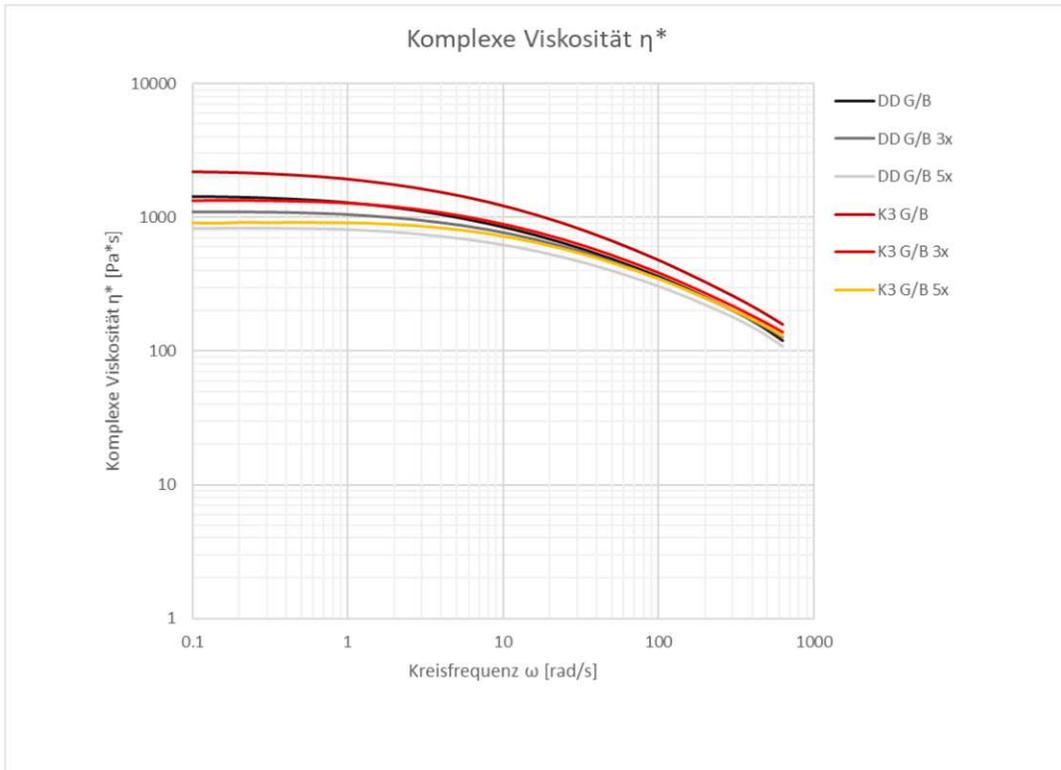


Abbildung 47: Komplexe Viskosität Mehrfachverarbeitung DD G/B und K3 G/B

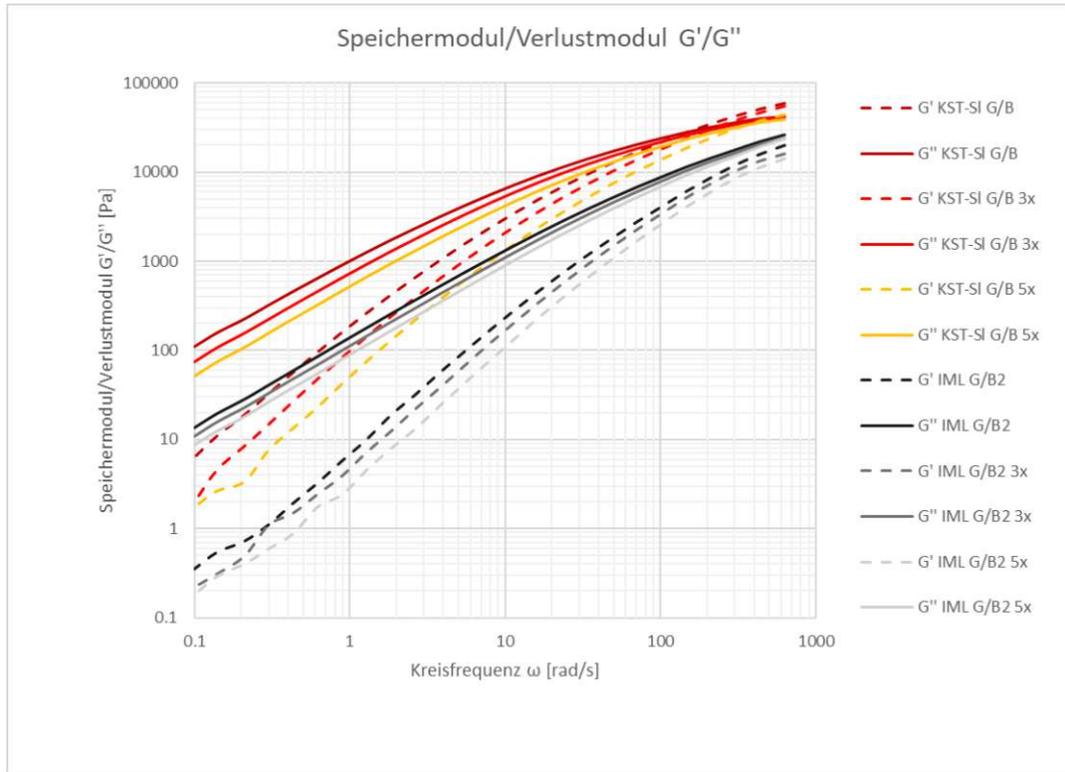


Abbildung 48: Speicher- und Verlustmodul Mehrfachverarbeitung KST-SI G/B und IML G/B2

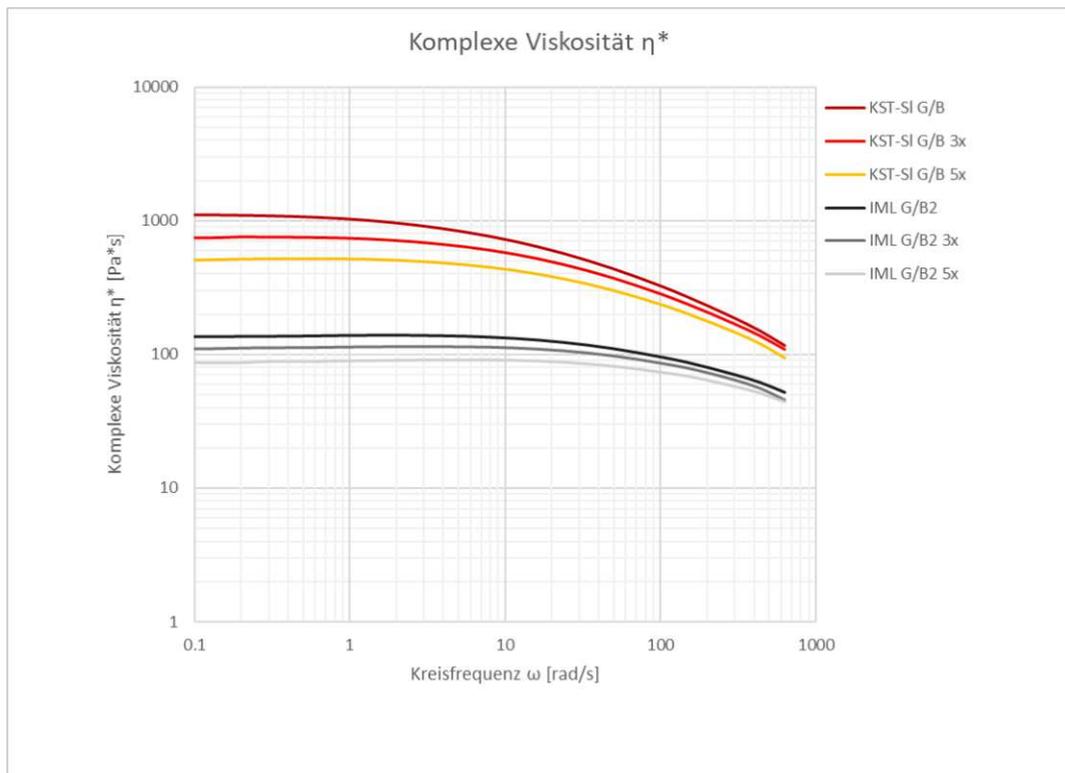


Abbildung 49: Komplexe Viskosität Mehrfachverarbeitung KST-SI G/B und IML G/B2

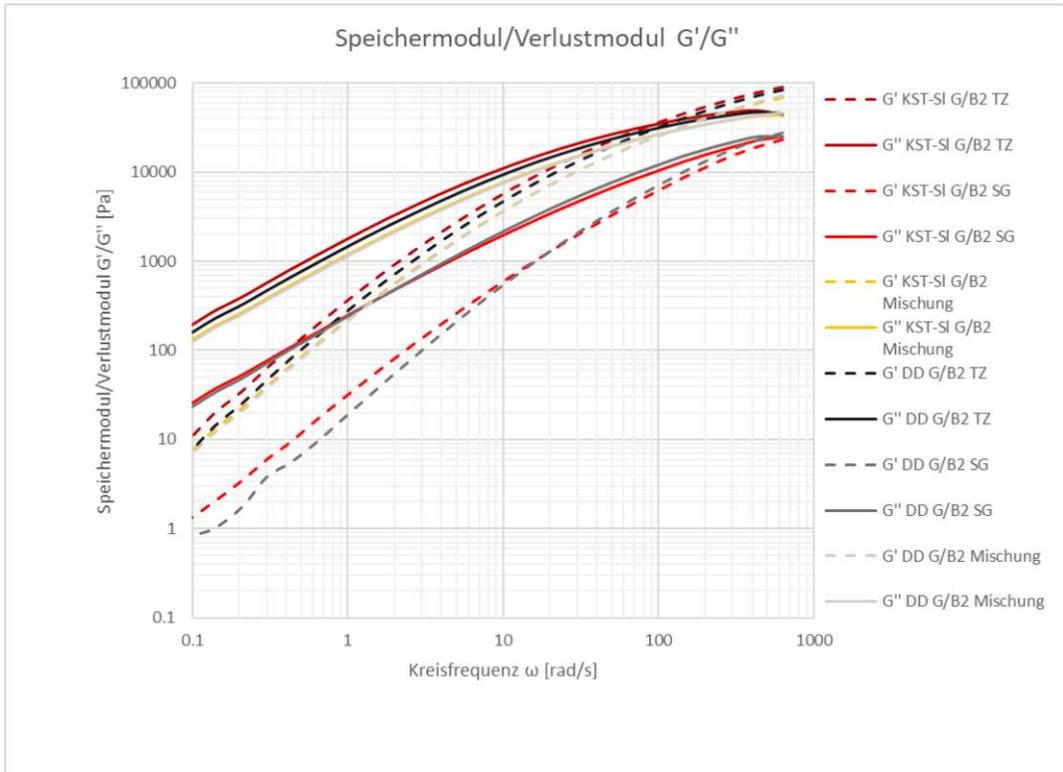


Abbildung 50: Speicher- und Verlustmodul Unterscheidung nach Formgebung

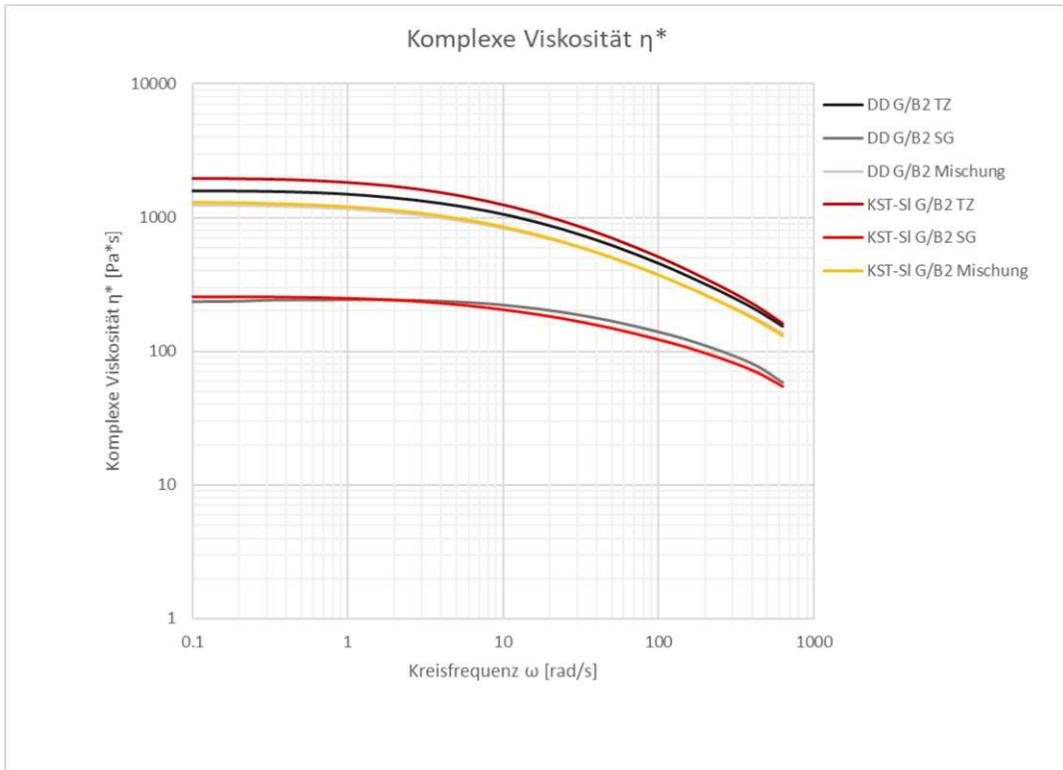


Abbildung 51: Komplexe Viskosität Unterscheidung nach Formgebung

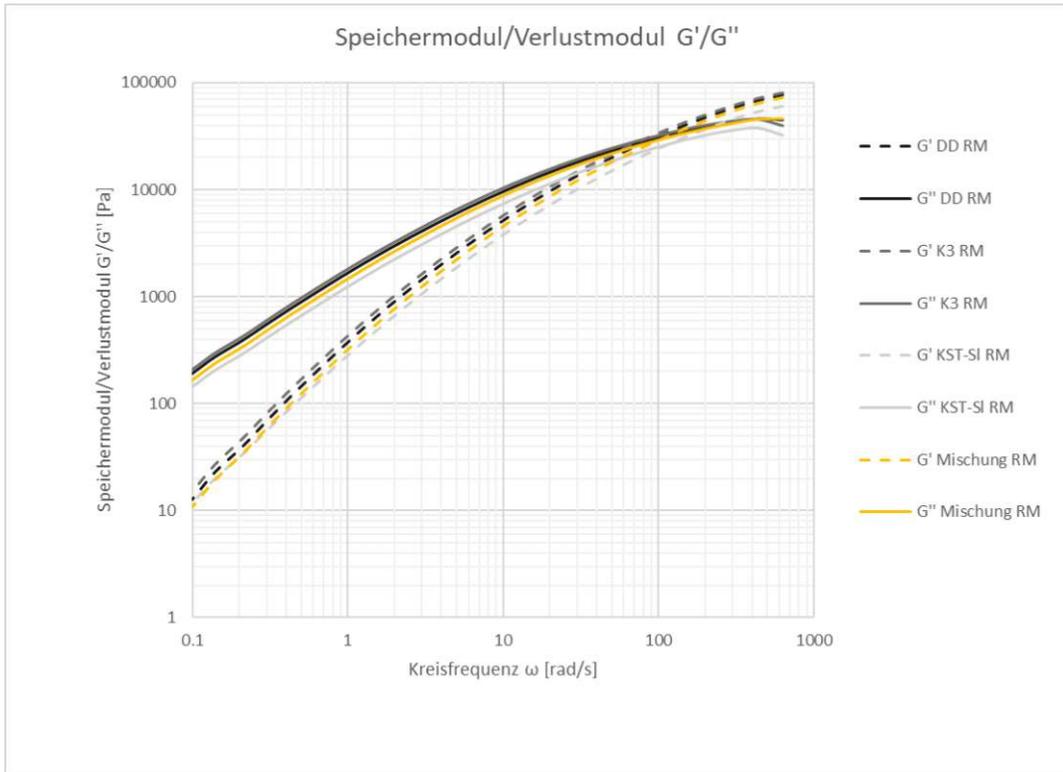


Abbildung 52: Speicher- und Verlustmodul RM-Teil Charge 1

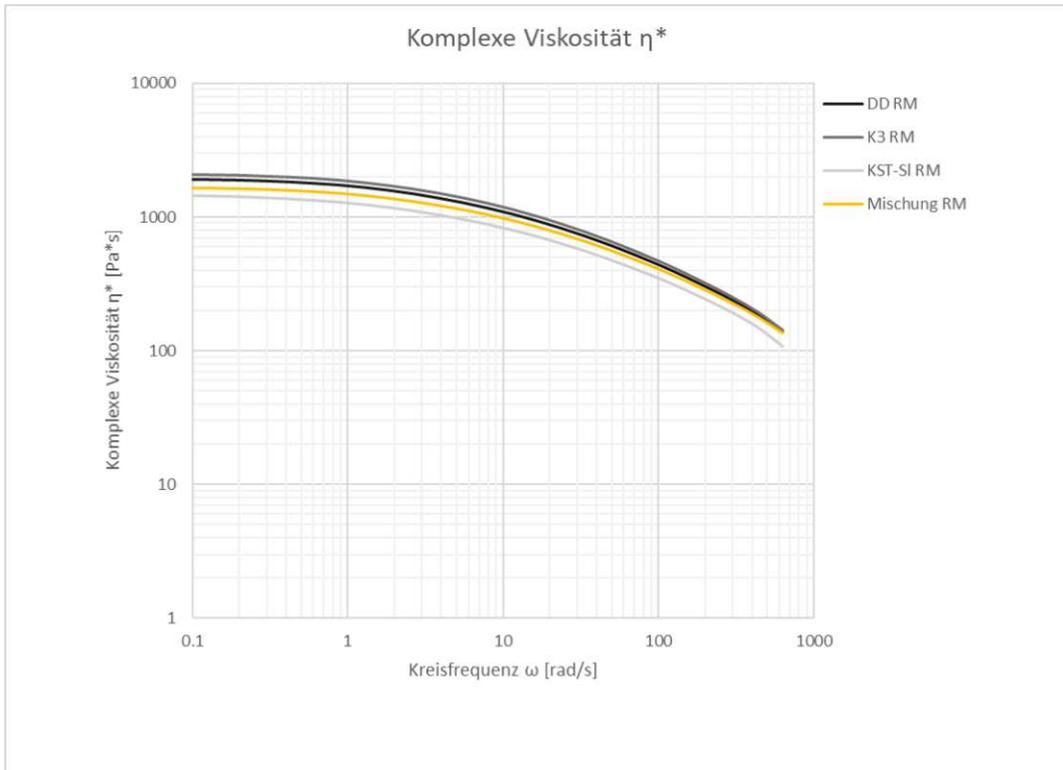


Abbildung 53: Komplexe Viskosität RM-Teil Charge 1

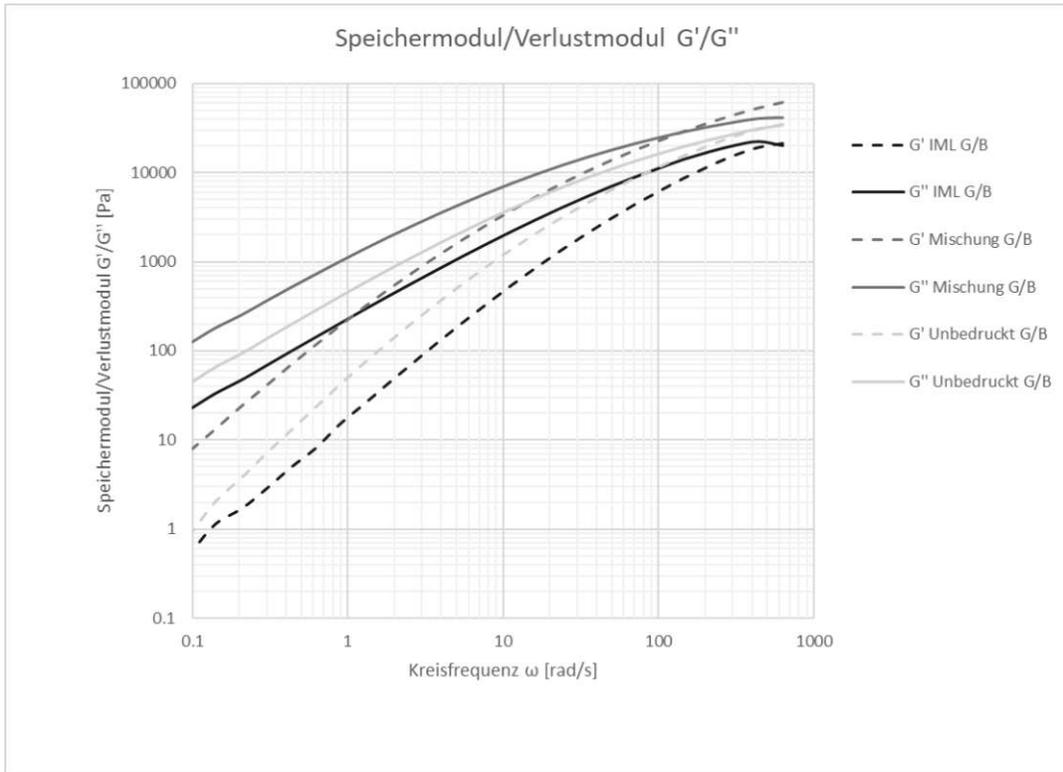


Abbildung 54: Speicher- und Verlustmodul IML/Mischung/Unbedruckt G/B

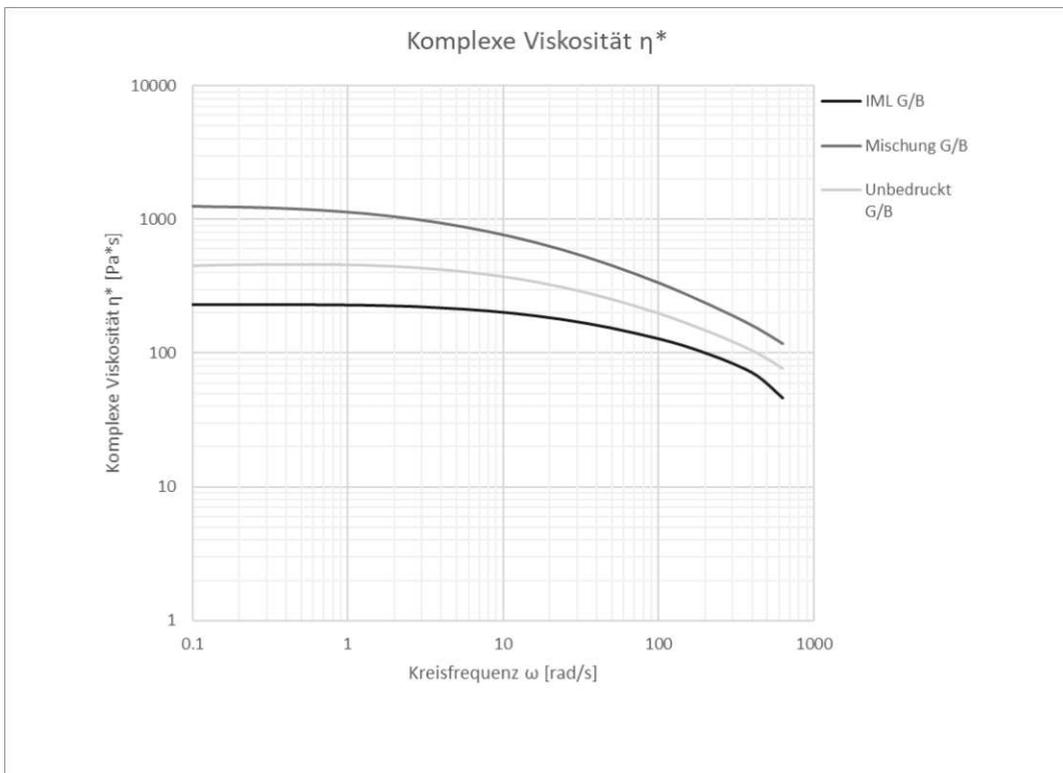


Abbildung 55: Komplexe Viskosität IML/Mischung/Unbedruckt G/B

Tabelle 11: Ergebnisse Zugversuch

Bezeichnung	E-Modul [MPa]	Bruchdehnung [%]	Zugfestigkeit [MPa]
	E	ϵ_B	σ_M
DD G/B	1554 ± 24	853 ± 64	36.78 ± 1.89
DD G/B 3x	1459 ± 41	861 ± 135	36.51 ± 2.47
DD G/B 5x	1401 ± 54	611 ± 92	33.42 ± 0.49
K3 G/B	1576 ± 81	960 ± 21	44.67 ± 1.81
K3 G/B 3x	1463 ± 35	966 ± 34	41.89 ± 2.33
K3 G/B 5x	1413 ± 37	968 ± 45	39.20 ± 2.18
KST-SI G/B	1411 ± 68	915 ± 32	36.08 ± 1.10
KST-SI G/B 3x	1308 ± 36	900 ± 34	34.12 ± 1.22
KST-SI G/B 5x	1295 ± 47	817 ± 120	32.23 ± 0.78
IML G/B	1279 ± 34	20 ± 3	26.79 ± 0.15
Unbedruckt G/B	1235 ± 113	959 ± 24	34.19 ± 0.67
Mischung G/B	1501 ± 55	849 ± 111	36.62 ± 1.82
DD RM	1605 ± 45	943 ± 38	43.80 ± 1.94
K3 RM	1622 ± 37	971 ± 23	45.59 ± 1.60
KST-SI RM	1510 ± 75	873 ± 66	36.44 ± 1.59
Mischung RM	1560 ± 60	970 ± 18	42.75 ± 0.90
DD G/B2 TZ	1397 ± 39	966 ± 38	43.07 ± 2.77
DD G/B2 SG	1042 ± 35	41 ± 32	26.27 ± 0.75
DD G/B2 Mischung	1261 ± 48	948 ± 30	38.62 ± 2.02
KST-SI G/B2 TZ	1277 ± 61	939 ± 9	43.68 ± 1.14
KST-SI G/B2 SG	901 ± 14	22 ± 10	21.59 ± 0.59
KST-SI G/B2 Mischung	1160 ± 45	902 ± 20	35.91 ± 1.46
IML G/B2	1164 ± 33	8 ± 2	24.73 ± 0.40
IML G/B2 3x	1168 ± 19	9 ± 2	24.29 ± 0.20
IML G/B2 5x	1011 ± 23	8 ± 1	21.82 ± 0.26

Umfrage

Begrüßung

Liebe/r Studierende/r,

im Zuge meiner Masterarbeit an der TU Wien führe ich eine kleine ergänzende Studie durch und bitte hiermit um deine Teilnahme!

Der folgende Fragebogen dauert maximal 5 Minuten, und du leistest mit deiner Teilnahme einen wichtigen Beitrag zur wissenschaftlichen Forschung. Ich bitte dich intuitiv zu antworten, es gibt keine richtigen und falschen Antworten. Die Studie wird selbstverständlich anonymisiert durchgeführt und es können folglich keine Rückschlüsse auf teilnehmende Personen gemacht werden.

Vielen Dank für die Teilnahme!

Mit freundlichen Grüßen

Johannes Berger

Einverständniserklärung

1. Ich stimme zu, dass meine Angaben verarbeitet werden dürfen.

- Ja
- Nein

Allgemeine Informationen

Anfänglich möchte ich dich um einige Informationen zu deiner Person bitten.

2. Welchem Geschlecht fühlst du dich zugehörig? (Einfachnennung)

- Weiblich
- Männlich
- Divers

3. Was ist dein höchster Schul- oder Bildungsabschluss? (Einfachantwort)

- Ohne Pflichtschulabschluss
- Hauptschule oder AHS Unterstufe
- Polytechnikum, BMS (Fachschule, z.B. HASCH)
- Lehre, Berufsschule
- AHS mit Matura
- BHS mit Matura (z.B. HTL, HAK, HBLA etc.)
- Hochschulverwandte Lehranstalt oder Kolleg
- Bachelor
- Magister / Master / Diplomingenieur / Fachhochschule
- Doktor / PhD
- keine Angabe [99]

4. In welchem Jahr wurdest du geboren?

- (Textantwort)

5. Wie sicher fühlst du dich beim Lesen in der deutschen Sprache?

- Skala (1-5 (1 sehr unsicher/5 sehr sicher))

6. Wie sicher fühlst du dich beim Schreiben in der deutschen Sprache?

- Skala (1-5 (1 sehr unsicher/5 sehr sicher))

7. Welchen Studiengang belegst du?

- (Textantwort)

Hauptteil

Du hast gerade zwei weiße Becher (A und B) bekommen. Das Bild soll eine Hilfestellung sein, auf welchen Teil der Becher du dich konzentrieren kannst. Anbei findest du ein Textfeld. Trage bitte alle Unterschiede, die dir in dem rot gekennzeichneten Bereich auffallen in die Felder ein. Knicke oder Kratzer kannst du vernachlässigen. Schreibe einfach kurz alles auf, was dir auffällt. Falls es für das Verständnis notwendig ist, nenne gerne den jeweiligen Becher (A und B).



Abbildung 56: Foto als Hilfestellung bei der Umfrage

8. Unterschiede:

- (Textantwort)

9. Auf dem Boden der Becher siehst du einige kleine Zeichen. Würdest du diese zur Hilfe nehmen, um sie einem bestimmten Abfallbehälter zuzuordnen?

- Skala (1-5 (1 sehr unwahrscheinlich/5 sehr wahrscheinlich))

10. Wie sinnvoll würdest du eine Trennung anhand dieser Symbole finden?

- Skala (1-5 (1 gar nicht sinnvoll/5 sehr sinnvoll))

11. Die zwei Becher die du nun schon näher betrachtet hast, wo würdest du diese in deinem Haushalt entsorgen?

- Im Restmüll
- In den Leichtverpackungen
- Im Altpapier
- Im Bio-Müll
- Im Altglas Container

12. Wusstest du, dass seit 01.01.2023 Kunststoffe in Wien anders gesammelt werden?

- Ja
- Nein

Vor dem Abschluss

13. Möchtest du zu dieser Befragung oder zum besseren Verständnis deiner Antworten noch etwas anmerken?

- (Textantwort)

Abschluss

Vielen Dank für deine Teilnahme an der Studie!

Die Teilnahme an dieser Studie ist natürlich freiwillig und du kannst deine Zustimmung jederzeit widerrufen.

Falls du noch Fragen hast oder mehr Information zu diesem Thema möchtest, kannst du dich jederzeit per Mail an e1604702@student.tuwien.ac.at wenden.