



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna | Austria



**Diplomarbeit**

# **Modifizierungsmöglichkeiten von Post Consumer Abfällen bestehend aus Polypropylen**

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

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, von

**Jessica SCHLOSSNIKL, BSc**

Mat.Nr.: 01426724

unter der Leitung von

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

und mitbetreut von

Projektass. Dipl.-Ing. Sascha Stanic

Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, E308-02-1

Wien, Mai 2021

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung dieser Arbeit nur mit Bewilligung der  
Prüfungskommission berechtigt bin.

### *Eidesstattliche Erklärung*

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

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

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

Besonderen Dank möchte ich Frau Prof. Archodoulaki aussprechen, da ohne ihre Zusage, dass ich meine Masterarbeit an ihrem Institut absolvieren darf, all dies und vieles mehr nicht zustande gekommen wäre. Ich würde einen wichtigen Abschnitt meiner Studienkarriere vermissen müssen, den ich so genossen habe. Auch dank der großartigen Kollegen in diesem Team Stefan Zellhofer, Dipl.-Ing. Dr. techn. Thomas Koch & Gerhard Kern.

Vor allem aber Sascha Stanic und Martina Seier, welche mich in ihr Team aufgenommen haben und mir **immer** mit Rat und Tat zur Seite standen.

Meinem Freund Clemens möchte ich ein besonders großes Dankeschön aussprechen, dass er mir in all meinen Lebenslagen beisteht.

Zu guter Letzt, aber nicht minder wichtig, möchte ich meinen Eltern danken für die fortwährende Unterstützung während meiner Studienzeit, wodurch ich ein unbeschwertes Studiendasein genießen durfte.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abstract .....	III
Kurzfassung.....	IV
1 Einleitung und Motivation .....	1
1.1 Zielsetzung .....	1
1.2 Kunststoffe.....	2
1.2.1 Daten & Fakten .....	2
1.2.2 Verwertungen von Kunststoffen .....	4
1.2.3 Mechanisches Recycling .....	4
1.3 Polypropylen (PP) .....	6
1.4 Langkettenverzweigungen (LCB) .....	6
1.5 Polypropylen gepropftes Maleinsäureanhydrid (PPgMAH).....	7
1.6 Blends .....	9
2 Werkstoffe & Methoden .....	10
2.1 Werkstoffe .....	10
2.1.1 Ausgangsmaterial .....	10
2.1.2 Additive.....	10
2.2 Herstellungsmethoden .....	12
2.2.1 Reaktivextrusion .....	12
2.3 Herstellung Prüfkörper .....	14
2.3.1 Mechanische Prüfkörper .....	14
2.3.2 Rheologische Prüfkörper .....	15
2.4 Prüfmethoden .....	15
2.4.1 Mechanische Verfahren .....	15

2.4.2	Rheologische Verfahren .....	17
2.4.3	Thermische Verfahren .....	21
3	Ergebnisse.....	23
3.1	Joghurtbecher.....	23
3.1.1	Peroxide.....	23
3.1.2	Masterbatches.....	28
3.1.3	Blends (lineares PP & HMS PP).....	32
3.2	PPgMAH.....	35
3.2.1	Großer Extruder.....	35
3.2.2	Kleiner Extruder.....	41
4	Zusammenfassung.....	47
5	Ausblick.....	50
6	Literatur .....	51
A	Anhang.....	V
	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	V
	Messergebnisse .....	VI
	Abbildungsverzeichnis.....	VII
	Tabellenverzeichnis .....	IX

# Abstract

Recently, headlines of littered plastics threatening the environment are gaining more attention in the media and slowly seem to lead to a rethinking of society. Furthermore, even legislative conditions have been changed with the aim to create a sustainable circular economy and enhancing strategies such as recycling.

This work focuses especially on polypropylene (PP), which is one of the most common plastics in Europe. It is used for packaging material, where its lifetime is often only a very short one.

Through the addition of peroxides via reactive extrusion long chain branching is possible and extends the properties of PP. From previous studies this already has been proved as a suitable method. In addition, this represents a great potential for recycling of PP.

For this work, blends of two components were produced, the main material was a post-consumer recycling material, the further component was either a pure peroxide such as LP or Podic, a masterbatch or some virgin linear PP or HMS PP. For comparison, blends of virgin PP with different concentrations of polypropylene grafted maleic anhydride (PPgMAH) were fabricated at different temperatures and the impact of another kind of extruder was analyzed. Subsequently, the mechanical, rheological, and thermal properties were tested to observe potential substances for recycling, as well as to characterize the basic properties of the different polymers.

Encouraging results were obtained by modifying the post-consumer material with a masterbatch made from polypropylene and peroxide. Such a masterbatch is easy to handle and store, which is advantageous. Furthermore, the processing temperature was 240°C, which is common for the industry. Despite the high temperature, good mechanical and rheological results could be received. Further research is about to follow, but it has been shown that the application with masterbatches leads to promising results.

# Kurzfassung

Negativschlagzeilen von Kunststoffen in der Umwelt nehmen immer mehr Platz in den Medien ein und führen langsam zu einem Umdenken in der Gesellschaft. Gesetzliche Rahmenänderungen sollen eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft fördern und rücken das Recycling zunehmend in den Fokus.

Diese Arbeit beschäftigt sich im speziellen mit Polypropylen, es ist einer der meistverwendeten Kunststoffe in Europa, vor allem für Verpackungsmaterial, wo sein Nutzen oft nur von kurzer Dauer ist.

Die Zugabe von Peroxiden mittels Reaktivextrusion erzeugt Langkettenverzweigungen und erweitert damit das Eigenschaftsprofil. Dies ist mit Polypropylen bereits gut erprobt, und durch vorhergehende Untersuchungen bewiesen. Weiters steht mittlerweile fest, dass dies ein großes Potential für das Polypropylen Recycling bedeutet.

Im Zuge dieser Arbeit wurde Post Consumer Rezyklat herangezogen und entweder mit einem der Peroxide LP oder Podic in reiner Form, oder in Form eines Masterbatches versetzt. Weiters wurde das Rezyklat auch mit neuwertigen Materialien wie PP und HMS PP zu Blends verarbeitet. Vergleichsweise wurden auch Blends aus PP und PPgMAH hergestellt. Diese PP-PPgMAH Blends wurden unter zwei unterschiedlichen Verarbeitungstemperaturen hergestellt und es wurde betrachtet, ob die Wahl des Extruders ausschlaggebend ist.

Alle Polymerwerkstoffe wurden mechanisch, rheologisch und thermisch untersucht, um Substanzen mit dem besten Potential für einen Recyclingprozess ausfindig zu machen, sowie grundlegende Eigenschaften sichtbar und vergleichbar zu machen.

Besonders erfreuliche Ergebnisse zeigten sich durch die Modifikation mittels der Masterbatches. In der Industrie ist ein solcher Masterbatch einfacher handhabbar und lagerfähig. Außerdem wurde die Verarbeitungstemperatur bei in der Industrie üblichen Temperaturen (240°C) gewählt. Unter diesen Gegebenheiten erzielten diese Modifikationen sowohl mechanisch gute Werte als auch rheologisch zufriedenstellende Ergebnisse. Genauere Forschungsarbeit wird noch folgen, doch klar ist, dass die Anwendung mit Masterbatches zu vielversprechenden Ergebnissen führt.

# 1 Einleitung und Motivation

## 1.1 Zielsetzung

Negativschlagzeilen von Kunststoffen in der Umwelt nehmen immer mehr Platz in den Medien ein und führen langsam zu einem Umdenken in der Gesellschaft. Gesetzliche Rahmenänderungen sollen eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft fördern und rücken das Recycling zunehmend in den Fokus.

Diese Arbeit soll dazu beitragen einen kleinen Schritt in Richtung eines zielführenden Recyclings von Polypropylen (PP) Abfällen zu gewährleisten, sowie PP als Werkstoff und in der Anwendung von Blends besser kennenzulernen.

Hauptsächlich findet PP im Verpackungssektor Anwendung. Doch durch die Möglichkeit das Eigenschaftsprofil zu erweitern kann PP für vielfältige Produkte eingesetzt werden. So eine Erweiterung ist möglich durch das Einbringen von Langkettenverzweigungen. Dies geschieht im Zuge einer Reaktivextrusion unter Verwendung von Peroxiden.

In dieser Arbeit wird mit Post Consumer PP gearbeitet und es sollen Additive gefunden werden, die auch für die Industrie ansprechend sind, indem sie möglichst unkompliziert zu handhaben und gut lagerfähig sind. Zum Vergleich wurden auch Blends mit Reinmaterialien hergestellt und mit diesen die Auswirkungen von Temperatur und Extruder (Einschnecken- oder Doppelschneckenextruder) beobachtet.

Um zu erkennen, ob eine Bildung von Langkettenverzweigungen ermöglicht wurde, und die mechanischen Eigenschaften des rezyklierten Materials, sowie der Blends aus Reinmaterial zufriedenstellend sind, wurden alle Modifikationen rheologisch (dynamische Rheologie und Dehnrheologie), mechanisch (Zug- und Schlagzugversuch) als auch thermisch (mittels Differenzkalorimetrie) untersucht.

Diese umfassende Charakterisierung der hergestellten Werkstoffe sollte zu einer Schlussfolgerung führen, wie sich verschiedene Blends verhalten und ob ein Recycling von PP mit Hilfe eines Masterbatches eine vielversprechende Alternative ist.



## 1.2 Kunststoffe

Kunststoffe sind eines der meistverwendeten Materialien weltweit, doch oft ist ihr Nutzen nur von kurzer Dauer. Absichtliche, sowie auch unabsichtliche falsche Handhabung führt zu einer Akkumulation von Kunststoffen in der Natur, wo sie bestehen bleiben, und Schaden anrichten können. [1] Bilder von „Plastik“ im Meer, an Stränden und Flussufern hat mittlerweile jeder vor Augen. [2–5] Gerade deshalb greift die Europäische Kommission zu Mitteln, die solche Bilder verhindern soll und steckt sich und ihren Mitgliedsstaaten hohe Ziele. Es soll eine führende, nachhaltige und wettbewerbsfähige Kreislaufwirtschaft geschaffen werden. Beispielsweise sollen bis 2030 alle in der EU in Verkehr gebrachten Verpackungen wiederverwendbar oder kostengünstig recyclebar sein. [6, 7]

Doch Kunststoff hat auch positive Aspekte, das Auskleiden von Abfalldeponien mit Kunststofffolien schützt die Biosphäre vor Verschmutzungen, Gewichtsreduktion in der Automobil, sowie der Verpackungsindustrie führen einerseits zu Materialeinsparungen und daraus resultierend zu Energieeinsparungen. Weiters sind Kunststoffe in der Medizintechnik ein nicht mehr wegzudenkender Rohstoff. [1]

### 1.2.1 Daten & Fakten

Im Jahr 2019 ist die weltweite Kunststoffproduktion auf nahezu 370 Mio.t angestiegen. In Europa ist die Produktion von 2018 auf 2019 leicht gesunken von 61,8 auf 57,9 Mio. t. Die führenden Polymere in der EU28 (+Schweiz und Norwegen) sind die Polyolefine (PE und PP), welche nahezu die Hälfte ausmachen. Allein PP kommt in Europa (EU28+CH/NO) im Jahr 2019 auf einen Anteil von 19,4%. Der größte Anteil von PP fließt in Verpackungen und diese machen europaweit mit 39,6% den größten Anteil für die Nachfrage von Kunststoffen aus, siehe Abbildung 1. [8]

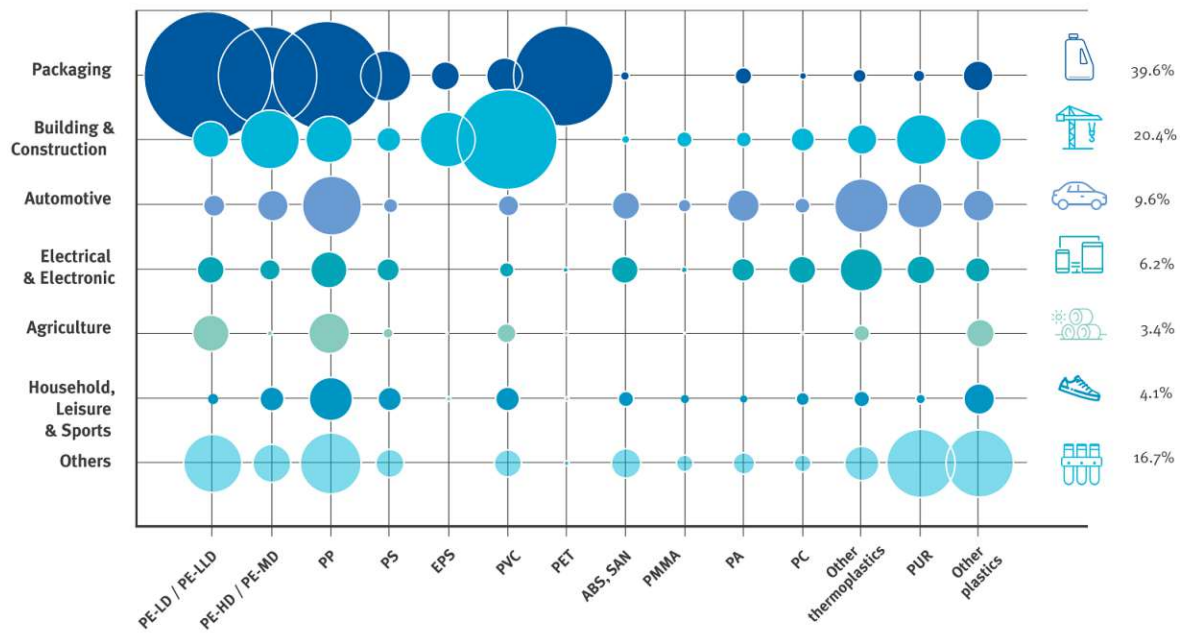


Abbildung 1 Kunststoffnachfrage nach Branche und Polymer in der EU28+NO/CH [8]

In Bezug auf Österreich wurde eine Studie von Van Eygen et al. [9] für das Jahr 2013 durchgeführt, in der eine Aufstellung der Abfallströme von Kunststoffverpackungen aufbereitet wurde. In Österreich wurden im Jahr 2013 rund 300.000 t Kunststoffverpackungen konsumiert, das sind in etwa 35kg pro Kopf und Jahr. Diese Zahl wächst seit 1997 kontinuierlich. Für 2025 wird eine Menge von 360.000 t prognostiziert. Im Gegenzug werden innerhalb Österreichs pro Jahr circa 78.000 t Rezyklat hergestellt, betrachtet auf die Gesamtmasse von Kunststoffen pro Jahr (in Österreich 1,3 Mio. t) ist dies ein sehr kleiner Anteil, doch auch diese Branche wächst. [10] Das Kunststoffaufkommen an Verpackungen setzt sich hauptsächlich aus LDPE (46% ± 6%), PET (19% ± 4%) und PP (14% ± 6%) zusammen, dies gleicht dem europäischen Durchschnitt wie schon in Abbildung 1 ersichtlich. Vom insgesamten Kunststoffaufkommen schaffen es in Österreich 58% in die getrennte Sammlung, der Rest landet im Rest-, Sperr- oder Gewerbemüll. Vom Gesamtaufkommen der Kunststoffverpackungen werden nach der Sortierung 26±7% wieder zu Sekundärrohstoff verarbeitet. Der Rest wird in Müllverbrennungsanlagen und Zementwerken energetisch verwertet. [9]

### 1.2.2 Verwertungen von Kunststoffen

Wie schon erwähnt unterstützen diverse Gesetzesänderungen die Entwicklungen im Kunststoffrecycling. Oberste Priorität sollte aber der Abfallvermeidung gelten. Ist dies nicht möglich, gibt es folgende Vorgangsweisen. Bevor das Produkt in Umlauf gebracht wird, existiert das *innerbetriebliche Recycling*. Dabei werden Produktionsabfälle dem Prozess wieder zugeführt. Sobald das Produkt in Gebrauch war, gibt es die Möglichkeit der *Wiederverwendung*. Im Zuge dessen wird das Produkt ohne stoffliche Umwandlung weiterverwendet, Beispiele dafür sind Mehrwegflaschen oder auch alte Autoreifen, die als Fender in Häfen Anwendung finden. Anschließend gibt es noch das *werkstoffliche Recycling*, das Material wird aufbereitet und wieder in der Produktion eingesetzt. Etwas aufwändiger ist das *rohstoffliche Recycling*, dabei kommt es zu einer Umwandlung in niedermolekulare Stoffe und das Einsatzprodukt gilt als Sekundärrohstoff. [11]

Nahezu alle Polymere sind chemisch unverträglich und nicht mischbar. Jede Art von Fremdstoff oder Verschmutzung führt zu Einschlüssen, die wiederum als Schwachpunkte im Kunststoff bestehen bleiben, weshalb eine sortenreine Aufbereitung besonders wichtig ist. [1] Jedoch wird der Aufwand der Aufbereitung auch wirtschaftlich betrachtet und so kann es vorkommen, dass das werkstoffliche Recycling hintangestellt wird. [11]

Denn es gibt auch noch die Energetische Verwertung, diese hat das Ziel den Energieinhalt gebrauchter Kunststoffe durch Verbrennung oder andere Verfahren zu nutzen. Kunststoffe werden energetisch verwertet und substituieren dadurch beispielsweise Erdöl, Erdgas oder Kohle und gelten dann als Sekundär-Brennstoffe. [1]

Letzter Ausweg für Kunststoffabfälle ist die Beseitigung auf Deponien, diese Methode ist allerdings in ganz Europa rückläufig. [8]

### 1.2.3 Mechanisches Recycling

Fällt unter die Kategorie werkstoffliches Recycling, die Polymerstruktur wird nicht wesentlich verändert und aufgrund der niedrigeren technischen Gegebenheiten, als beim chemischen Recycling, ist es momentan das vorrangige Verfahren. Mit Hilfe verschiedenster nass- und trockenmechanischer Aufbereitungsverfahren kann Rezyklat hergestellt werden [12], Abbildung 2 zeigt eine grobe Durchführung.

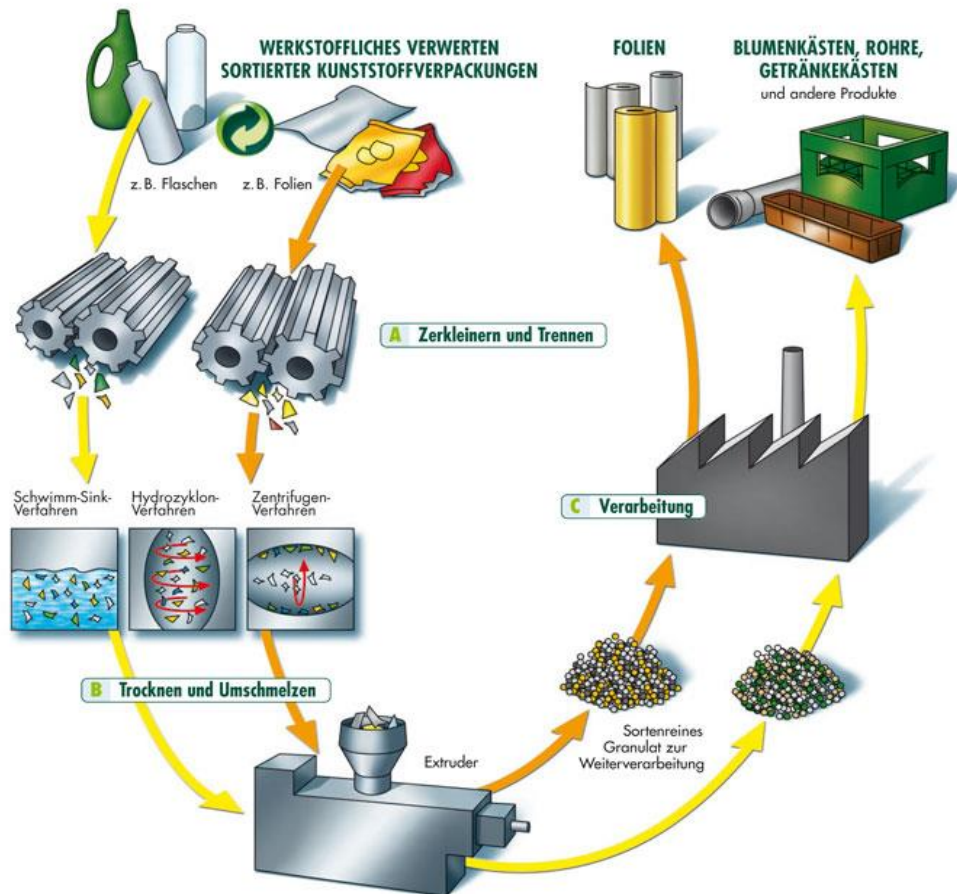


Abbildung 2 werkstoffliches Recycling [13]

Mechanisches Recycling hat in den letzten Jahren an Relevanz gewonnen da es sich als umweltschonend und ökonomisch profitabel erwiesen hat. [14–18]

Jedoch benötigt es sortenreine Polymere und der jeweilige Zustand beeinflusst das Ergebnis des Recyclings. Daher sind eine getrennte Sammlung, Sortierung und ein Waschprozess ein Muss für eine erfolgreiche Wiederherstellung eines neuen Produkts hoher Qualität. [19, 20] Mit Schwimm-Sink Verfahren ist eine kosteneffiziente Separation einer Polyolefin (PE und PP) Fraktion bereits möglich, um jedoch qualitativ hochwertiges Recycling betreiben zu können muss die Hauptkomponente 97% betragen. [21] Besonders scherinduzierte Kettenspaltung im Polypropylen (PP) während des mechanischen Recyclings führt zu einer Schädigung des Produkts. Die Viskosität und die Molare Masse reduzieren sich und ein qualitativ gleichwertiges oder höherwertiges Produkt ist nicht erreichbar. [22] Besonders die Verbesserung der schmelzrheologischen Eigenschaften, und auch mechanischer Eigenschaften mit Hilfe von Langkettenverzweigungen, lassen diese Methode als sehr vielversprechend erscheinen für die Zukunft des PP-Recyclings. [23]

### 1.3 Polypropylen (PP)

Bei Polypropylen handelt es sich um einen teilkristallinen, weitgehend unpolaren Thermoplast. [1] Thermoplaste weisen lange lineare oder verzweigte Molekülketten auf, durch die verschlungenen Ketten kommt es nie zur vollständigen Kristallisation, sondern lediglich in Teilbereichen zu kristallinen Anordnungen. [11] Handelsübliches PP wird meist mit Ziegler-Natta [24] oder Single-Site Katalysatoren hergestellt. Dieses ist überwiegend isotaktisches PP, das bedeutet, dass sich die Methylgruppen jeweils in dieselbe Richtung ausrichten und es einen hohen Kristallisationsgrad aufweist. [25] Durch die größtenteils isotaktische Anordnung wird eine Kristallinität zwischen 60 und 70% erreicht, was auch zu erhöhter Steifigkeit führt. PP kann mit einer großen Bandbreite an Füll- und Verstärkungsstoffen versetzt werden und ist in nahezu allen Farben erhältlich. Durch die unterschiedlich möglichen Eigenschaften ist PP als Verpackungsmaterial im Umlauf, sowie für technisch anspruchsvolle Anwendungen der Sektoren Elektrotechnik, Bauwesen und Automobilindustrie. [1]

Im Vergleich zu PE und PVC weist PP einen höheren Schmelzpunkt, eine geringere Dichte, exzellente Chemische Widerstandsfähigkeit und einen höheren Zugmodul auf und das bei geringeren Kosten. [26] Jedoch handelt es sich bei dem meist kommerziell erhältlichen PP um hauptsächlich lineares PP, mit niedriger Molmassenverteilung. Es zeigt eine schlechte Verarbeitbarkeit besonders bei Prozessen mit hohen Dehnbelastungen. Um PP für Tiefziehprozesse, Schäumen oder Blasformen zu verwenden, muss die Dehnfestigkeit der Schmelze durch Modifikationen gesteigert werden. Sehr effektiv möglich ist dies mittels Langkettenverzweigungen. [26, 27]

### 1.4 Langkettenverzweigungen (LCB)

Die Abkürzung LCB rührt aus dem Englischen „long chain branching“.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten LCB zu initiieren. Im Prinzip sind alle Methoden darauf ausgelegt Verzweigungen an die Hauptkette zu pfpfen. [28] Handelsüblich wird LCB-PP auch HMS PP (High Melt Strength) genannt und wird hauptsächlich mittels Elektronenbestrahlung hergestellt. [29] Doch insbesondere die Reaktivextrusion unter Anwendung von Peroxydicarbonaten rückte ins Interesse, da eine direkte Anwendung im Betrieb mit linearem PP möglich erscheint. [26, 28]

Folgende Verfahrensmethoden zur Initiierung von LCB sind bekannt:

- Elektronenbestrahlung im Zuge einer Festphasenreaktion, dabei kann Gamma Strahlung eine Kettenspaltung auslösen, die wiederum zur Bildung von Verzweigungen führt. [30]
- Während der Polymerisation mit Hilfe spezieller Katalysatoren. [31, 32]
- Chemische Modifizierung, indem Coagenzien, freie Radikale generieren, und so zu LCB verhelfen beispielsweise via Reaktivextrusion mit Peroxydicarbonaten. [27, 33, 34]

Die Herstellung mittels Reaktivextrusion bringt einige Vorteile mit sich, die dieses Verfahren sehr beliebt machen, und zwar kein Einsatz von Lösungsmittel, eine kurze Reaktionszeit und niedrige Infrastrukturkosten. [35] Neben der Bildung von LCB an die PP-Hauptkette können jedoch verschiedene Konkurrenzreaktionen auftreten, wie die  $\beta$ -Spaltung, die zu kleineren, ungesättigten Kettenfragmenten führt. Aufgrund seiner chemischen Natur ist PP anfällig für die  $\beta$ -Spaltung, besonders bei chemischer Modifikation, dies beeinträchtigt die Vernetzungsreaktionen. [24, 36] Weiters begünstigen hohe Temperaturen eine vermehrte  $\beta$ -Spaltung oder auch Disproportionierung, was die Bildung von LCB behindert und sich in einer Verringerung der Molmasse und Verengung der Molmassenverteilung zeigt. Hingegen kommt es durch LCB zu einer Erhöhung der Molmasse was in einer abnehmenden Schmelzfließrate resultieren sollte. [24] Gotsis et al. [26] konnte bereits zeigen, dass mit Hilfe von Reaktivextrusion lineares PP zu LCB-PP modifiziert werden kann, und die verzweigten PP-Proben eine deutliche Verfestigung der Dehnviskosität aufzeigen. Durch einen gewissen Grad an Langkettenverzweigungen können Verfahren wie das Tiefziehverfahren oder Schäumen des Polymers besser durchgeführt werden.

Doch nicht nur, um das Eigenschaftsprofil von PP zu erweitern ist das Einbringen von LCB interessant, [26, 37] sondern die Bildung von LCB-PP ist mittlerweile ein bekanntes Tool, um die wiederkehrende mechanische Beanspruchung im Recycling Prozess zu kompensieren und die Eigenschaften gegenüber linearem PP sogar zu verbessern. So spricht Kamleitner et al. [33] für die Anwendung mit Post Consumer Abfällen sogar von einem „up-cycling“ Prozess.

## 1.5 Polypropylen gepfropftes Maleinsäureanhydrid (PPgMAH)

Die Summenformel von Maleinsäureanhydrid (MAH) lautet  $C_4H_2O_3$  dies ist ein Fünfring mit einer Doppelbindung, aufgrund dessen ist MAH sehr reaktionsfähig. Die Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig und es wird häufig als Ausgangsmaterial in der chemischen Industrie verwendet. [38, 39]

Wird PP mit Maleinsäureanhydrid versetzt, so erhält man ein Polypropylen gepfropftes Maleinsäureanhydrid (PPgMAH). Zum einen kann MAH nach einer Kettenspaltung an das radikale Kettenende anbinden oder MAH kann entlang der PP-Kette durch Austausch eines Wasserstoffatoms anbinden. Großteils entstehen Hauptketten mit Einzeleinheiten, siehe Abbildung 3. [40, 41]

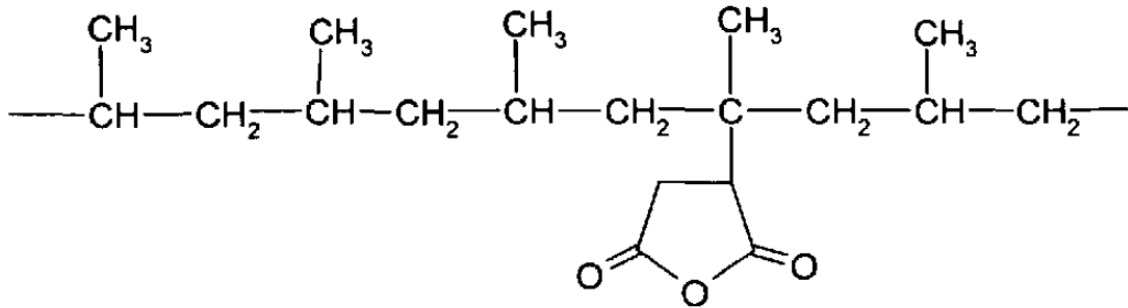


Abbildung 3 Schematische Struktur von PPgMAH. [42]

Das MAH liegt nicht zwingend gepfropft vor, es kann auch in anderen Formen im Endprodukt vorliegen. Dies ist insofern problematisch, da Slavons et al. [41] zu dem Schluss kommt, dass nur die gepfropfte Form phasenvermittelnd oder als Compatibilizer (Verträglichkeitsverbesserer) wirkt und andere vorliegende Formen diese Eigenschaft sogar behindern könnten. Die phasenvermittelnden Eigenschaften zeigen sich in vielerlei Hinsicht, so wurde gezeigt, dass die Zugabe kleiner Mengen PPgMAH zu ungepfropftem PP eine Verbesserung der Adhäsionseigenschaften zwischen Polyolefinen und polaren Substraten wie Aluminium herbeiführt. [43] Weiters resultierte eine bessere Dispergierbarkeit und Verstärkung bei organisch-modifizierten Schichtsilikat-Verbundwerkstoffen. [44] Ebenfalls für Holzfaserverbundwerkstoffe kam PPgMAH erfolgreich zum Einsatz. [45] Jedoch gibt es ein Optimum, worüber hinaus es zu einem Abfall der mechanischen Eigenschaften kommt, zurückzuführen ist dies auf die verringerte Kristallinität, die sich im Gesamtverbundwerkstoff einstellt aufgrund der Zugabe von PPgMAH. [46]

Doch nicht nur als Phasenvermittler agiert PPgMAH, sondern auch als Nukleierungsmittel. [47, 48] Bei Untersuchungen bezüglich des Kristallisationsverhaltens von PP-PPgMAH Blends ist Seo et al. [47] zu dem Schluss gekommen, dass schon durch eine geringe Zugabe von PPgMAH zu PP, die heterogene Keimbildung in den Vordergrund rückt und es zu einer Steigerung der effektiven Keime kommt. Generell führt der Einsatz von PPgMAH in Bezug auf Verbundwerkstoffe zu positiven mechanischen Ergebnissen, die optimalen Bedingungen,

sowie der ideale PPgMAH Gehalt sind aber divers. [38]

## 1.6 Blends

Polymerblends werden durch die Mischung verschiedener Polymere erzeugt, wohingegen Copolymere von Grund auf aus zwei oder mehreren unterschiedlichen Monomeren aufgebaut sind. Bei Blends können sowohl homogene als auch heterogene Gemische resultieren. [11]

Es wurden verschiedene Untersuchungen mit Blends aus PP mit verzweigten Ketten und linearem PP durchgeführt, diese kamen dabei zu positiven Ergebnissen. [49–51] Guapacha et al. [49] folgerte, dass eine Verringerung der Konzentration an Langkettenverzweigungen durch Mischen von LCB-PP mit PP immer noch zu Polymeren mit einer Verbesserung der Dehnungseigenschaften führt. Ebenso konnte McCallum et al. [51] zeigen, dass Blends dieser Art eine erhöhte Schmelzelastizität und Dehnfestigkeit aufweisen und mischbar sind.

Da Stanic et al. [52] herausgefunden hat, dass ein zweiter Extrusionsschritt die mit Peroxid modifizierten Proben nicht verschlechtert, erscheint die Herstellung von Masterbatches als zuversichtliche Methode um „up-cycling“ Prozesse noch weiter zu perfektionieren.



## 2 Werkstoffe & Methoden

### 2.1 Werkstoffe

Einerseits werden verschiedene Blends mit dem Ausgangsmaterial Joghurt Becher Flakes hergestellt. Andererseits werden Formulierungen mit PP2 und PPgMAH als Additiv hergestellt. Diese Charge mit vier unterschiedlichen PPgMAH Konzentrationen wird insgesamt vier Mal hergestellt, um eine Durchführung bei zwei verschiedenen Temperaturen sowie zwei verschiedenen Extrudern umzusetzen.

#### 2.1.1 Ausgangsmaterial

##### Polypropylen HC600TF (PP2)

Ist ein Homopolymer, welches für Tiefziehverpackungen Verwendung findet, wie zum Beispiel Margarine Schalen, Joghurtbecher aber auch für Anwendungen in der Textilindustrie. Weiters ist es optimiert um sehr gute Steifigkeit, Schmelzstabilität und Verarbeitbarkeit zu leisten. [53]

*Tabelle 1 Eigenschaftsprofil von Polypropylen HC600TF [53]*

Eigenschaften	Typische Werte	Testmethode
MFR (230°C/2,16kg)	2,8g/10min	ISO 1133
Schmelztemperatur (DSC)	164°C	ISO 11357-3
Kristallisationstemperatur	110°C	ISO 11357-3

##### Joghurt Becher Flakes

Diese Flakes der Firma *Walter Kunststoffe GmbH* sind ein Post Consumer Rezyklat. Aufbereitete, gereinigte und zu Flakes verarbeitete Joghurtbecher.

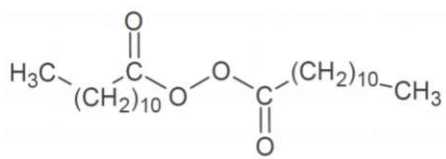
Der gemessene MFR (230°C/2,16kg) des unmodifizierten Mahlgutes beträgt 5,24g/10min.

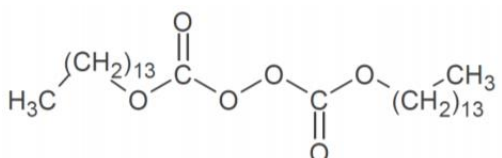
#### 2.1.2 Additive

##### Peroxide

Um Langkettenverzweigungen zu initiieren werden zwei verschiedene Peroxide herangezogen. Einerseits Peroxan C126 (Podic) andererseits Peroxan LP-Fein (LP), siehe Tabelle 2. [54, 55]

Tabelle 2 Eigenschaftsprofile der Peroxide [54,55]

<b>LP</b>	
Dilauroylperoxid	
Molmasse (aktive Substanz):	398,6g/mol
Aussehen:	Weißes Pulver
Peroxidgehalt:	min. 98%
Aktivsauerstoffgehalt:	min. 3,97%
Schüttdichte bei 20°C:	400kg/m <sup>3</sup>

<b>Podic</b>	
Dimyrystylperoxydicarbonat	
Molmasse (aktive Substanz):	514,8g/mol
Aussehen:	weiße Flakes
Peroxidgehalt:	min. 95%
Aktivsauerstoffgehalt:	min 2,95%.
Schüttdichte bei 20°C:	480kg/m <sup>3</sup>

### Blendmaterial

Es handelt sich um in der Forschungsgruppe hergestellte Masterbatches. Jeweils 10wt% Peroxid (LP oder Podic) werden mit 90wt% PP2 in Reaktivextrusion (siehe Kapitel 2.2.1) hergestellt. Daraus resultieren MB-LP und MB-Podic. In dieser Form ist das Mahlgut einfacher handhabbar und lagerfähiger.

### Daploy™ WB140HMS (HMS PP)

Dieses PP ist ein langkettenverzweigtes Homopolymer. Nachfolgende wird es HMS PP genannt, was der handelsübliche Name für LCB-PP ist. [29] HMS steht für High Melt Strength, also hohe Schmelzfestigkeit. Es ist ideal für geschäumte Anwendungen im Automobilbereich, Lebensmittel- und Nicht-Lebensmittel Verpackungen, sowie im Bausektor. Es bietet

besonders hohe Steifigkeiten, exzellente Verarbeitbarkeit und gute thermische Isolationseigenschaften. [56]

Tabelle 3 Eigenschaftsprofil von Daploy™ WB140HMS [56]

Eigenschaften	Typische Werte	Testmethode
MFR (230°C/2,16kg)	2,1g/10min	ISO 1133
Zugmodul	2000MPa	ISO 527-2

## PPgMAH

Es wurde PPgMAH der Firma *Westlake Chemical* verwendet, welche es unter dem Markennamen EPOLENE® E-43 vertreibt. Laut Datenblatt findet es Einsatz als Haftvermittler und Compatibilizer für PP-Verbundwerkstoffe, als Dispergiermittel besonders für Pigmente und um Rutschfestigkeit für Fußbodenpolituren zu erzielen. [57]

Der MFR konnte mit den uns vorhandenen Mitteln nicht gemessen werden, er war zu hoch. Dieses PPgMAH wurde in vier verschiedenen Konzentrationen (1, 3, 5 & 10wt%) dem Ausgangsmaterial PP2 beigemischt.

## 2.2 Herstellungsmethoden

### 2.2.1 Reaktivextrusion

Durch Zugabe von Additiven wird der Extruder auch gleich als Chemischer Reaktor verwendet und so werden zwei Verarbeitungsschritte zu einem kombiniert. [42, 58, 59]

### Großer Extruder

Um die verschiedenen Compounds zu erhalten, müssen die jeweiligen Ausgangsmaterialien mit den Additiven vermischt und extrudiert werden. Dafür wird ein 3-Zonen Einschneckenextruder, *Extron EX-18-26-1.5*, siehe Abbildung 4, mit einem Schneckendurchmesser von 18mm verwendet. Dieser wird bei 70 Umdrehungen pro Minute betrieben. Die Einzugszone wird für alle Durchgänge auf 165°C aufgeheizt, um ein Verkleben im Aufgabebereich zu vermeiden. Die Extrusionszone wird auf die jeweilige Temperatur: 180°C oder 240°C programmiert. Die Düse wird auf 220°C beziehungsweise 240°C eingestellt. Die ineinander verteilten Komponenten, werden der beheizten Schnecke zugeführt. Nach der Extrusion werden die erhaltenen Stränge in einer Mühle, *Fritsch Pulverisette 19*, zu kleinen etwa 4mm großen Flakes gemahlen, was der Größe des Reibeinsatzes entspricht.

Ziel der Extrusion ist die Förderung des Materials, die Plastifizierung und eine Vermischung sowohl stofflicher als auch thermischer Natur. [11]



Abbildung 4 großer Extruder Extron EX-18-26-1.5

### Kleiner Extruder

Es handelt sich um einen *Haake Mini Lab Doppelschneckenextruder*, mit gleichlaufenden Schnecken, siehe Abbildung 5. Im Zuge der PPgMAH-Formulierungen wird dieser Extruder für einen Vergleich herangezogen. Die Temperatureinstellung gilt in diesem Fall für die komplette



Abbildung 5 kleiner Extruder Haake Mini Lab Doppelschneckenextruder Außenansicht (li.) und Innenansicht (re.)

Einheit, dementsprechend wird auf 180°C oder 240°C aufgeheizt. Anschließend wird exakt gleich wie bei der Extrusion des großen Extruders fortgefahren.

Gleichlaufende Doppelschneckenextruder erzielen eine Umlagerung und Durchmischung und können daher für die Compoundierung eingesetzt werden. Das Förderprinzip ist mit dem eines Einschneckenextruders vergleichbar und entspricht einer Schleppförderung. [11]

Das heißt die Verarbeitung unterscheidet sich geringfügig, sowie die Dimensionen und damit die Verweilzeit des Mahlguts.

## 2.3 Herstellung Prüfkörper

### 2.3.1 Mechanische Prüfkörper

Für die Herstellung der Probenkörper des Zugversuchs und des Schlagzugversuchs werden die, nach der Extrusion in der Mühle, *Fritsch Pulverisette 19*, gemahlene, Flakes verwendet. Sobald der *Haake Mini Lab Doppelschneckenextruder* die gewünschte Temperatur (180°C oder 240°C) erreicht hat, wird bei 100U/min extrudiert. Mit Hilfe der Spritzgusseinheit *Haake Mini Jet II* werden Probenkörper für den Schlagzugversuch und für den Zugversuch erstellt, siehe Abbildung 6.

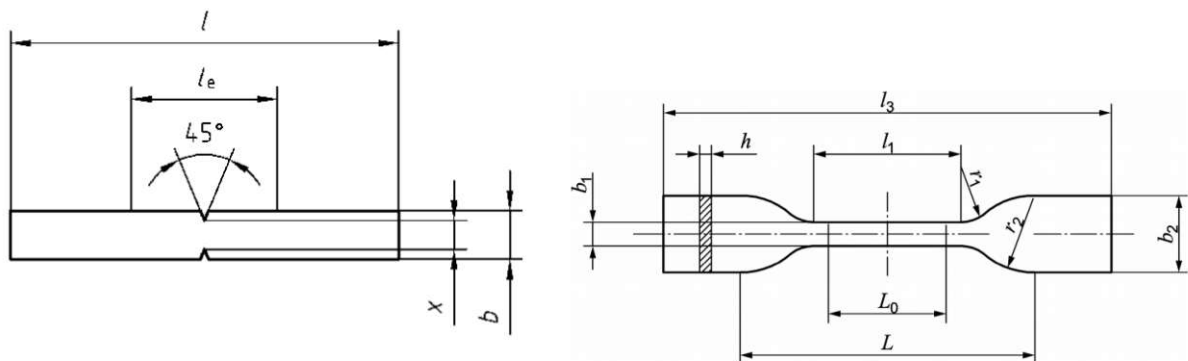


Abbildung 6 verwendete Prüfkörper nach DIN EN ISO 8256/1A (li.) und nach DIN EN ISO 527-2/5A/10 (re.)

Mit einem Zylinder wird die Polymerschmelze dem Extruder entnommen. Die Zylindertemperatur der Spritzgusseinheit liegt je nach Probe bei 180°C oder 240°C. Die Werkzeugtemperatur bei 90°C und die Einspritzphase sowie die Nachspritzphase findet unter einem Druck von 350bar statt und wird 10s gehalten. Der durch Spritzguss hergestellte Probenkörper für den Schlagzugversuch, wird anschließend in der Mitte auf beiden Seiten mit einem Kerbgerät, *Ceast Notch-Vis*, gekerbt. Die Längenmaße der verwendeten Probe betragen 60mm×10mm. Wie in Abbildung 6 an der Bezeichnung zu erkennen ist, wird der Prüfkörper

für den Zugversuch nach Typ 5A ausgewählt und eine Prüfgeschwindigkeit von 10mm/min angewendet. Die Gesamtlänge beträgt 75mm, die Dicke (h)  $2\pm 0,2$ mm und die Breite des engen Teils ( $b_1$ )  $4\pm 0,1$ mm. Ein etwaiger Grat wird entlang der Länge  $l_1$  entfernt. [60, 61]

### 2.3.2 Rheologische Prüfkörper

Für die dehnrheologischen Prüfungen werden quadratische Platten mit einer Seitenlänge von 60mm angefertigt und 0,8mm dick. Aus diesen Quadraten werden rechteckige Streifen mit einer durchschnittlichen Länge von 20mm und einer Breite von 8mm zugeschnitten. Bei den Proben der dynamischen Rheologie handelt es sich um kreisförmige Plättchen mit einem Durchmesser von 25mm, und einer Dicke von 1,2mm, siehe Abbildung 7.



Abbildung 7 Vorlage für quadratische (li.) und runde (re.) Prüfkörper

Verwendet wird die Presse *Collin P 200 P* mit dem in Tabelle 4 ersichtlichem Heizprogramm. Die Temperatur wird je nach Verarbeitungstemperatur der Extrusion auch im Heizprogramm ident zu dieser gewählt, dementsprechend 180°C oder 240°C.

Tabelle 4 Heizprogramm der Presse

Parameter	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
Temperatur (°C)	120	240/180	240/180	240/180	30
Zeit (min)	5	10	10	10	15
Druck (bar)	0	5	30	30	30

## 2.4 Prüfmethoden

Es werden sowohl mechanische, rheologische als auch thermische Prüfungen durchgeführt, um die Eigenschaften der verschiedenen Materialmodifizierungen begreifen zu können.

### 2.4.1 Mechanische Verfahren

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Polymeren spielt der Zugversuch eine

große Rolle, welcher unter anderem Werte der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung und des Elastizitätsmoduls liefert. Doch auch der Schlagzugversuch ist von Bedeutung. [62–64]

### Schlagzugversuch

Es wird eine Schlagzugmaschine, *Instron Ceast 9050 Pendelschlagwerk*, mit steifer Pendelgeometrie verwendet, an der am Ende eine Massenkonzentration in Form eines Hammers vorhanden ist.

An dem Prüfkörper wird ein Querjoch befestigt, welches aus Aluminium besteht. Dies ist laut DIN EN ISO 8256 der bevorzugte Werkstoff, da möglichst ein unelastischer Stoß produziert werden soll. Der eingespannte Prüfkörper mit Querjoch ist in Abbildung 8 zu sehen.

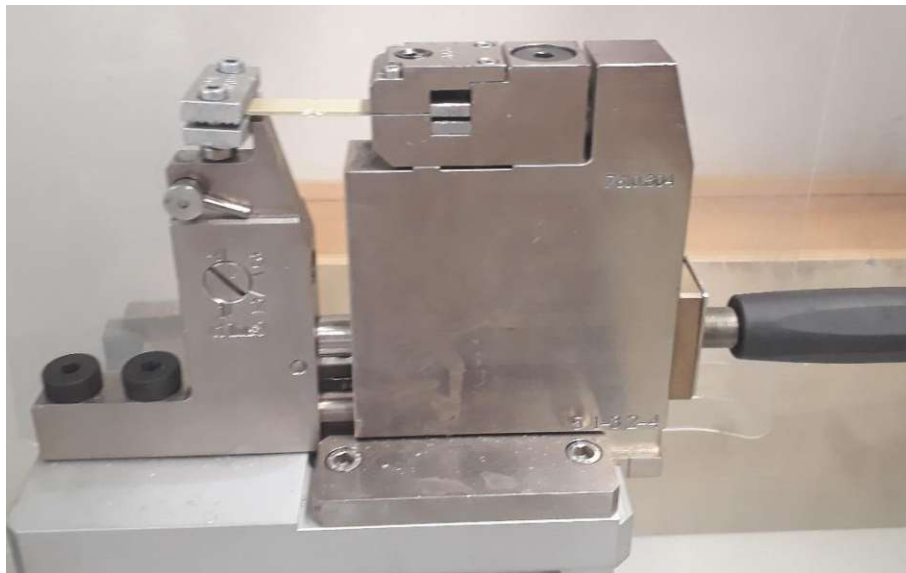


Abbildung 8 eingespannte Probe mit Querjoch

Das Querjoch hat eine Masse von 15g und die Schlagzugmaschine überschreitet das maximale Arbeitsvermögen von 2 Joule nicht. Die Energie  $E_c$  wird bereits korrigiert ausgegeben und die Formel 2.1 kann zur Berechnung der Schlagzugzähigkeit verwendet werden:

$$a_{tN} = \frac{E_c}{x * h} * 10^3 [\text{kJ}/\text{m}^2] \quad 2.1$$

Wobei es sich bei  $h$  um die Höhe beziehungsweise die Dicke, in mm, der Probe handelt und bei  $x$ , um die bleibende Breite, nach der Kerbung, siehe Kapitel 2.3.1. [60]

## Zugversuch

Der Zugversuch wird an einer *Zwick Roell Z050* durchgeführt. Es werden jeweils mindestens sechs Prüfkörper gemessen und daraus die Mittelwerte und die Standardabweichung der jeweiligen Maße ausgewertet.

Ziel ist es die Zugeigenschaften zu bestimmen, indem der Prüfkörper axial eingespannt wird und bei konstanter Prüfgeschwindigkeit gedehnt wird. Es wird die Spannung über der Dehnung aufgezeichnet, bis es zum Bruch kommt, oder bestimmte Messwerte der Spannung oder Dehnung erreicht werden. Es werden unterschiedliche Parameter ausgegeben, wovon in dieser Arbeit folgende näher betrachtet werden: die Bruchdehnung  $\epsilon_B$ , die Zugfestigkeit  $\sigma_M$  und der Elastizitätsmodul unter Zugbeanspruchung  $E_t$ , welcher im Dehnungsintervall von  $\epsilon_1=0,05\%$  und  $\epsilon_2=0,25\%$  berechnet wird.

Die Bruchdehnung  $\epsilon_B$  ist der Dehnungswert, nach welcher der Bruch einsetzt.

Ist das erste Spannungsmaximum im Verlauf des Zugversuchs erreicht, ist diese Spannung die Zugfestigkeit. Diese kann auch die Fließgrenze anzeigen. [65]

### 2.4.2 Rheologische Verfahren

Die Rheologie insgesamt beschreibt das Stoffverhalten des Fließens und der Deformation. Die Reaktion eines Feststoffs oder einer Flüssigkeit nach Einwirkung äußerer Kräfte, wird mit Hilfe der Methoden der Rheologie gemessen, beschrieben und erklärt. Je nach Einsatzgebiet und erwünschten Stoffdaten wird auf unterschiedliche Arten eines Viskosimeters zurückgegriffen. [66]

### Schmelzfließrate (MFR)

Mit Hilfe des Geräts *Melt Flow Basic 3100.000* von Karg Industrietechnik wurde die Schmelz-Massefließrate (MFR- melt mass-flow rate) bestimmt. Es handelt sich dabei um ein Niederdruckviskosimeter. [66] Der MFR Wert dient in erster Linie der Qualitätskontrolle, bei festgelegter Temperatur, Geometrie und Last werden in einem bestimmten Zeitintervall Extrudatabschnitte abgetrennt, verwogen und die Extrusionsgeschwindigkeit in g/10min berechnet. Das Gerät wird für alle Messungen auf 230°C aufgeheizt. Der Kolben wird mit einer Last von 2,16kg beschwert, um eine gleichmäßige Extrusion des Materials zu ermöglichen. Berechnet wird der MFR mit Formel 2.2:



$$MFR(T, m_{nom}) = \frac{600 \cdot m}{t} [g/10min] \quad 2.2$$

Im Fall unserer Durchführung führt das zu Formel 2.3:

$$MFR(230^{\circ}C, 2,16kg) = \frac{600s \cdot m}{10s} [g/10min] \quad 2.3$$

Der Mittelwert der Massen, der jeweils sechs gewogenen Extrudatabschnitte wird für  $m$  eingesetzt. [67]

Das Prinzip eines solchen Niederdruckviskosimeters ist in Abbildung 9 dargestellt.

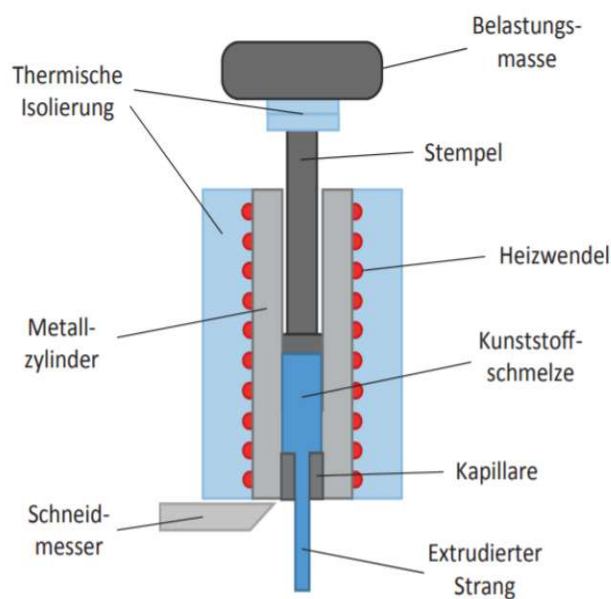


Abbildung 9 Prinzip eines MFR Geräts [66]

## Scherrheologie

Das Platte-Platte Rheometer zählt zu den Rotations- und Oszillationsrheometern. Die zu messende Flüssigkeit, beziehungsweise Polymerschmelze befindet sich zwischen zwei Platten. Diese befinden sich parallel zueinander und eine davon rotiert oder schwingt, siehe Abbildung 10.

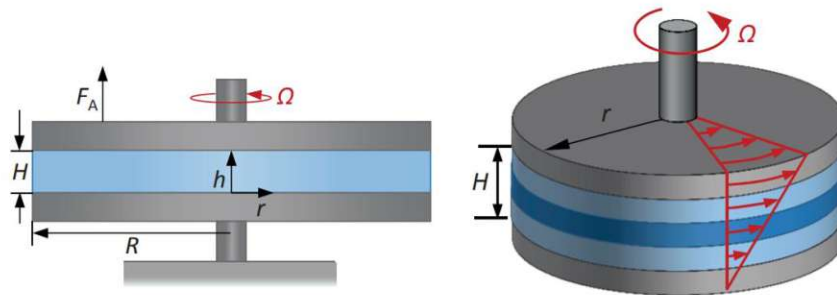


Abbildung 10 Platte-Platte Rheometer [66]

Bei dieser Anordnung steigt die Schergeschwindigkeit mit größerem Radius, also nach außen hin, und wird durch die Messspalthöhe  $H$ , Rotationsgeschwindigkeit und den Radius des Messsystems beeinflusst. Dementsprechend kann das Platte-Platte Rheometer für eine Variation an Messeinstellungen verwendet werden, weiters kann es auch als Oszillationsrheometer dienen. Dabei wird die Schmelze schwingend beansprucht. Besonders aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften von Kunststoffen ist dies von Vorteil, denn durch ein Oszillationsmessverfahren kann, sowohl der viskose Anteil als auch der elastische Anteil des Kunststoffs bestimmt werden. [11, 66] Bei einem ideal elastischen Körper würde die Schubspannung unmittelbar auf die induzierte Auslenkung reagieren. Durch die Anteile eines viskosen Verhaltens, entsteht eine Phasenverschiebung. Mit Hilfe der Frequenzsweep Messung können die elastischen Anteile  $G'$  (Speichermodul [Pa]) und die viskosen Anteile  $G''$  (Verlustmodul [Pa]) berechnet werden. Dafür wird der Messkörper angeregt, indem die Kreisfrequenz kontinuierlich gesteigert wird. Das daraus resultierende Drehmoment wird aufgezeichnet und es kann auf die Phasenverschiebung rückgeschlossen werden und damit auf  $G'$  und  $G''$ . Speicher- und Verlustmodul aufgetragen über der Kreisfrequenz erzeugen einen Schnittpunkt, welcher als Cross-Over-Punkt (COP) bezeichnet wird. Die Lage des COP gibt Hinweise auf die Molmassenverteilung und die Verzweigung der Molekülketten, siehe Abbildung 11. [66]

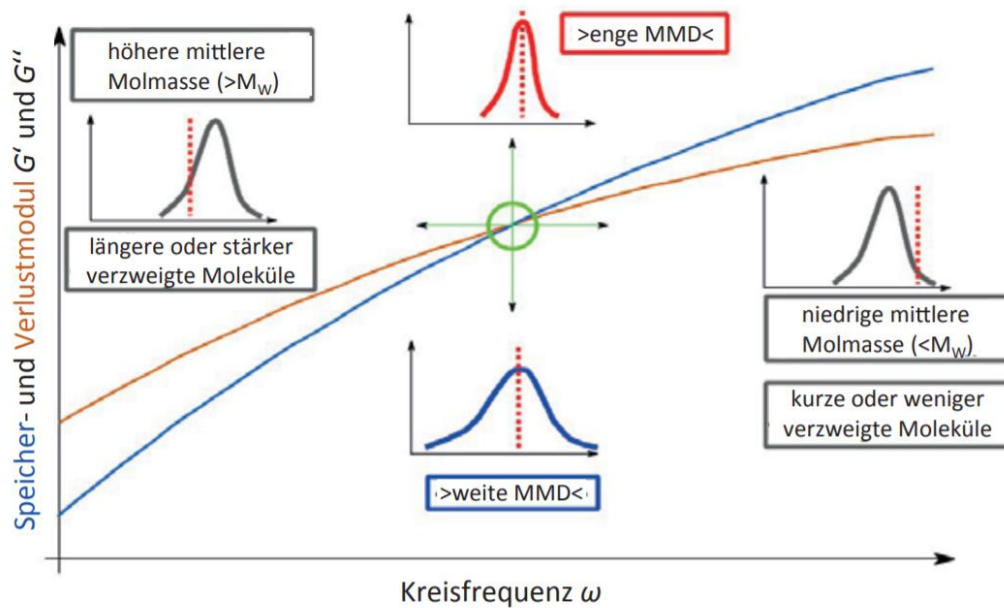


Abbildung 11 Eigenschaftsveränderung aufgrund der Lage des COPs [66]

Mittels der Cox-Merz Relation kann aus  $G'$  und  $G''$  die komplexe Viskosität  $|\eta^*|$  berechnet werden. Bei identer Kreis- und Schergeschwindigkeit ist diese gleich der Viskosität. [66]

Das Frequency Sweep Programm wird bei einer Kreisfrequenz von  $628-0,01\text{rad/s}$  und einer konstanten Temperatur von  $230^\circ\text{C}$  durchgeführt, dies ist dieselbe Temperatur wie für die Ermittlung des MFR Wertes verwendet wird, um eine Vergleichbarkeit herzustellen.

Für die Ermittlung von Hüllkurven, welche für die Auswertung der Dehnrheologie benötigt werden, wird das Steady Shear Programm verwendet. Dabei wird bei einer Scherrate von  $0,1\text{s}^{-1}$  und  $0,001\text{s}^{-1}$  je eine Kurve bei  $180^\circ\text{C}$  gemessen und die Viskosität über der Zeit aufgetragen.

Verwendet wird ein *Anton Paar MCR302* und das *Messsystem PP25-SN39840*. Die Messzelle wird mit Stickstoff gespült und das Spaltmaß (H) beträgt 1mm.

### Dehnrheologie

Da in der Kunststoffindustrie die Dehnbeanspruchung von Bedeutung ist, beispielsweise beim Folienblasen oder Spinnen von Polymeren, wird auch diese Eigenschaft untersucht. Dehnrheologische Größen ergeben sich aus der Scherrheologie, weshalb der Trouton Faktor für die Dehnrheologie besonders wichtig ist. Dementsprechend werden die mit Hilfe des Platten-Platten Rheometers ausgewerteten Hüllkurven mit dem Trouton-Faktor von 3 multipliziert. Mit diesem Faktor wird von der Scherviskosität in die Dehnaviskosität

umgerechnet. Allerdings nur bei niedrigen Schergeschwindigkeiten. Die Messung der Dehnviskositätskurven bei verschiedenen Dehnraten ist dem Prinzip nach Meissner ähnlich. [66]

Die zugeschnittenen Prüfstreifen werden an die Zylinder gelegt und mit Hilfe von Klammern an diesen befestigt. Bei einer Temperatur von 180°C wird die Probe bei einer Dehnrates von 0,1s<sup>-1</sup>; 1s<sup>-1</sup> und 5s<sup>-1</sup> gedehnt. Durchgeführt wird die Messung an einem *Anton Paar MCR302* mit einem *Messsystem SER-HV-P01*. Die beheizte Messzelle ist mit Stickstoff gespült.

Um den Effekt der Dehnverfestigung zu quantifizieren, wird der SH-Koeffizient ("strain hardening coefficient") berechnet. Dieser ist definiert als das Verhältnis von maximaler Dehnviskosität  $\eta_e(t)$  bei jeder Hencky Dehnrates und der Dehnviskosität der LVE Kurve  $\eta_e^0(t)$  zur selben Zeit, Formel 2.4. Die LVE Kurve entspricht der dreifachen Scherviskosität. [68]

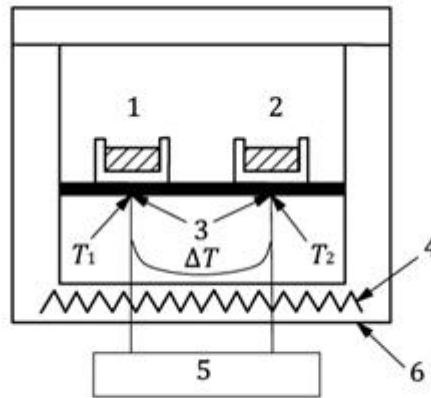
$$SH = \frac{\eta_e(t)}{\eta_e^0(t)} \quad 2.4$$

Der SH-Koeffizient steigt mit einem Anstieg an Verzweigungen pro Molekül. Die Schmelzfestigkeit wird ebenfalls durch vermehrte LCB erhöht und ist dementsprechend unmittelbar mit dem SH-Koeffizienten verknüpft. [26]

### 2.4.3 Thermische Verfahren

#### Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)

Für die Dynamische Differenz-Thermoanalyse wird die ISO 11357 herangezogen. Die Abkürzung DSC stammt von der englischen Bezeichnung „differential scanning calorimetry“. Zur Durchführung der DSC Messungen wurde eine *Q2000 (TA Instruments)* benutzt. Für dieses thermoanalytische Verfahren werden, unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen, ein Referenztiegel und ein mit der Probe befüllter Tiegel nach demselben Schema aufgeheizt. Die Differenz des Wärmestroms der beiden Tiegels wird über der Temperatur und/oder der Zeit aufgetragen und es können verschiedene Umwandlungsphasen erfasst werden. Abbildung 12 verdeutlicht die Funktionsweise einer DSC. [69]

**Legende**

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

Abbildung 12 Prinzip Dynamische Wärmestrom-Differenz Kalorimetrie [69]

Die Richtung der endothermen beziehungsweise exothermen Reaktion des Wärmestroms muss in der Funktion gekennzeichnet sein, um eine Auswertung zu ermöglichen. Eine zweimalige Durchführung des Heiz- beziehungsweise Kühlprogramms ist bei Polymeren aufgrund dessen thermischer Vorgeschichte und Abhängigkeit der Morphologie empfehlenswert. Die Messdaten werden dem zweiten Aufheizdurchgang entnommen. Erfolgen die Messungen bei konstantem Druck gilt die Wärmeänderung ist gleich der Enthalpieänderung. [69]

Mit Hilfe der Schmelzenthalpie, welche aus der DSC Kurve berechnet werden kann, kann auch der Kristallisationsgrad bestimmt werden. Die Schmelzenthalpie  $\Delta H_m$  ist die Energie, die benötigt wird, um kristalline Anteile aufzuschmelzen. Sie wird für die Bestimmung des Kristallisationsgrades benötigt, siehe Formel 2.5.

$$K = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \cdot 100[\%] \quad 2.5$$

Bei  $\Delta H_m^0$  handelt es sich um einen Literaturwert für ein 100% kristallines Material. [70] PP weist laut van Krevelen [71] einen Enthalpiewert von  $\Delta H_m^0=207\text{J/g}$  auf.

Es wurden 4-6mg je Probe eingewogen und Aluminium Tiegel eingesetzt. Das Programm durchläuft eine Temperaturspanne von  $0^\circ\text{C}$  bis  $200^\circ\text{C}$  zweimalig, mit einer Rate von  $10\text{K/min}$ . Zur Auswertung wird die Software *TA Universal Analysis* verwendet.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Joghurtbecher

Die verschiedenen Blends mit Post Consumer Rezyklat aus Joghurtbechern als Hauptmaterial wurden im 3-Zonen *Einschneckenextruders Extron EX 18-26-1.5* compoundiert. Tabelle 5 soll der Übersicht dienen und zeigt die unterschiedlichen Zusammensetzungen, sowie welcher Kategorie diese zugeordnet wurde. Je Kategorie werden die Ergebnisse genauer betrachtet. Das Ausgangsmaterial dient jeweils dem Vergleich zu den verschiedenen Kategorien und ist das unmodifizierte Post Consumer Rezyklat aus 100wt% Joghurtbecher Flakes.

Tabelle 5 Übersicht Post Consumer Rezyklat Modifikationen

Zusammensetzung	Bezeichnung	Temperatur	Kategorie
Jog.Walter 100%	Jog	240°C	Ausgangsmaterial
Jog.Walter+1wt% LP	JogLP	240°C	Peroxide
Jog.Walter+1wt% PODIC	JogPC	240°C	
Jog.Walter 90%+MB-PODIC 10%	Jog90MBPC	240°C	Masterbatches
Jog.Walter95%+MB-PODIC 5%	Jog95MBPC	240°C	
Jog Walter 90%+MB-LP 10%	Jog90MBLP	240°C	
Jog.Walter 95%+MB-LP 5%	Jog95MBLP	240°C	
Jog.Walter90%+PP2 10%	Jog90PP	240°C	Blends
Jog.Walter 95%+PP2 5%	Jog95PP	240°C	
Jog-Walter90%+HMS PP 10%	Jog90HMS	240°C	
Jog.Walter 95%+ HMS PP 5%	Jog95HMS	240°C	

#### 3.1.1 Peroxide

Bei der Verwendung von Peroxiden existiert ein Optimum, nachdem weitere Verzweigungen keinen Mehrwert mehr bringen. Weiters ist die Größe der Seitengruppe des Peroxydicarbonats von Bedeutung [26] Nach Erkenntnissen von Stanic et al. [72], welcher fünf unterschiedliche Peroxide unter in der Industrie üblichen Temperaturen (180 und 240°C) untersuchte, erwiesen sich Podic und LP als vielversprechende Peroxide, um LCB-PP zu erreichen. Daraus folgend wurden diese Peroxide (siehe auch Kapitel 2.1.2) für die nachfolgenden Untersuchungen verwendet und jeweils 1wt% eingesetzt.

## Mechanische Analyse

Es zeigt sich, dass sich durch Modifikationen mit Peroxiden die Bruchdehnung verbessert, für die Modifikation mit LP sogar etwas mehr, um etwa 10% im Vergleich zu Jog. Die Schlagzugzähigkeit sowie die Zugfestigkeit bleiben in etwa konstant. Der E-Modul sinkt in beiden Fällen, im Fall der Modifizierung mit LP etwas mehr. Dies korreliert mit Ergebnissen von Stanic et al. [52], der feststellte, dass mit höherem Peroxid Anteil der Wert der Bruchdehnung steigt. Außerdem gilt je mehr Peroxid verwendet wird, desto mehr leidet die Zugfestigkeit darunter. Da nur 1wt% des jeweiligen Peroxids verwendet wurde, hält sich die Zugfestigkeit einigermaßen konstant und es sind noch keine Auswirkungen diesbezüglich zu erkennen, die Bruchdehnung steigt allerdings bereits merklich, siehe Abbildung 13.

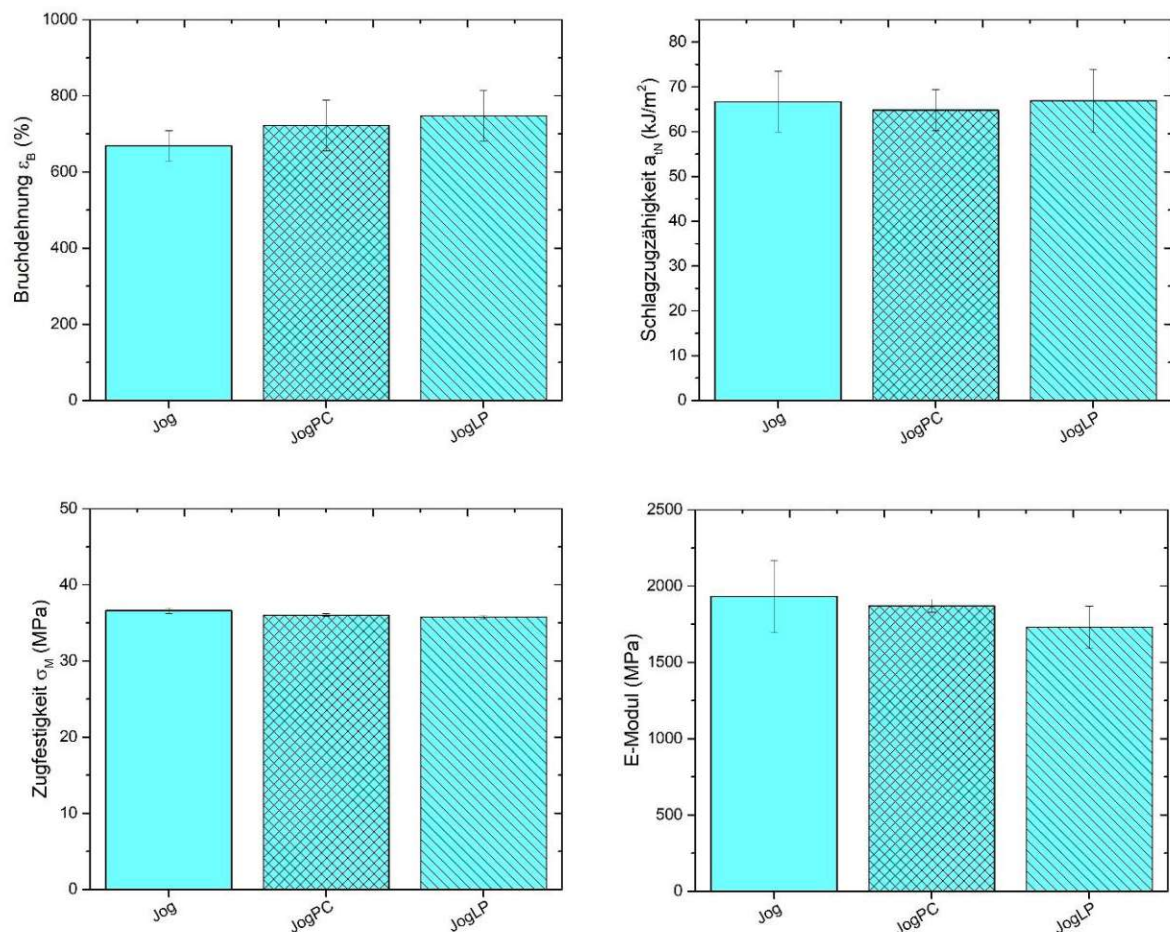


Abbildung 13 Post Consumer Rezyklat mit Peroxiden versetzt, Bruchdehnung (li. o.), Schlagzugzähigkeit (re. o.), Zugfestigkeit (li. u.) und E-Modul (re. u.)

## Rheologische Analyse

An den Kurven der Dehnviskositäten ist zu erkennen, dass die Probe Jog sich kaum von der Kurve des Linear-Viskoelastischen (LVE) Bereichs entfernt, das heißt sie weist tendenziell keine Dehnverfestigung auf, Abbildung 14 links oben. Die modifizierten Formulierungen hingegen zeigen eine deutliche Abweichung vom LVE Bereich. Die spiegelt sich auch im SH-Koeffizienten wider, sie weisen eine Dehnverfestigung auf. Der SH-Koeffizient von JogPC scheint mit steigender Dehnrates von  $0,1\text{s}^{-1}$  bis  $5\text{s}^{-1}$  nahezu linear abzufallen. Auch der SH-Koeffizient von JogLP sinkt und das sogar in deutlich größeren Schritten. Doch auch bei Stanic et al. [52] zeigt sich, dass der SH-Koeffizient der geringsten Dehnrates jeweils den höchsten Wert aufweist. Dies ist zurückzuführen auf die mit steigender Dehnrates einhergehende erhöhte Beanspruchung für den Werkstoff. Ersichtlich aus Abbildung 14 links unten ist, dass der MFR von JogPC sowie von JogLP ansteigt. Laut Ghijssels et al. [73] steigt im Fall von PP die

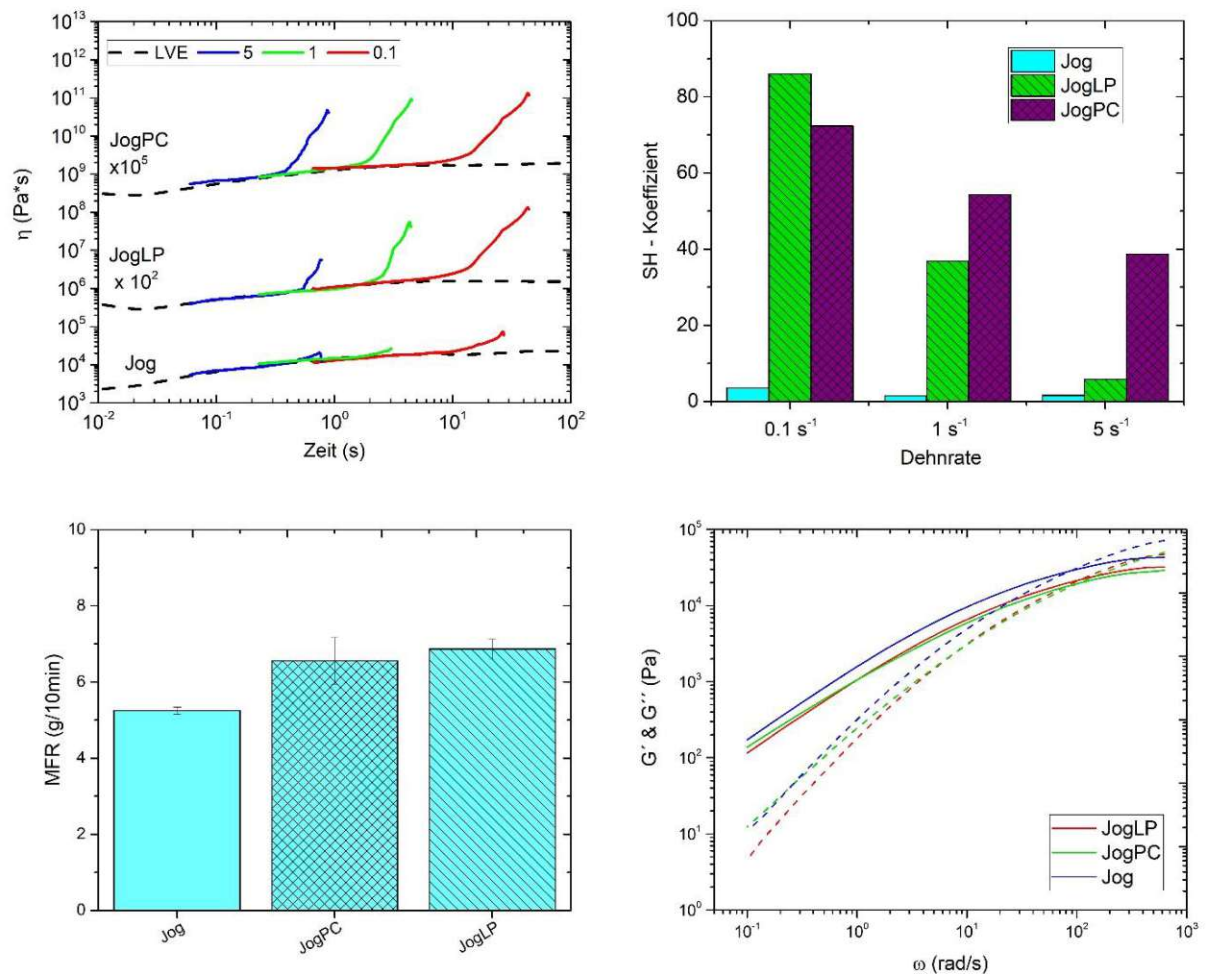


Abbildung 14 Dehnrheologie (li. o.) mit den daraus folgenden SH-Koeffizienten (re. o.) MFR Werte (li. u.) und Ergebnisse der Frequency Sweep Messung (re. u.)



Schmelzfestigkeit mit sinkendem MFR. Auch Lagendijk et al. [27] erzielte mit seinen LCB-PP Proben, welche via Reaktivextrusion hergestellt und mit unterschiedlichen Peroxydicarbonaten versetzt wurden, niedrigere MFR Werte. Andererseits zeigen die Ergebnisse von Stanic et al. [72] bezüglich des MFR einen Anstieg durch Zugabe von Podic oder LP, sowie einen Zusammenhang zwischen der Verarbeitungstemperatur und der Zunahme des MFRs. Einerseits ist der höhere MFR durch die Zugabe der Peroxide erklärbar und andererseits trägt auch die Temperatur dazu bei, dass eine Kettenspaltung auftritt.

Im Fall der Frequency Sweep Analyse zeigt sich bei JogPC und JogLP ein ähnlicher Kurvenverlauf. Es sind beide nach unten verschoben, was auf eine weitere Molmassenverteilung (MMD) deutet, und in Richtung höherer Kreisfrequenzen, was eine niedrigere Molmasse ( $M_w$ ) schlussfolgern lässt, siehe auch Tabelle 6. [66]

Eine Erhöhung der Molmasse beziehungsweise Verbreiterung der MMD wird jeweils mit einem nach oben gerichteten Pfeil „ $\uparrow$ “ gekennzeichnet, umgekehrt kommt ein nach unten gerichteter Pfeil zum Einsatz.

*Tabelle 6 Übersicht der rheologischen Ergebnisse der Frequency Sweep Analyse für Jog, JogLP und JogPC*

<b>Probenname</b>	<b><math>\omega_c</math> (rad/s)</b>	<b><math>G_c</math> (kPa)</b>	<b>Kommentar</b>
<b>Jog</b>	<b>88,3</b>	<b>28,6</b>	
JogLP	109,3	22,1	$\downarrow M_w \uparrow MMD$
JogPC	102,3	19,6	$\downarrow M_w \uparrow MMD$

### Thermische Analyse

Die Schmelztemperatur aller drei Proben hält sich konstant, die Kristallisationstemperatur steigt durch die Zugabe von PODIC auf 130°C an. Ergebnisse von Cangussú et al. [34] zeigen, dass verzweigte Proben eine höhere Kristallisationstemperatur als lineares PP aufweisen. Durch einige weitere Untersuchungen schlussfolgert er, dass die Präsenz und Menge von Kettenverzweigungen einen Einfluss auf die Kristallinität und Morphologie ausübt, jedoch sollten noch weitere Studien für ein besseres Verständnis folgen. Der Kristallisationsgrad bewegt sich um die 50%. Verglichen mit den erwarteten 60-70%, welche für isotaktisches PP üblich sind, ist dies unter der Betrachtung, dass es sich um Post Consumer Rezyklat handelt in Ordnung. Außerdem hält sich die Schmelzpunkttemperatur aller Modifikationen noch im Bereich von isotaktischem PP auf, welche sich circa zwischen 165°C und 170°C bewegt.

Syndiotaktisches PP würde einen geringeren Kristallisationsgrad aufweisen, jedoch geht dies auch mit einem niedrigerem Schmelzbereich (155-160°C) einher. [74]

Tabelle 7 Übersicht der Ergebnisse der DSC-Analyse von Jog, JogLP und JogPC

Probenname	T <sub>m</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (°C)	ΔH <sub>m</sub> (J/g)	ΔH <sub>c</sub> (J/g)	Kristallisationsgrad (%)
Jog	166	126	104	109	50
JogLP	165	126	101	107	49
JogPC	166	130	109	114	53

### 3.1.2 Masterbatches

#### Mechanische Analyse

In Abbildung 15 zeigt sich, dass die Zugabe von Peroxiden mittels eines Masterbatches ebenfalls zu erhöhter Bruchdehnung führen. Die höchste Bruchdehnung weist die

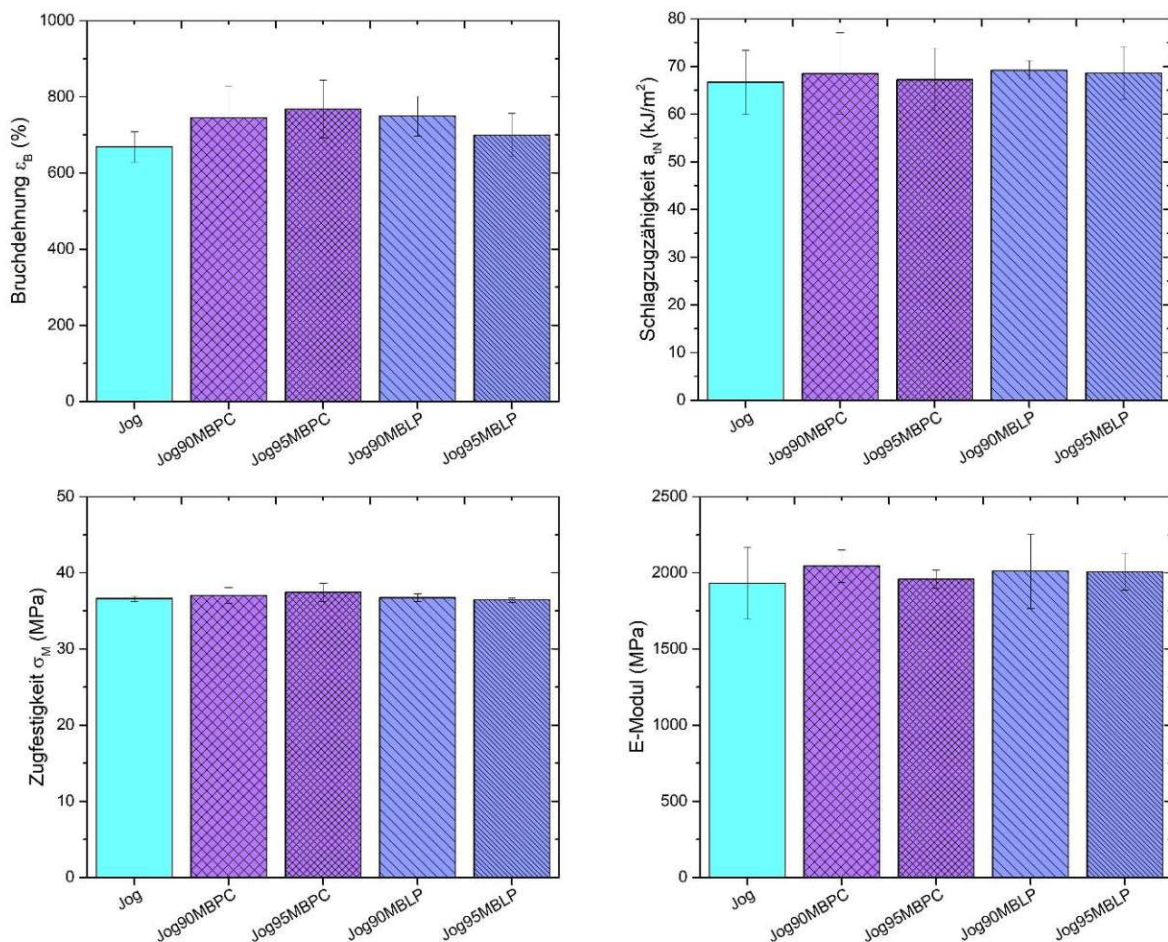


Abbildung 15 Post Consumer Rezyklat mit Masterbatches versetzt, Bruchdehnung (li. o.), Schlagzugzähigkeit (re. o.), Zugfestigkeit (li. u.) und E-Modul (re. u.)

Modifizierung mit der Zugabe von 5%MB-Podic auf. Hier ergibt sich eine Zunahme von rund 670% auf 770%. Die Schlagzugzähigkeit erhöht sich minimal, wobei mit einer großen Standardabweichung gerechnet werden muss. Die Zugfestigkeit ist nahezu konstant. Der E-Modul erhöht sich für alle Fälle geringfügig im Vergleich zu dem unmodifizierten Ausgangsmaterial.

In Anbetracht der vorhergehenden Ergebnisse (Kapitel 3.1.1) erzielt die Zugabe in Form eines Masterbatches eine Verbesserung hinsichtlich der Schlagzugzähigkeit und des E-Moduls. Bis auf Jog95MB-LP ist auch die Bruchdehnung erhöht.

## Rheologische Analyse

Die beiden Kurven der Dehnviskositäten von JogMBPC weichen deutlich vom LVE Bereich ab und zeigen auch im SH-Koeffizienten eine Dehnverfestigung. Jog95MBLP zeigt bei der geringsten Dehnrates von  $0,1\text{s}^{-1}$  ebenfalls eine Dehnverfestigung, jedoch fällt diese bei

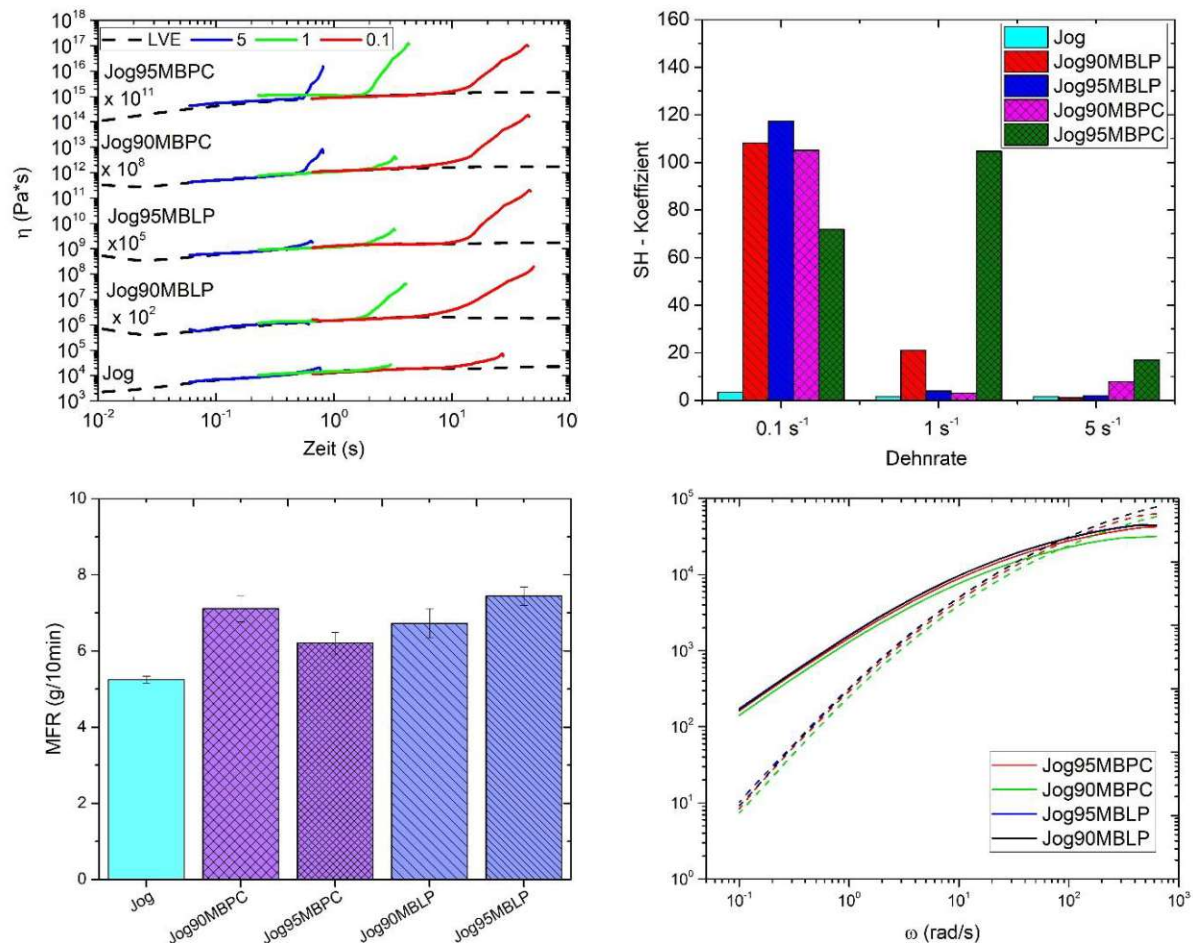


Abbildung 16 Dehnrheologie (li. o.) mit den daraus folgenden SH-Koeffizienten (re. o.) MFR Werte (li. u.) und Ergebnisse der Frequency Sweep Messung (re. u.)

steigenden Dehnrates deutlich ab. Jog90MBLP weist etwas höhere Werte auf, bei einer Dehnrates von  $5\text{s}^{-1}$  kann jedoch nicht mehr von einer Dehnverfestigung gesprochen werden. Der MFR steigt bei allen Modifikationen gegenüber dem Ausgangsmaterial an. Ein weiterer Grund neben, der hohen Temperatur und Kettenspaltungsreaktionen könnte der Wert des MFRs des reinen Masterbatches sein. Diese wurden in der Forschungsgruppe bereits vorhergehend untersucht und publiziert für den Masterbatch Podic wird „Podic A10“ herangezogen und liegt bei  $7,7\text{g}/10\text{min}$  und Masterbatch LP, in der Publikation „LP A10“, liegt bei  $6\text{g}/10\text{min}$ . [52] Im Frequency Sweep Versuch zeigt sich, dass sich die Kurven sehr ähnlich verhalten. Jog90MBPC ist gegenüber den anderen MB Modifikationen eindeutig nach unten

verschoben, das deutet auf eine weitere MMD hin. [66] Für die LP Modifikationen ergeben sich hingegen nur geringfügige Änderungen, eventuell deutet sich eine etwas engere  $M_w$  sowie MMD bei Jog95MBLP an. Die Molmasse verhält sich je nach prozentueller Zugabe der Masterbatches sehr unterschiedlich, für Jog90MBPC kommt es zu einem deutlichen Anstieg der  $M_w$ , siehe Tabelle 8. Für Jog95MBPC und Jog95MBLP kommt es zu einem Absinken der  $M_w$ , wobei in diesen Fällen die Differenz nicht so deutlich ist, in Bezug auf das Ausgangsmaterial.

Jog90MBLP ändert sich so wenig, dass es sich kaum um eine Erhöhung der  $M_w$  handelt auch die MMD hält sich in diesem Fall einigermaßen konstant, dies ist gekennzeichnet durch eine Welle „~“. Die rheologischen Ergebnisse der alleinigen Masterbatches wurden bereits in der Forschungsgruppe untersucht. [52] Sie sind deutlich unter den Werten des Ausgangsmaterials, was auf eine hohe  $M_w$  und eine breite MMD deutet. Der Vollständigkeit halber sind sie dem Ende der Tabelle angehängt. Dass dies nicht unbedingt zu hohen  $M_w$  und weiten MMD führt, zeigt sich in Tabelle 8. Die unterschiedliche Verhaltensweise zwischen dem MB-Podic und MB-LP Blends könnte daran liegen, dass es sich um zwei unterschiedliche Arten von Peroxiden handelt. Weiters könnte auch die Menge, sowie der Verarbeitungsprozess bei hohen Temperaturen, welcher den Masterbatch eventuell strapaziert, ausschlaggebend sein.

*Tabelle 8 Übersicht der rheologischen Ergebnisse der Frequency Sweep Analyse für Modifikationen mit Masterbatches*

<b>Probenname</b>	<b><math>\omega_c</math> (rad/s)</b>	<b><math>G_c</math> (kPa)</b>	<b>Kommentar</b>
<b>Jog</b>	<b>88,3</b>	<b>28,6</b>	
Jog90MBPC	83,9	21,6	↑ $M_w$ ↑MMD
Jog95MBPC	90,0	26,7	↓ $M_w$ ↑MMD
Jog90MBLP	87,9	28,8	~ $M_w$ ~MMD
Jog95MBLP	89,6	29,4	↓ $M_w$ ↓MMD
MB-Podic	73,6	20,9	
MB-LP	76,3	13,4	

## Thermische Analyse

Es fällt auf, dass sowohl die Schmelztemperaturen als auch die Kristallisationstemperaturen aller Fälle ident sind und diese entsprechen dem Ausgangsmaterial Jog. Die Schmelzenthalpie weist gewisse Schwankungen auf, was für Jog95MBLP zu einem etwas höheren Kristallisationsgrad von 53% führt. Dieser wurde wieder mit dem Literaturwert von 207J/g für PP berechnet. [71] Jog90MBPC hat den geringsten Kristallisationsgrad von 48%. Das ist geringfügig unter den 50% die Jog95MBPC und Jog90MBLP aufweisen.

Tabelle 9 Übersicht der Ergebnisse der DSC-Analyse der Modifikationen mit Masterbatches

Probenname	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$\Delta H_c$ (J/g)	Kristallisationsgrad (%)
Jog	166	126	104	109	50
Jog90MBPC	166	126	100	105	48
Jog95MBPC	166	126	103	109	50
Jog90MBLP	166	126	104	111	50
Jog95MBLP	166	126	111	117	53

### 3.1.3 Blends (lineares PP & HMS PP)

#### Mechanische Analyse

Das Zumischen von PP2 führt bei der Bruchdehnung zu keiner wesentlichen Veränderung, bei Jog90PP führt es sogar zu einer Verringerung. Mit Hilfe von 5wt% HMS PP wird eine leichte Steigerung der Bruchdehnung erreicht, verglichen mit dem Post Consumer Rezyklat Jog. Die Schlagzugzähigkeit wird durch alle Modifikationen reduziert, bei Verwendung von 10% des jeweiligen Blendmaterials kommt es zu einem stärkeren Absinken als bei den 5%igen

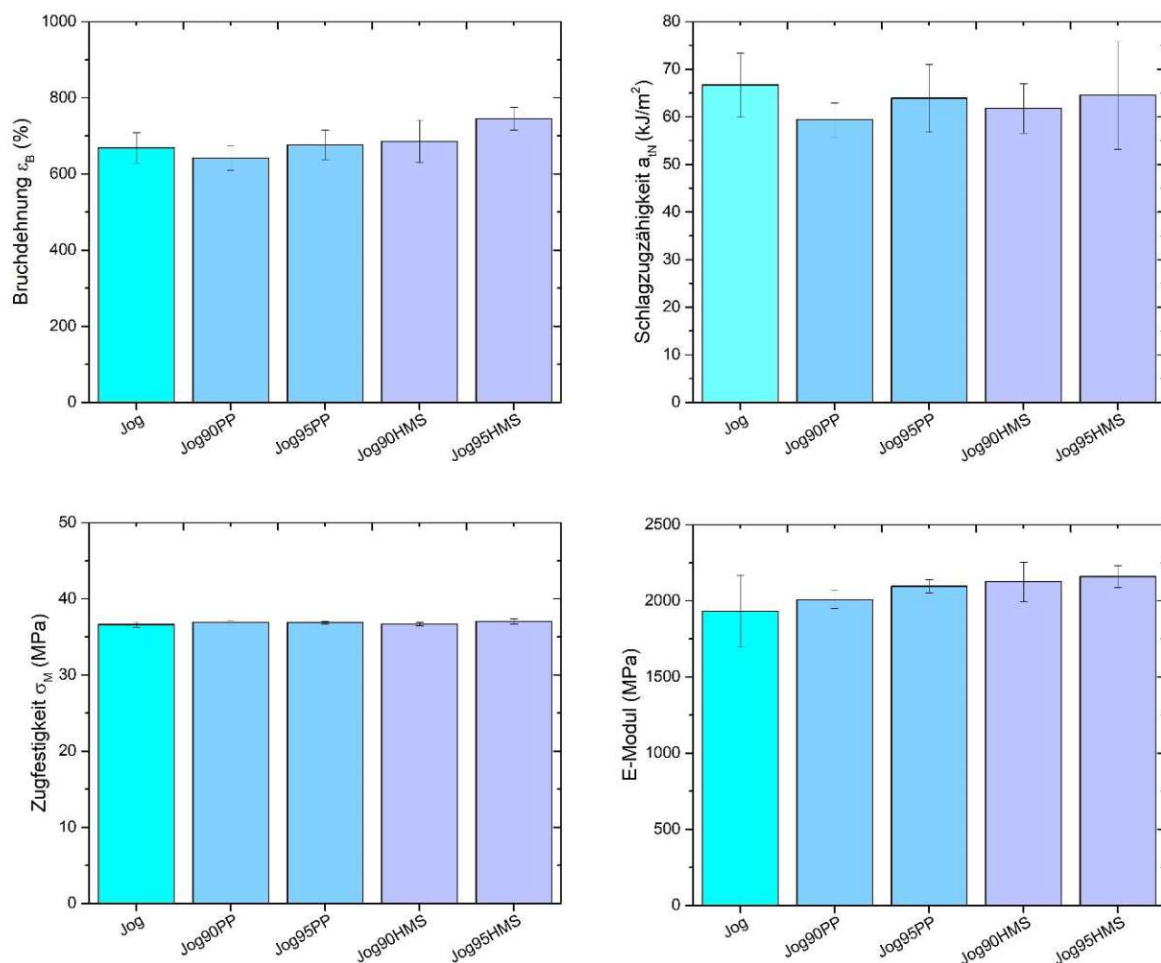


Abbildung 17 Blends verschiedener Reinmaterialien, Bruchdehnung (li. o.), Schlagzugzähigkeit (re. o.), Zugfestigkeit (li. u.) und E-Modul (re. u.)

Modifikationen. Die Zugfestigkeit hält sich konstant bei in etwa 37MPa. Der E-Modul aller Modifikationen steigt. Laut Datenblatt hat HMS PP einen E-Modul von 2000MPa [56], diese werden schon durch Zugabe von nur 5wt% erreicht und liegen sogar über dem E-Modul von Jog90HMS. Scheinbar ist die Menge an HMS PP nicht ausschlaggebend.

## Rheologische Analyse

Jog90PP sowie Jog95PP weisen keine merkliche Dehnverfestigung auf, dies ist sowohl an den Kurven als auch am SH-Koeffizienten ersichtlich und für lineares PP auch zu erwarten, siehe

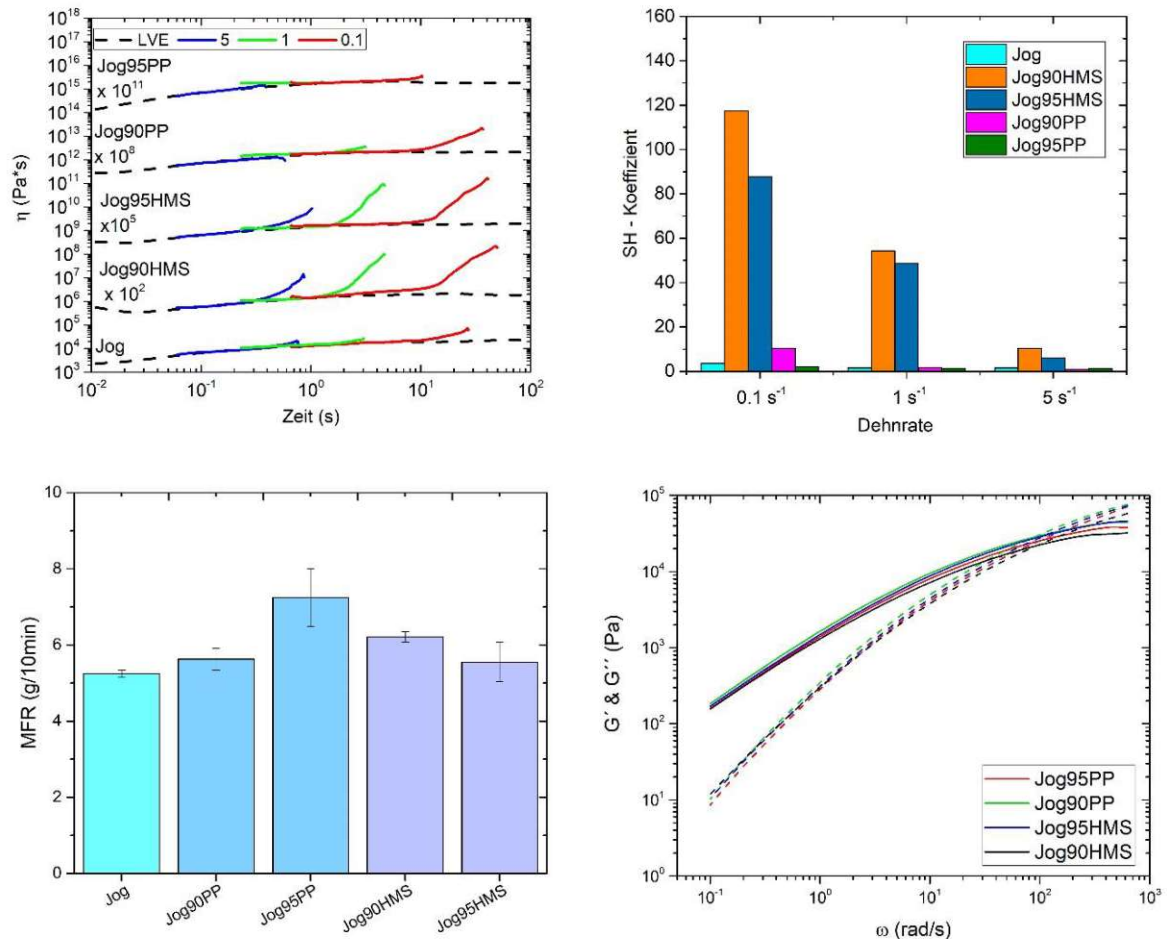


Abbildung 18 Dehnrheologie (li. o.) mit den daraus folgenden SH-Koeffizienten (re. o.) MFR Werte (li. u.) und Ergebnisse der Frequency Sweep Messung (re. u.)

Abbildung 18. Die Blends mit HMS PP lassen eine Dehnverfestigung erkennen, dies ist aufgrund des Eigenschaftsprofils von HMS PP erklärbar.

Den höchsten MFR Wert hat Jog95PP mit rund 7g/10min. Interessanterweise steigen auch die MFR Werte der HMS Modifikationen, obwohl der MFR von reinem HMS PP bei nur 2,1g/10min liegt. [56] Dies scheint allerdings keinen Einfluss zu zeigen. Der Anstieg der MFR Werte könnte auf einen Abbau durch die Extrusion beziehungsweise die hohe Verarbeitungstemperatur zurückzuführen sein.

Im Zuge des Frequency Sweeps zeigen alle Modifikationen eine sinkende Molmasse, siehe Tabelle 10. Bei Jog95HMS zeigt sich ein besonders deutlicher Unterschied. Bezüglich der MMD



ist das Bild etwas differenzierter. Jog90HMS erweist sich im Vergleich zu den weiteren Modifikationen und auch zum Ausgangsmaterial Jog als der Polymerwerkstoff mit der breitesten MMD. Jog95HMS hingegen weist als einziges eine sich verengende MMD auf, wobei Jog90PP einen so geringen Unterschied zeigt, dass hier nicht unbedingt von einer ansteigenden MMD gesprochen werden kann.

Tabelle 10 Übersicht der rheologischen Ergebnisse der Frequency Sweep Analyse für Blends

Probenname	$\omega_c$ (rad/s)	$G_c$ (kPa)	Kommentar
<b>Jog</b>	<b>88,3</b>	<b>28,6</b>	
Jog90PP	89,0	28,4	↓ $M_w$ ~MMD
Jog95PP	98,5	25,3	↓ $M_w$ ↑MMD
Jog90HMS	94,2	22,0	↓ $M_w$ ↑MMD
Jog95HMS	109,5	29,6	↓ $M_w$ ↓MMD

### Thermische Analyse

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der DSC Analyse. Der Schmelzpunkt der JogHMS Modifikationen bleibt konstant bei 166°C und die Kristallisationstemperatur bewegt sich um die 130°C. Jog90PP hat dagegen einen deutlich niedrigeren Kristallisationspunkt mit 125°C. Die Kristallisationstemperatur von PP2 dürfte jedoch keine übermäßigen Auswirkungen zeigen, diese liegt bei 110°C. [53] Größtenteils scheint sich die Temperaturen des Ausgangsmaterials Jog durchzusetzen mit  $T_m=166^\circ\text{C}$  und  $T_c=126^\circ\text{C}$ .

Tabelle 11 Übersicht der Ergebnisse der DSC-Analyse der Blends

Probenname	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$\Delta H_c$ (J/g)	Kristallisationsgrad (%)
Jog	166	126	104	109	50
Jog90PP	167	125	98	103	47
Jog95PP	165	127	106	112	51
Jog90HMS	166	130	106	114	51
Jog95HMS	166	129	107	114	52

## 3.2 PPgMAH

### 3.2.1 Großer Extruder

Es wurden Blends aus PP2 und PPgMAH mit Hilfe des *3-Zonen Einschneckenextruders Extron EX 18-26-1.5* hergestellt, siehe Tabelle 12. Für die Bezeichnung wurde t für tiefe Temperaturen (180°C), h für hohe Temperaturen (240°C) gewählt und nachfolgend ein g angehängt zur Klarstellung, dass mit dem großen Extruder gearbeitet wurde.

Tabelle 12 Übersicht großer Extruder

Zusammensetzung	Bezeichnung	Temperatur
PP2 90% + PPgMAH10%	PPMA10tg	180 °C
PP2 95% + PPgMAH 5%	PPMA5tg	180 °C
PP2 97% + PPgMAH 3%	PPMA3tg	180 °C
PP2 99% + PPgMAH 1%	PPMA1tg	180 °C
PP2 90% + PPgMAH10%	PPMA10hg	240°C
PP2 95% + PPgMAH 5%	PPMA5hg	240°C
PP2 97% + PPgMAH 3%	PPMA3hg	240°C
PP2 99% + PPgMAH 1%	PPMA1hg	240°C

## Mechanische Analyse

Interessanterweise befindet sich die Bruchdehnung der, bei 180°C extrudierten Proben, weit unterhalb der auf 240°C aufgeheizten. Der immense Unterschied der Bruchdehnung aufgrund der Verarbeitungstemperatur, zeigt sich besonders deutlich zwischen den maximalen Bruchdehnungswerten, welche jeweils 3wt% PPgMAH enthalten, dieser liegt bei über 800%. Hingegen betrachtet man den E-Modul und die Schlagzugzähigkeit sind die bei hoher Temperatur extrudierten Proben, zu sehen in Rot, im Nachteil. Die Schlagzugzähigkeit bewegt

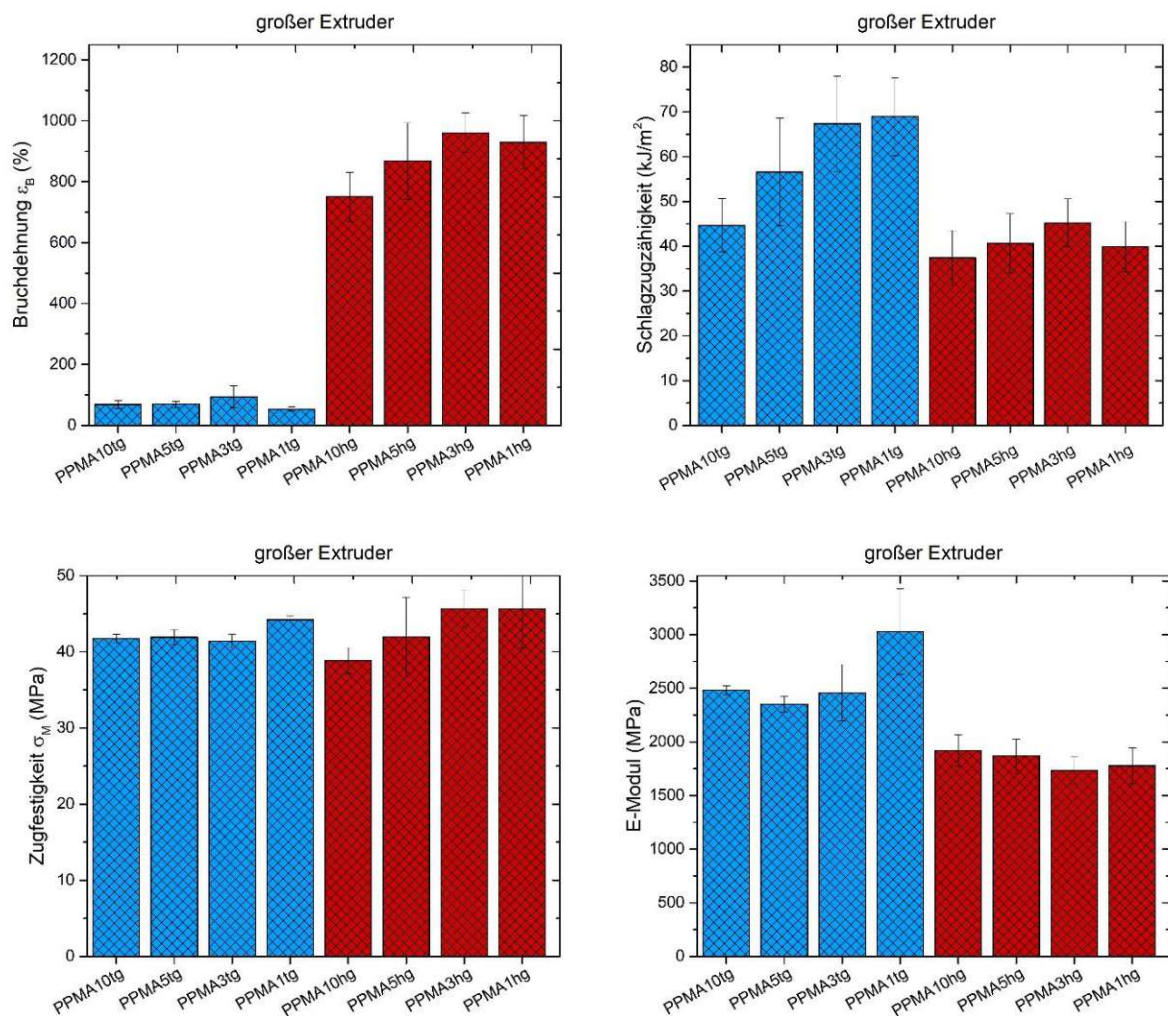


Abbildung 19 mechanische Analyse am großen Extruder, Bruchdehnung (li. o.), Schlagzugzähigkeit (re. o.), Zugfestigkeit (li. u.) und E-Modul (re. u.)

sich bei hohen Temperaturen zwischen 37-45kJ/m<sup>2</sup> und bei tiefen Temperaturen zwischen 45-69kJ/m<sup>2</sup>. Die Zugfestigkeit verhält sich ähnlich bei beiden Temperaturen und bewegt sich zwischen 39-46MPa. Bezüglich des PPgMAH Anteils, könnte es sein, dass niedrigere Konzentrationen zu höheren Werten führen. Denn betrachtet man die Proben bei hoher

Verarbeitungstemperatur führt die Zugabe von 3wt% jeweils zu den besten Ergebnissen, mit Ausnahme des E-Moduls. Bezogen auf den E-Modul führt die Zugabe von 1wt% PPgMAH zum höchsten Wert, wobei diese Probe nur um 40MPa höher ist als PPMA3hg. Ebenfalls bei den tiefen Verarbeitungstemperaturen zeigen sich höhere Ergebnisse bei niedrigerer (1-3wt%) PPgMAH Menge.

### Rheologische Analyse

In Abbildung 20 sind die Kurven des Speicher- und Verlustmoduls über der Kreisfrequenz aufgetragen. Es zeigt sich, dass jeweils die Proben mit 10wt% PPgMAH, in Rot, die breiteste MMD aufweisen. Bei hohen Temperaturen kann man der Abbildung auch entnehmen, dass PPMA1hg und PPMA3hg einen nahezu identen Kurvenverlauf aufweisen, einzig PPMA10hg hebt sich eindeutig ab.

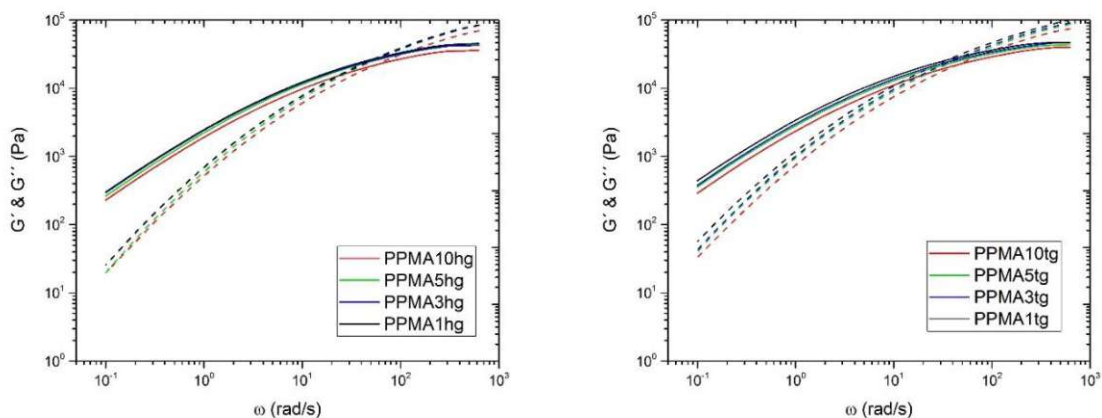


Abbildung 20 Ergebnisse der Frequency Sweep Messung bei hohen (li.) und bei tiefen Temperaturen (re.)

Zur genaueren Analyse der Frequency Sweep Ergebnisse werden Werte von Stanic et al. [72] hergenommen, welcher unmodifiziertes PP2, ebenfalls mit dem *Extron EX-18-26-1.5* bei 180°C (PP 180) und 240°C (PP 240) verarbeitete. Tabelle 13 zeigt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse. Betrachtet man die Daten der tiefen Temperaturen im Vergleich zu PP 180 zeigt sich, dass  $M_w$  überwiegend sinkt, nur für PPMA1tg steigt sie. Weiters wird die MMD größtenteils enger, außer für PPMA10tg.

Hingegen bei hohen Temperaturen zeigt sich eindeutig, dass die  $M_w$  steigt und die MMD breiter wird bezogen auf PP 240.

Tabelle 13 Übersicht der rheologischen Ergebnisse der Frequency Sweep Analyse der am großen Extruder verarbeiteten Proben

Probenname	$\omega_c$ (rad/s)	$G_c$ (kPa)	Kommentar
<b>PP 180</b>	<b>36</b>	<b>22,1</b>	
PPMA10tg	44,1	22,0	↓M <sub>w</sub> ↑MMD
PPMA5tg	38,1	23,5	↓M <sub>w</sub> ↓MMD
PPMA3tg	37,2	24,6	↓M <sub>w</sub> ↓MMD
PPMA1tg	34,6	25,8	↑M <sub>w</sub> ↓MMD
<b>PP 240</b>	<b>98</b>	<b>27,1</b>	
PPMA10hg	55,7	22,0	↑M <sub>w</sub> ↑MMD
PPMA5hg	52,1	25,1	↑M <sub>w</sub> ↑MMD
PPMA3hg	50,6	25,5	↑M <sub>w</sub> ↑MMD
PPMA1hg	53,0	26,9	↑M <sub>w</sub> ↑MMD

Die MFR Ergebnisse sind höher, desto mehr PPgMAH sie beinhalten. Das könnte an dem hohen MFR von PPgMAH liegen, der mit unseren Mitteln nicht messbar war. Weiters ist zu erkennen, dass die MFR Werte der höheren Temperaturen jeweils etwas über der bei 180°C verarbeiteten liegen, siehe Abbildung 21. Möglicherweise führen die bei der Extrusion auftretenden hohen Kräfte und Temperaturen zu diesem Verhalten.

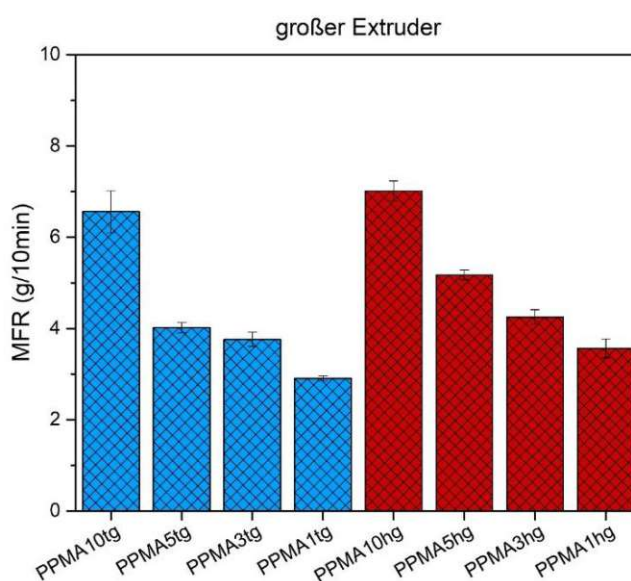


Abbildung 21 MFR Ergebnisse des großen Extruders bei unterschiedlichen Verarbeitungstemperaturen

An den Dehnviskositätskurven der Proben bei hohen Temperaturen, Abbildung 22 links, ist eine leichte Dehnverfestigung auszumachen. Betrachtet man den SH-Koeffizienten, jeweils darunter, ist jedoch zu erkennen, dass sich dies hauptsächlich auf die geringste Dehnrates von  $0,1\text{s}^{-1}$  bezieht. Im Vergleich dazu zeichnet sich bei den tiefen Temperaturen eine schlechtere Dehnviskosität ab, bestätigt wird dies durch die zugehörigen SH-Koeffizienten.

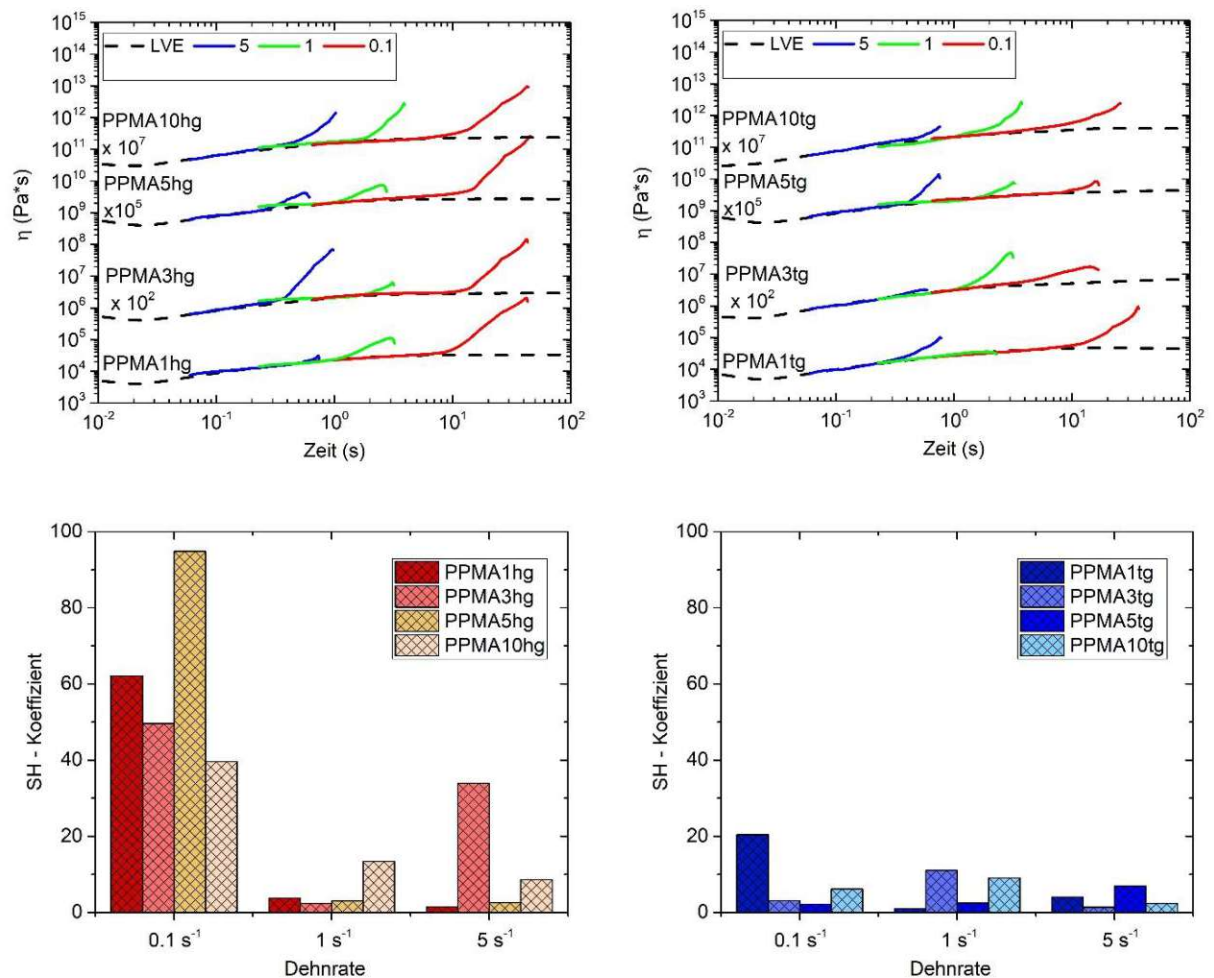


Abbildung 22 Dehnviskosität (o.) und SH-Koeffizienten (u.) bei hoher Verarbeitungstemperatur (li.) im Vergleich zu niedriger Verarbeitungstemperatur (re.)

### Thermische Analyse

Zur Beurteilung der Schmelz- und Kristallisationstemperatur werden die Ausgangswerte von PP2 betrachtet, mit  $T_m=164^\circ\text{C}$  und  $T_c=110^\circ\text{C}$ . [53] Die Schmelztemperatur zeigt jeweils ein Maximum bei 3wt% PPgMAH, insgesamt bleibt sie in einem Bereich von  $161-166^\circ\text{C}$ . Bezüglich der Kristallisationstemperatur sticht der Wert von  $119^\circ\text{C}$  bei PPMA1tg hervor. Die Proben bei hoher Verarbeitungstemperatur weisen nur eine maximale Kristallisationstemperatur von

114°C auf, auch diese wird bei 1wt% PPgMAH erzielt. Daraus folgt, dass schon durch geringe Mengen an PPgMAH große Effekte auftreten. So auch beim Kristallisationsgrad, welcher deutlich geringere Ergebnisse liefert, als in Anbetracht von isotaktischem PP zu erwarten wäre. Dieser niedrige Kristallisationsgrad könnte aufgrund einer unzureichenden Vermischung auftreten, da die MFR Werte der Komponenten sehr divers sind oder die Verarbeitungstemperatur ist möglicherweise suboptimal.

*Tabelle 14 Übersicht der Ergebnisse der DSC-Analyse der am großen Extruder verarbeiteten Proben*

<b>Probenname</b>	<b>T<sub>m</sub></b> <b>(°C)</b>	<b>T<sub>c</sub></b> <b>(°C)</b>	<b>ΔH<sub>m</sub></b> <b>(J/g)</b>	<b>ΔH<sub>c</sub></b> <b>(J/g)</b>	<b>Kristallisationsgrad</b> <b>(%)</b>
PPMA10tg	161	114	64	66	31
PPMA5tg	162	113	62	64	30
PPMA3tg	166	115	98	65	47
PPMA1tg	165	119	68	72	33
PPMA10hg	162	113	67	70	32
PPMA5hg	163	113	65	68	32
PPMA3hg	164	112	59	63	29
PPMA1hg	163	114	68	71	33

Abschließend lässt sich sagen, dass die Verarbeitungstemperatur von 240°C für die Bruchdehnung eindeutig zu besseren Ergebnissen führt als die bei 180°C hergestellten Proben. Weiters weist auch die dynamische Rheologie und die Dehnrheologie bessere Ergebnisse auf, obwohl die MFR-Werte höher sind, was auf einen Abbau schließen lässt.

Lediglich der E-Modul und die Schlagzugzähigkeit leiden unter den hohen Verarbeitungstemperaturen.

Um mögliche Mischbarkeitsprobleme näher zu beleuchten, müssen zukünftig weiterführende Viskositätsmessungen vorgenommen werden. In jedem Fall sollten aber die Temperaturen der Spritzgussverarbeitung variiert werden, um eine Optimierung zu erreichen, besonders hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften.

### 3.2.2 Kleiner Extruder

Vergleichsweise wurden am *Haake Mini Lab Doppelschneckenextruder* dieselben Blends hergestellt, siehe Tabelle 15. Für die Bezeichnung wurde wie bereits gehabt ein t für tiefe Temperaturen (180°C), h für hohe Temperaturen (240°C) gewählt und diesmal ein k angehängt zur Klarstellung, dass mit dem kleinen Extruder gearbeitet wurde.

Tabelle 15 Übersicht kleiner Extruder

Zusammensetzung	Bezeichnung	Temperatur
PP2 90% + PPgMAH10%	PPMA10tk	180 °C
PP2 95% + PPgMAH 5%	PPMA5tk	180 °C
PP2 97% + PPgMAH 3%	PPMA3tk	180 °C
PP2 99% + PPgMAH 1%	PPMA1tk	180 °C
PP2 90% + PPgMAH10%	PPMA10hk	240°C
PP2 95% + PPgMAH 5%	PPMA5hk	240°C
PP2 97% + PPgMAH 3%	PPMA3hk	240°C
PP2 99% + PPgMAH 1%	PPMA1hk	240°C

#### Mechanische Analyse

Betrachtet man die Werte der Bruchdehnung, zeigen sich zwar wieder deutlich größere Werte bei höherer Extrusionstemperatur, doch sind diese Werte bis zu 200% geringer als die des großen Extruders. Bei tiefen Extrusionstemperaturen liegen die Werte etwa in derselben Größenordnung, wobei die Standardabweichung etwas geringer ist. Es zeigt sich, dass die höchste Bruchdehnung bei niedrigstem PPgMAH Gehalt auftritt. Die Zugfestigkeit verhält sich überwiegend konstant je Verarbeitungstemperatur mit um die 40MPa bei tiefen und 36MPa bei hohen Temperaturen. Dies sind ähnliche Größenordnungen wie die Werte des großen Extruders, wo die Werte eine höhere Schwankung aufweisen und sich insgesamt zwischen 39-46MPa bewegen (siehe auch Kapitel 3.2.1). Die Schlagzugzähigkeit weist ihr Maximum bei 180°C Verarbeitungstemperatur und minimaler PPgMAH Konzentration auf. Insgesamt bewegen sich die Werte zwischen 32-53kJ/m<sup>2</sup>, das sind ebenfalls etwas geringere Werte als die des großen Extruders. Der E-Modul weist eine ähnliche Größenordnung auf, wie die Ergebnisse des großen Extruders. Allerdings zeigen die Werte des kleinen Extruders der unterschiedlichen Modifikationen eine geringere Schwankungsbreite, womöglich aufgrund



der höheren Beanspruchung. Ersichtlich sind die Ergebnisse in Abbildung 23.

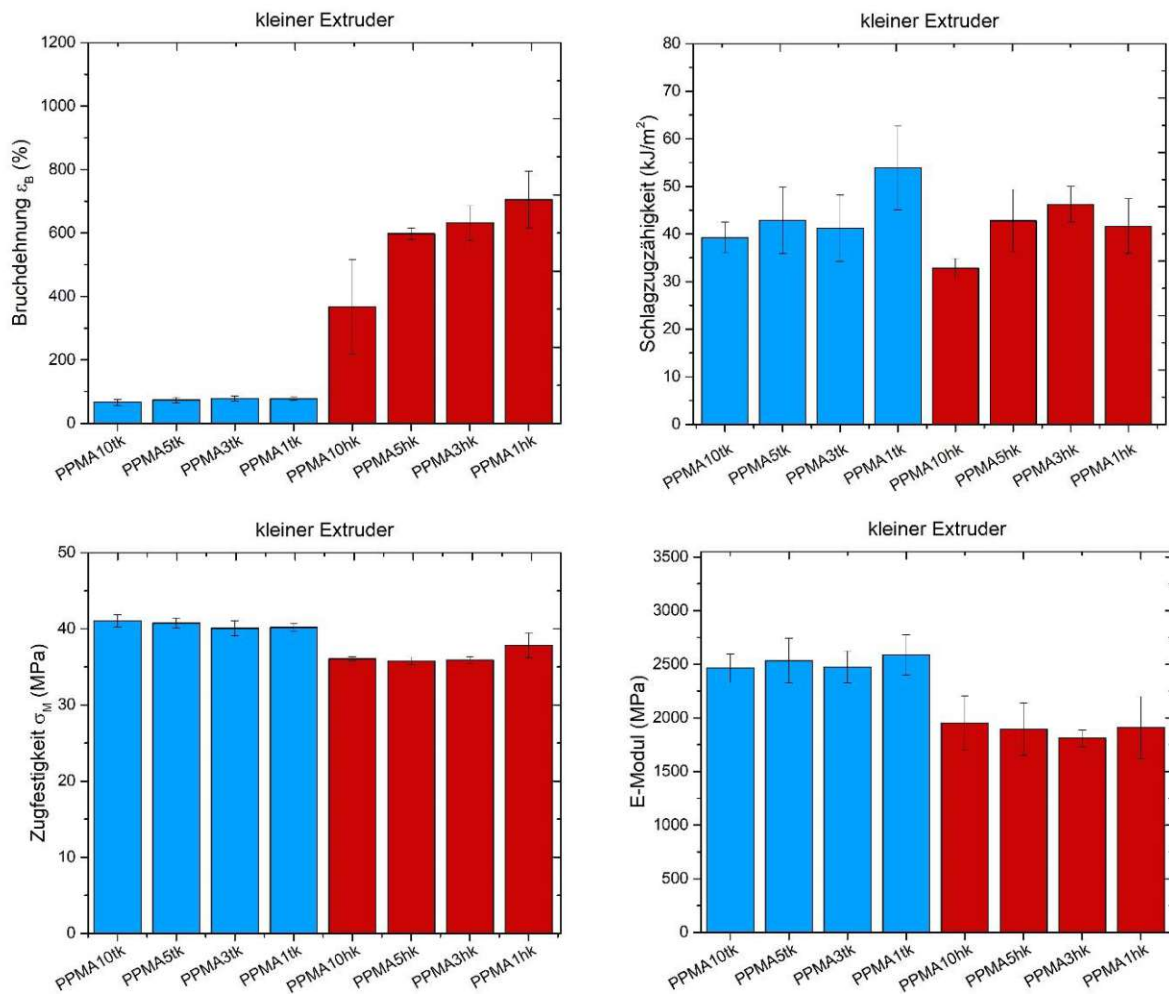


Abbildung 23 mechanische Analyse des kleinen Extruders, Bruchdehnung (li. o.), Schlagzugfähigkeit (re. o.), Zugfestigkeit (li. u.) und E-Modul (re. u.)

## Rheologische Analyse

Aus Abbildung 24 ist ersichtlich, dass die Daten der bei hoher Temperatur verarbeiteten Blends wesentlich enger verteilt sind, auch gegenüber dem großen Extruder ergibt sich ein eindeutiger Unterschied. Bei tiefen Temperaturen sind die Kurven deutlich verteilter, Abbildung 24 rechts.

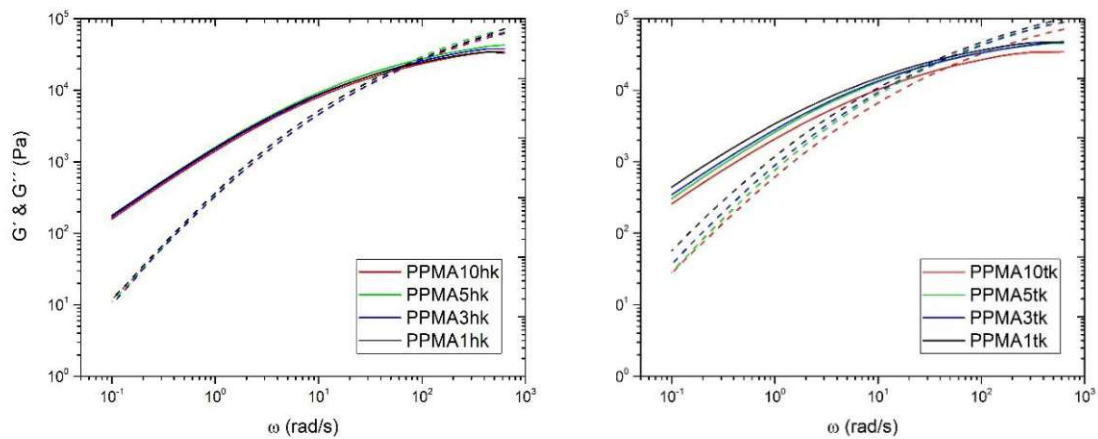


Abbildung 24 Frequency Sweep Analyse kleiner Extruder bei hohen (li.) und bei tiefen (re.) Temperaturen

Zur Auswertung der  $M_w$  und MMD wurden wieder die Werte von PP2 nach Stanic et al. [72] herangezogen. Zu sehen in Tabelle 16 sind idente Resultate der  $M_w$  und der MMD wie bei der Verarbeitung am großen Extruder (Tabelle 13). Die Ergebnisse der tiefen Temperaturen zeigen, dass  $M_w$  überwiegend sinkt, nur für PPMA1tk steigt sie. Weiters wird die MMD größtenteils enger, außer für PPMA10tk. Allerdings bei hohen Temperaturen steigt die  $M_w$  aller Modifikationen und die MMD wird in allen Fällen breiter. Die  $M_w$  sowie die MMD ist dementsprechend nicht von der geringeren Geometrie des Extruders beeinflusst worden.

Tabelle 16 Übersicht der rheologischen Ergebnisse der Frequency Sweep Analyse der am kleinen Extruder verarbeiteten Proben

Probenname	$\omega_c$ (rad/s)	$G_c$ (kPa)	Kommentar
<b>PP 180</b>	<b>36</b>	<b>23,9</b>	
PPMA10tk	46,2	20,7	↓ $M_w$ ↑MMD
PPMA5tk	40,2	24,7	↓ $M_w$ ↓MMD
PPMA3tk	37,2	24,5	↓ $M_w$ ↓MMD
PPMA1tk	34,5	25,8	↑ $M_w$ ↓MMD
<b>PP 240</b>	<b>98</b>	<b>27,1</b>	
PPMA10hk	44,1	20,6	↑ $M_w$ ↑MMD
PPMA5hk	38,1	24,9	↑ $M_w$ ↑MMD
PPMA3hk	37,2	24,0	↑ $M_w$ ↑MMD
PPMA1hk	34,6	20,6	↑ $M_w$ ↑MMD

Die MFR Werte bei tiefen Temperaturen des kleinen Extruders korrelieren mit denen des Großen und liegen zwischen rund 3-7g/10min, Abbildung 25. Die MFR Werte bei hoher Temperatur übersteigen die des großen Extruders, PPMA10hk erzielt den Maximalwert aller Werte mit knapp 9g/10min. Auch die Werte der weiteren Modifikationen sind jeweils etwas höher als die Ergebnisse des großen Extruders. Der erhöhte MFR kann diesbezüglich nicht nur auf die Temperatur und die bei der Extrusion wirkenden Kräfte zurückzuführen sein, sondern auch auf die geringere Geometrie des kleinen Extruders mit einer kürzeren Verweilzeit.

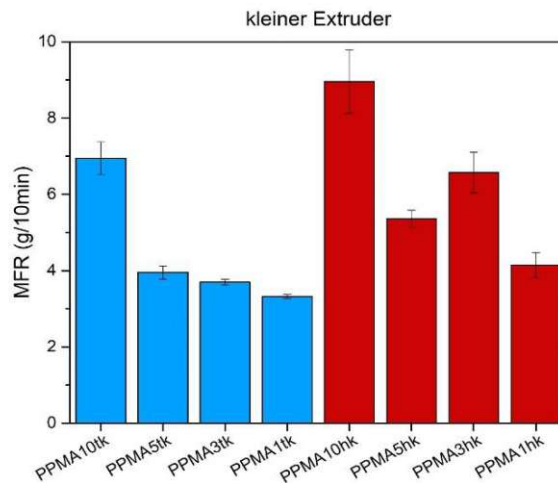


Abbildung 25 MFR Ergebnisse des kleinen Extruders bei unterschiedlichen Verarbeitungstemperaturen

Die Kurven der Dehnviskosität der tiefen Temperaturen zeigen keine Dehnverfestigung, dies bestätigen auch die SH-Koeffizienten die einen Wert von 3,45 nicht überschreiten, Abbildung 26. Bei Verarbeitungstemperaturen von 240°C ist sowohl an den Kurven als auch am SH-Koeffizient bei der höchsten Dehnrates von  $5s^{-1}$  ersichtlich, dass keine Dehnverfestigung auftritt. Die geringste Dehnrates von  $0,1s^{-1}$  zeigt jedoch sehr wohl, dass eine Dehnverfestigung ermöglicht wird. Dies spiegelt sich auch in den SH-Koeffizienten wider. PPMA3hk zeigt nur einen minimalen Ausschlag der Kurve, und daraus folgend einen minimalen SH-Koeffizienten.

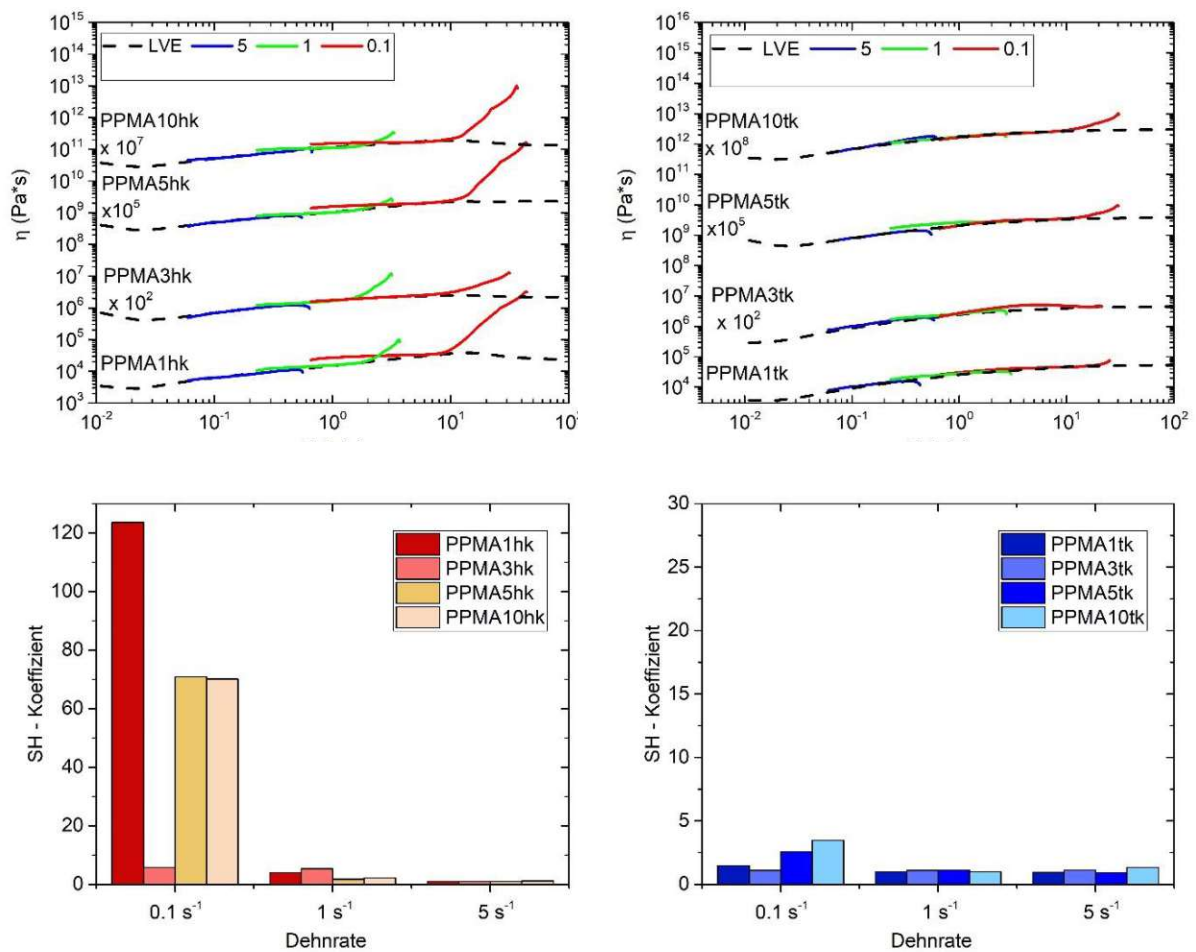


Abbildung 26 Dehnviskosität (o.) und SH-Koeffizienten (u.) bei hoher Verarbeitungstemperatur (li.) im Vergleich zu niedriger Verarbeitungstemperatur (re.)

### Thermische Analyse

Zur Beurteilung der Schmelz- und Kristallisationstemperatur werden die Ausgangswerte von PP2 betrachtet, mit  $T_m=164^\circ\text{C}$  und  $T_c=110^\circ\text{C}$ . [53] Die Schmelztemperatur zeigt ein Maximum bei PPMA1tk und PPMA5hk. Insgesamt bewegen sich die Temperaturen zwischen  $162-168^\circ\text{C}$ . Bezüglich der Kristallisationstemperatur werden mit  $121^\circ\text{C}$  noch höhere Temperaturen erreicht als beim großen Extruder. Bei den höheren Verarbeitungstemperaturen bewegt sich  $T_c$  bei  $113^\circ\text{C}$  außer für PPMA1hk, hier liegt  $T_c$  bei  $117^\circ\text{C}$ . Diese Ergebnisse zeigen, dass die geringsten Mengen an PPgMAH bei der Kristallisationstemperatur die größte Abweichung zum Vergleichsmaterial PP2 aufweisen. Der Kristallisationsgrad wird mit  $207\text{J/g}$  [71] berechnet und es zeigen sich, abgesehen von PPMA1hk, deutlich höhere Werte als die des großen Extruders. An die Kristallinität eines isotaktischen PP kommen sie allerdings nicht heran.

Tabelle 17 Übersicht der Ergebnisse der DSC-Analyse der am kleinen Extruder verarbeiteten Proben

Probenname	T <sub>m</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (°C)	ΔH <sub>m</sub> (J/g)	ΔH <sub>c</sub> (J/g)	Kristallisationsgrad (%)
PPMA10tk	166	118	101	103	49
PPMA5tk	165	118	112	116	54
PPMA3tk	166	121	113	116	55
PPMA1tk	168	121	109	111	53
PPMA10hk	162	113	109	113	53
PPMA5hk	165	113	98	101	47
PPMA3hk	164	113	101	103	49
PPMA1hk	163	117	71	71	34

Zusammenfassend zeigt sich ein ähnliches Bild wie beim großen Extruder. Allerdings sind die Ergebnisse der mechanischen Analyse, mit Ausnahme des E-Moduls, doch merklich verringert gegenüber dem großen Extruder.

## 4 Zusammenfassung

Ein Ziel war Post Consumer Rezyklat (Joghurtbecher), bei in der Industrie üblichen Verarbeitungstemperaturen von 240°C, in seinen Eigenschaften zu verbessern. Es wurden sowohl mechanische, rheologische als auch thermische Prüfungen durchgeführt, um die Qualität der unterschiedlichen Modifizierungen zu charakterisieren. Es wurden Additive verschiedener Art verwendet.

- Peroxide: Podic und LP
- Masterbatches: mit PP2 als Hauptmaterial und jeweils 10wt% Podic und LP
- Reinmaterialien: PP2 und HMS PP

Ein weiteres Ziel war eine eventuelle Tauglichkeit von PPgMAH für Recyclingprozesse abschätzbar zu machen. Dafür wurden Blends aus Reinmaterial PP2 mit verschiedenen Konzentrationen von PPgMAH hergestellt und geprüft. PPgMAH kommt eigentlich als Compatibilizer oder Haftvermittler zum Einsatz, und bis dato sind uns keine Anwendungsgebiete als alleiniger Zusatzstoff mit PP bekannt. Im Zuge dieser Versuchsreihe wurde auch untersucht, ob es zu Veränderungen kommt, indem dieselben Modifikationen an zwei unterschiedlichen Extrudern durchgeführt wurden.

### Joghurtbecher Modifikationen

Die Proben mit Peroxid als Additiv zeigten eine Erhöhung der Bruchdehnung und eine Senkung des E-Moduls. Die Schlagzugzähigkeit und die Zugfestigkeit halten sich einigermaßen konstant.

Eine Dehnverfestigung wird durch die deutlichen Abweichungen der Dehnviskositätskurven vom LVE Bereich, sowie durch den SH-Koeffizienten bestätigt. Der MFR ist zwar erhöht, doch es wird eine weitere MMD erreicht. Die Zugabe von Podic führt zur höchsten Kristallisationstemperatur, was für das Auftreten von Verzweigungen sprechen könnte. Weiters ist der Kristallisationsgrad von JogPC mit 53% am höchsten.

Durch die Verwendung von Masterbatches tritt eine Erhöhung der Bruchdehnung auf. Der Maximalwert, der bei Jog95MBPC auftritt, übersteigt den Höchstwert der Peroxid Modifikationen um 20%. Außerdem führt die Zugabe des Masterbatches im Vergleich zu

reinen Peroxiden, zu einer Verbesserung des E-Moduls und der Schlagzugzähigkeit. Die MFR Ergebnisse zeigen erneut eine deutliche Steigerung gegenüber dem Ausgangsmaterial. Den geringsten Wert weist Jog95MBPC mit rund 6g/10min auf. Das ist auch in Bezug auf die reine Peroxid Zugabe der Minimalwert. Die Ergebnisse der Frequency Sweep Analyse zeigen für die LP Modifikationen eine engere MMD, wobei die Werte nur geringfügige Änderungen im Vergleich mit dem Ausgangsmaterial Jog zeigen. Für die Modifikationen mit MB-Podic ergeben sich breitere MMD. Bezüglich der Dehnverfestigung sticht wieder die Formulierung Jog95MBPC hervor, die bei allen Dehnraten einen soliden SH-Koeffizienten aufweist. Die restlichen Proben zeigen einen guten SH-Koeffizienten nur bei einer Dehnrate von  $0,1s^{-1}$ . Die Schmelz- und Kristallisationstemperaturen zeigen die exakt selben Daten des Ausgangsmaterials Jog.

Bei Verwendung von PP2 kommt es zu keiner Verbesserung der Bruchdehnung. Die Zugabe von HMS PP erreicht eine leichte Steigerung der Bruchdehnung, im Vergleich mit dem Post Consumer Rezyklat Jog. Insgesamt zeigt sich, dass die Schlagzugzähigkeit leidet, die Zugfestigkeit etwa konstant bleibt und der E-Modul steigt. Der maximale E-Modul wird von Jog95HMS erreicht. Der MFR steigt an. Trotzdem tritt eine Dehnverfestigung für die Proben mit HMS PP auf. Die Kristallisationstemperatur der HMS PP Formulierungen zeigt höhere Werte als sie von Jog zu erwarten wären und als sich bei JogPP einstellen. Im Vergleich zu den JogMB Modifikationen zeigt sich ein etwas höherer E-Modul, bezüglich Schlagzugzähigkeit und Bruchdehnung punkten jedoch die MB Modifikationen mit größeren Werten.

Zusammenfassend bestätigte sich erneut, dass durch die Zugabe von Peroxiden Langkettenverzweigungen möglich sind. Besonders positive Ergebnisse erzielte allerdings die Versuchsreihe mit Masterbatches, hier konnte die Bruchdehnung nochmals gesteigert werden, sowie der E-Modul und die Schlagzugzähigkeit und eine Dehnverfestigung gezeigt werden. Dies ist aufgrund der besseren Handhabung eines Masterbatches ein besonderer Erfolg. Bezüglich der Reinmaterialien, welche als Vergleichsreihe geführt wurden, konnte HMS PP eine Dehnverfestigung, Verbesserungen beim E-Modul und der Bruchdehnung aufweisen, und es wurden sogar vorteilhaftere Ergebnisse bei einer geringeren Zugabe von nur 5wt% erreicht.

## PPgMAH

Eindeutig ersichtlich ergeben sich bessere Resultate für die Bruchdehnung bei hoher Verarbeitungstemperatur. Die Schlagzugzähigkeit und der E-Modul profitieren jedoch von einer geringen Extrusionstemperatur. Prinzipiell gilt, dass höhere Mengen an PPgMAH nicht unbedingt zu positiveren Ergebnissen führen. Denn meist erzielen 1-3wt% PPgMAH die höchsten Werte. Eine Dehnverfestigung ist nur bei hohen Temperaturen zu beobachten. Obwohl der MFR hier auf einen höheren Abbau durch höhere Werte hindeuten würde. Aus der Analyse des Frequency Sweep ergibt sich, dass bei tiefen Temperaturen die  $M_w$  überwiegend sinkt, nur für PPMA1tg steigt sie. Weiters wird die MMD größtenteils enger, außer für PPMA10tg. Hingegen bei hohen Temperaturen zeigt sich eindeutig, dass die  $M_w$  steigt und die MMD breiter wird. Bei tiefer Verarbeitungstemperatur treten tendenziell höhere Kristallisationstemperaturen auf. Die Maxima ergeben sich jeweils bei 1wt% PPgMAH. Der Kristallisationsgrad ist im großen Extruder deutlich herabgesetzt.

Trotzdem, insgesamt bestätigt sich der Eindruck in den Ergebnissen, dass die Verarbeitung mit einem Extruder kleinerer Geometrie zu geringeren Werten führt sowohl in der Bruchdehnung, der Schlagzugzähigkeit als auch der Zugfestigkeit, auch wenn es sich teils um nur geringe Einbußen handelt. Einzig die Resultate des E-Moduls bewegen sich im selben Bereich wie die des großen Extruders, wobei auch hier der Maximalwert bei 1wt% PPgMAH mit Hilfe des großen Extruders entsteht. Eine Dehnverfestigung zeigt sich, wenn überhaupt, nur bei einer Dehnrate von  $0,1s^{-1}$  und hoher Verarbeitungstemperatur.

Abschließend lässt sich sagen, dass die kleinere Geometrie, sowie die höhere Scherbelastung des Doppelschneckenextruders die Ergebnisse doch merklich beeinflusst und zu überwiegend niedrigeren Ergebnissen führt. Eine Dehnverfestigung nur mit Hilfe von PPgMAH lässt sich eher bei hoher Verarbeitungstemperatur und großen Extrudergeometrien herbeiführen, hierfür spricht auch die breitere MMD.



## 5 Ausblick

Die Zugabe von Peroxiden führt zu Langkettenverzweigungen, dies ist bereits Tatsache und in verschiedenen Forschungsarbeiten untersucht. Zusätzlich konnte durch die vorliegenden Ergebnisse nochmals bestätigt werden, dass das Hauptmaterial auch ein Post Consumer Rezyklat sein kann.

Noch erfreulicher ist, dass die Zugabe mittels Peroxid Masterbatches ebenso gute Werte erzielt. Die mechanischen Eigenschaften werden gegenüber dem Ausgangsmaterial sogar verbessert und eine Dehnverfestigung tritt weiterhin auf. Diese Resultate sind besonders für die Industrie von Vorteil, da bei in der Industrie üblichen Temperaturen gearbeitet wurde. Weiters wird ein Nachteil der Peroxide durch die Verarbeitung zu einem Masterbatch behoben, und zwar die Lagerung bei niedrigen Temperaturen.

Ob sich die Verarbeitung eines Post Consumer Rezyklats zu einem höherwertigen Produkt, welches nachfolgend in einem breiteren Anwendungsgebiet einsetzbar wäre etabliert, bleibt fraglich. Ideale Bedingungen wären der Industrie geboten. Die optimale Konzentration des Peroxids im Masterbatch, sowie die perfekte Menge des Masterbatches im Rezyklat könnten noch genauer untersucht werden.

Bezogen auf die PPgMAH Blends kommt es zu starken Unterschieden aufgrund der Verarbeitungstemperatur. Die mechanischen Eigenschaften sind dementsprechend unterschiedlich und eine Dehnverfestigung tritt möglicherweise nur bei hohen Temperaturen auf, was aufgrund der MMD und dem SH-Koeffizienten zu deuten wäre. Die tiefe Verarbeitungstemperatur führt zu einem Einbruch der Bruchdehnung. Interessant wäre, ob sich unterschiedliche Temperaturen des Extrusionsprozesses und der Spritzgussverarbeitung positiv auf die Bruchdehnung auswirken könnten. Weiters wäre noch interessant, ob Variationen der Spritzgussparameter, wie der Druck und die Werkzeugtemperatur zu positiven Effekten führen könnten. Ob PPgMAH eventuell für die Veredelung von Post Consumer Abfällen einsetzbar ist, bedarf noch einiger Forschungsarbeit.

Im Allgemeinen ist erkennbar, dass die Verarbeitung im kleinen Extruder zu beeinträchtigten Ergebnissen führt, was eventuell mit einer höheren Scherbelastung, einer kürzeren Verweilzeit und der geringeren Geometrie im Extrusionsprozess zu tun hat.

## 6 Literatur

1. W. Hellerich, G. Harsch, E. Baur (2010). Werkstoff-Führer Kunststoffe. Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte, 10. Aufl. Hanser, München
2. D.K.A. Barnes, F. Galgani, R.C. Thompson, M. Barlaz (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 364(1526):1985–1998. doi:10.1098/rstb.2008.0205
3. M.R. Gregory (2009). Environmental implications of plastic debris in marine settings--entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 364(1526):2013–2025. doi:10.1098/rstb.2008.0265.
4. J.R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T.R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan, K.L. Law (2015). Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347(6223):768–771. doi:10.1126/science.1260352
5. E.L. Teuten, J.M. Saquing, D.R.U. Knappe, M.A. Barlaz, S. Jonsson, A. Björn, S.J. Rowland, R.C. Thompson, T.S. Galloway, R. Yamashita, D. Ochi, Y. Watanuki, C. Moore, P.H. Viet, T.S. Tana, M. Prudente, R. Boonyatumanond, M.P. Zakaria, K. Akkhavong, Y. Ogata, H. Hirai, S. Iwasa, K. Mizukawa, Y. Hagino, A. Imamura, M. Saha, H. Takada (2009). Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 364(1526):2027–2045. doi:10.1098/rstb.2008.0284.
6. European Commission (2015). Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. Brussels, Belgium
7. European Commission (2018). A European strategy for plastics in a circular economy. Brussels, Belgium
8. Plastics Europe. Plastics-The Facts 2020.  
<https://www.plasticseurope.org/de/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>.  
Zugegriffen: 19. März 2021
9. E. Van Eygen, D. Laner, J. Fellner (2018). Circular economy of plastic packaging: Current practice and perspectives in Austria. *Waste Manag* 72:55–64.  
doi:10.1016/j.wasman.2017.11.040
10. E. Van Eygen, J. Fellner (2020). Nutzen und Kosten eines verstärkten Recyclings von Kunststoffverpackungen. *Österr Wasser- und Abfallw* 72(1-2):38–46.  
doi:10.1007/s00506-019-00629-9

11. C. Hopmann, W. Michaeli (2015). Einführung in die Kunststoffverarbeitung, 7. Aufl. Hanser, München
12. Umweltbundesamt. Chemisches Recycling.  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17\\_hgp\\_chemisches-recycling\\_online.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf). Zugegriffen: 21. März 2021
13. Ecoplast. Werkstoffliches Recycling. <https://www.ecoplast.com/recycling/kreislauf/>.  
Zugegriffen: 22. März 2021
14. M. Al-Maaded, N.K. Madi, R. Kahraman, A. Hodzic, N.G. Ozerkan (2012). An Overview of Solid Waste Management and Plastic Recycling in Qatar. *J Polym Environ* 20(1):186–194. doi:10.1007/s10924-011-0332-2
15. D. Lazarevic, E. Aoustin, N. Buclet, N. Brandt (2010). Plastic waste management in the context of a European recycling society: Comparing results and uncertainties in a life cycle perspective. *Resources, Conservation and Recycling* 55(2):246–259. doi:10.1016/j.resconrec.2010.09.014
16. P.A. Wäger, R. Hischer (2015). Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant. *Sci Total Environ* 529:158–167. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.05.043
17. F. Gu, P. Hall, N.J. Miles (2016). Development of composites based on recycled polypropylene for injection moulding automobile parts using hierarchical clustering analysis and principal component estimate. *Journal of Cleaner Production* 137:632–643. doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.028
18. F. Gu, P. Hall, N.J. Miles (2016). Performance evaluation for composites based on recycled polypropylene using principal component analysis and cluster analysis. *Journal of Cleaner Production* 115:343–353. doi:10.1016/j.jclepro.2015.12.062
19. S.M. Al-Salem, P. Lettieri, J. Baeyens (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review. *Waste Manag* 29(10):2625–2643. doi:10.1016/j.wasman.2009.06.004
20. R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur (2008). Use of recycled plastic in concrete: a review. *Waste Manag* 28(10):1835–1852. doi:10.1016/j.wasman.2007.09.011
21. E.J. Bakker, P.C. Rem, N. Fraunholz (2009). Upgrading mixed polyolefin waste with magnetic density separation. *Waste Manag* 29(5):1712–1717.

doi:10.1016/j.wasman.2008.11.006

22. L. Incarnato, P. Scarfato, D. Acierno (1999). Rheological and mechanical properties of recycled polypropylene. *Polym. Eng. Sci.* 39(4):749–755. doi:10.1002/pen.11463
23. F. Kamleitner, B. Duscher, T. Koch, S. Knaus, V.M. Archodoulaki (2017). Upcycling of polypropylene-the influence of polyethylene impurities. *Polym Eng Sci* 57(12):1374–1381. doi:10.1002/pen.24522
24. R.-D. Maier, M. Schiller (2016). *Handbuch Kunststoff Additive*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG
25. D.B. Malpass, E.I. Band (2012). *Introduction to industrial polypropylene. Properties, catalysts, processes*. Wiley, Salem, Mass, Hoboken, N.J
26. A.D. Gotsis, B.L.F. Zeevenhoven, A.H. Hogt (2004). The effect of long chain branching on the processability of polypropylene in thermoforming. *Polym Eng Sci* 44(5):973–982. doi:10.1002/pen.20089
27. R. Legendijk, A. Hogt, A. Buijtenhuijs, A. Gotsis (2001). Peroxydicarbonate modification of polypropylene and extensional flow properties. *Polymer* 42(25):10035–10043. doi:10.1016/S0032-3861(01)00553-5
28. A.H. Hogt, B. Fischer, G.K. Spijkerman (1999). WO Patent 99/27007. Akzo Nobel
29. M. Rätzsch (1999). Reaction mechanism to long-chain branched PP. *Journal of Macromolecular Science, Part A* 36(11):1759–1769. doi:10.1081/MA-100101626
30. D. Auhl, J. Stange, H. Münstedt, B. Krause, D. Voigt, A. Lederer, U. Lappan, K. Lunchwitz (2004). Long-Chain Branched Polypropylenes by Electron Beam Irradiation and Their Rheological Properties. *Macromolecules* 37(25):9465–9472. doi:10.1021/ma030579w
31. W. Weng, W. Hu, A.H. Dekmezian, C.J. Ruff (2002). Long Chain Branched Isotactic Polypropylene. *Macromolecules* 35(10):3838–3843. doi:10.1021/ma020050j
32. J.A. Langston, R.H. Colby, T.M. Chung, F. Shimizu, T. Suzuki, M. Aoki (2007). Synthesis and characterization of long chain branched isotactic polypropylene via metallocene catalyst and T-reagent. *Macromolecules* 40(8):2712–2720
33. F. Kamleitner, B. Duscher, T. Koch, S. Knaus, V.-M. Archodoulaki (2017). Long chain branching as an innovative up-cycling process of polypropylene post-consumer waste - Possibilities and limitations. *Waste Manag* 68:32–37. doi:10.1016/j.wasman.2017.07.022
34. M.E. Cangussú, A.P. de Azeredo, A.G. Simanke, B. Monrabal (2018). Characterizing Long Chain Branching in Polypropylene. *Macromol. Symp.* 377(1):1700021.

doi:10.1002/masy.201700021

35. J. Maris, S. Bourdon, J.M. Brossard, C. Laurent, L. Fontaine, V. Montembault (2018). Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes. *Polymer Degradation and Stability* 147:245–266. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.001
36. E.P. Moore (1996). *Polypropylene handbook: polymerization, characterization, properties, processing, applications*. Hanser Publishers
37. D.Y. Kim, J.H. Cha, K.H. Seo (2019). Effects of chain extender on properties and foaming behavior of polypropylene foam. *RSC Adv.* 9(44):25496–25507. doi:10.1039/C9RA04824C
38. K.C. Menzer (2013). *Morphologie, Perkulations- und mechanisches Verhalten von schmelzegemischten isotaktischen Polypropylen-basierten/MWCNT-Kompositen*. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
39. Lanxess. <https://lanxess.com/de-DE/Produkte-und-L%C3%B6sungen/Products/m/Maleic-anhydride>. Zugegriffen: 22. März 2021
40. D. Braun, I. Braun, I. Krämer, G.P. Hellmann (1997). Heterogeneous grafting of maleic anhydride and  $\alpha$ -methylstyrene from atactic polypropylene. *Angew. Makromol. Chemie* 251(1):37–48. doi:10.1002/apmc.1997.052510104
41. M. Sclavons, V. Carlier, B. de Roover, P. Franquinet, J. Devaux, R. Legras (1996). The anhydride content of some commercial PP-g-MA: FTIR and titration. *J. Appl. Polym. Sci.* 62(8):1205–1210. doi:10.1002/(SICI)1097-4628(19961121)62:8<1205::AID-APP10>3.0.CO;2-6
42. L. Spoljaric-Lukacic (2004). *Radikalisches Pfropfen aliphatischer Maleimide auf niedermolekulare Modellverbindungen für Polyolefine*. Dissertation, TU Wien
43. J. Schultz, L. Lavielle, A. Carre, P. Comien (1989). Surface properties and adhesion mechanisms of graft polypropylenes. *J Mater Sci* 24(12):4363–4369. doi:10.1007/BF00544513
44. W. Xu, G. Liang, H. Zhai, S. Tang, G. Hang, W.-P. Pan (2003). Preparation and crystallization behaviour of PP/PP-g-MAH/Org-MMT nanocomposite. *European Polymer Journal* 39(7):1467–1474. doi:10.1016/S0014-3057(03)00015-6
45. M. Horbens, A. Pfriem, J. Ganster, A. Wagenführ (2012). Holzfasern als Verstärkungfasern in Holz-Polypropylen-Verbundwerkstoffen. *Eur. J. Wood Prod.* 70(5):587–594. doi:10.1007/s00107-011-0589-0

46. D.H. Kim, P.D. Fasulo, W.R. Rodgers, D.R. Paul (2007). Structure and properties of polypropylene-based nanocomposites: Effect of PP-g-MA to organoclay ratio. *Polymer* 48(18):5308–5323. doi:10.1016/j.polymer.2007.07.011
47. Y. Seo, J. Kim, K.U. Kim, Y.C. Kim (2000). Study of the crystallization behaviors of polypropylene and maleic anhydride grafted polypropylene. *Polymer* 41(7):2639–2646. doi:10.1016/S0032-3861(99)00425-5
48. B.-X. Yang, J.-H. Shi, K.P. Pramoda, S.H. Goh (2008). Enhancement of the mechanical properties of polypropylene using polypropylene-grafted multiwalled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology* 68(12):2490–2497. doi:10.1016/j.compscitech.2008.05.001
49. J. Guapacha, J. Barbosa, E.M. Vallés, L.M. Quinzani, M.D. Failla (2020). Improving melt strength of polypropylene by minimal branching and blending. *J Appl Polym Sci* 137(26):48845. doi:10.1002/app.48845
50. S.H. Tabatabaei, P.J. Carreau, A. Ajji (2010). Rheological properties of blends of linear and long-chain branched polypropylenes. *Polym Eng Sci* 50(1):191–199. doi:10.1002/pen.21473
51. T.J. McCallum, M. Kontopoulou, C.B. Park, E.B. Muliawan, S.G. Hatzikiriakos (2007). The rheological and physical properties of linear and branched polypropylene blends. *Polym. Eng. Sci.* 47(7):1133–1140. doi:10.1002/pen.20798
52. S. Stanic, T. Koch, K. Schmid, S. Knaus, V.-M. Archodoulaki (2021). Upcycling of polypropylene with various concentrations of peroxydicarbonate and dilauroyl peroxide and two processing steps. *J Appl Polym Sci*:50659. doi:10.1002/app.50659
53. Borealis (2019). Polypropylene HC600TF. Product Data Sheet
54. Pergan. The Peroxide Company. PEROXAN C126. Datenblatt
55. Pergan. The Peroxide Company. PEROXAN LP-Fein. Datenblatt
56. Borealis (2021). Polypropylene Daploy™ WB140HMS. Product Data Sheet
57. Westlake Chemical (2017). EPOLENE-E43. Product Data Sheet
58. D. Graebing (2002). Synthesis of Branched Polypropylene by a Reactive Extrusion Process. *Macromolecules* 35(12):4602–4610. doi:10.1021/ma0109469
59. M. Xanthos (1992). *Reactive extrusion: principles and practice*. Hanser Publishers(Germany), 1992:304
60. DIN (2005). *Kunststoffe – Bestimmung der Schlagzugzähigkeit (ISO 8256:2004)*; Deutsche

Fassung EN ISO 8256:2004.

61. DIN (2012). Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO 527-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-2:2012.
62. W. Grellmann, S. Seidler (2015). Kunststoffprüfung. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG
63. S. Lampman (2003). Characterization and failure analysis of plastics. Asm International, Cleveland, USA
64. J.E. Mark (Hrsg) (2007). Physical properties of polymers handbook, 2. Aufl. Springer, New York, NY
65. DIN (2019). Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2019.
66. T. Schröder (2018). Rheologie der Kunststoffe. Theorie und Praxis. Hanser eLibrary. Hanser, München
67. 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.
68. J.M. Dealy, D.J. Read, R.G. Larson (2018). Structure and rheology of molten polymers: from structure to flow behavior and back again. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG
69. DIN (2017). Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO 11357-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 11357-1:2016.
70. G.W. Ehrenstein, G. Riedel, P. Trawiel (2003). Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen, 2. Aufl. Hanser, München
71. D.W. van Krevelen (1997). Properties of Polymers. Their Correlation with Chemical Structure; Their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions, 3. Aufl. Elsevier Science, Oxford
72. S. Stanic, G. Gottlieb, T. Koch, L. Göpperl, K. Schmid, S. Knaus, V.-M. Archodoulaki (2020). Influence of Different Types of Peroxides on the Long-Chain Branching of PP via Reactive Extrusion. *Polymers (Basel)* 12(4). doi:10.3390/polym12040886
73. A. Ghijssels, C.H. Massardier, R.M. Bradley (1997). Brittle Melt Rupture Phenomena in Polymer Processing: An Overview. *International Polymer Processing* 12(2):147–154
74. H. Briehl (2008). Chemie der Werkstoffe, 2. Aufl. Lehrbuch Chemie. Teubner, Wiesbaden

# A Anhang

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

$a_{tN}$	Schlagzugarbeit
CH	Schweiz
COP	Cross- Over-Punkt
E-Modul	Elastizitätsmodul
$E_t$	Zugmodul (Elastizitätsmodul bei Zug)
EU	Europäische Union
$\epsilon$	Dehnung
$\epsilon_B$	Bruchdehnung
$G'$	Speichermodul
$G''$	Verlustmodul
$\eta$	Viskosität
$\eta^*$	komplexe Viskosität
LCB	Long chain branching (Langkettenverzweigungen)
LDPE	Low Density Polyethylene
LP	Peroxan LP-Fein
LVE	Linear-Viskoelastisch
MAH	Maleinsäureanhydrid
MB-LP	Masterbatch mit LP
MB-Podic	Masterbatch mit Podic
MFR	Melt Flow Rate (Schmelzfließrate)
MMD	Molecular mass distribution (Molmassenverteilung)
$M_w$	Molecular weight (Molmasse)
NO	Norwegen
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
Podic	Peroxan C126
PP	Polypropylen
PPgMAH	Polypropylen gefropftes Maleinsäureanhydrid



PVC	Polyvinylchlorid
$\sigma$	Spannung
$\sigma_M$	Zugfestigkeit
$T_C$	Kristallisationstemperatur
$T_m$	Schmelztemperatur
$\omega$	Kreisfrequenz
wt%	Gewichtsprozent

## Messergebnisse

Tabelle A.1 Messergebnisse

Probenname	$E_t$ (MPa)	$a_{tN}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$\epsilon_B$ (%)	$\sigma_M$ (MPa)	MFR (g/10min)
Jog	1932 ± 238	66,7 ± 6,8	668,5 ± 39,5	36,61 ± 0,36	5,24 ± 0,10
JogPC	1870 ± 41	64,8 ± 4,6	722,0 ± 66,3	36,02 ± 0,16	6,55 ± 0,61
JogLP	1730 ± 139	66,9 ± 7,0	747,3 ± 66,0	35,76 ± 0,19	6,87 ± 0,26
Jog90MBPC	2044 ± 106	68,5 ± 8,6	745,3 ± 81,7	37,01 ± 1,04	7,11 ± 0,35
Jog95MBPC	1958 ± 58	67,2 ± 6,6	768,2 ± 76,0	37,43 ± 1,19	6,20 ± 0,28
Jog90MBLP	2010 ± 245	69,2 ± 2,0	749,3 ± 52,0	36,72 ± 0,52	6,73 ± 0,39
Jog95MBLP	2007 ± 122	68,6 ± 5,6	699,7 ± 56,5	36,41 ± 0,29	7,44 ± 0,24
Jog90PP	2008 ± 59	59,4 ± 3,5	641,7 ± 31,4	36,89 ± 0,28	5,63 ± 0,29
Jog95PP	2095 ± 42	63,9 ± 7,1	676,3 ± 38,5	36,87 ± 0,18	7,24 ± 0,76
Jog90HMS	2124 ± 128	61,7 ± 5,2	685,2 ± 56,0	36,66 ± 0,23	6,21 ± 0,14
Jog95HMS	2158 ± 73	64,5 ± 11,3	745,1 ± 29,5	37,03 ± 0,36	5,55 ± 0,52
PPMA10tg	2483 ± 39	44,7 ± 6,0	68,3 ± 13,0	41,78 ± 0,56	6,56 ± 0,46
PPMA5tg	2354 ± 72	56,6 ± 12,0	69,0 ± 9,9	41,91 ± 1,01	4,02 ± 0,11
PPMA3tg	2460 ± 261	67,3 ± 10,7	94,1 ± 35,6	41,39 ± 0,87	3,76 ± 0,16
PPMA1tg	3029 ± 401	69,0 ± 8,7	53,7 ± 7,2	44,21 ± 0,46	2,91 ± 0,05
PPMA10hg	1919 ± 145	37,4 ± 6,0	751,1 ± 80,0	38,81 ± 1,70	7,01 ± 0,22
PPMA5hg	1869 ± 158	40,6 ± 6,6	867,8 ± 125,7	41,95 ± 5,22	5,17 ± 0,11
PPMA3hg	1735 ± 124	45,2 ± 5,3	960,9 ± 64,9	45,68 ± 2,42	4,25 ± 0,16
PPMA1hg	1776 ± 168	39,9 ± 5,6	929,4 ± 88,2	45,60 ± 5,16	3,56 ± 0,21
PPMA10tk	2464 ± 133	39,2 ± 3,2	66,0 ± 9,1	41,02 ± 0,81	6,95 ± 0,43
PPMA5tk	2534 ± 207	42,9 ± 6,9	73,5 ± 8,4	40,76 ± 0,67	3,95 ± 0,17
PPMA3tk	2474 ± 150	41,2 ± 7,0	78,3 ± 7,5	40,07 ± 0,98	3,70 ± 0,07
PPMA1tk	2587 ± 187	53,9 ± 8,8	77,5 ± 4,8	40,17 ± 0,48	3,32 ± 0,05
PPMA10hk	1951 ± 254	32,9 ± 2,0	366,8 ± 148,7	36,05 ± 0,28	8,96 ± 0,83
PPMA5hk	1894 ± 244	42,8 ± 6,6	598,0 ± 18,2	35,78 ± 0,50	5,36 ± 0,22
PPMA3hk	1810 ± 78	46,2 ± 3,7	631,8 ± 54,5	35,91 ± 0,46	6,57 ± 0,53
PPMA1hk	1911 ± 290	41,6 ± 5,8	705,2 ± 89,7	37,84 ± 1,65	4,14 ± 0,33

Tabelle A.2 SH-Koeffizienten

Probenname	0,1 (s <sup>-1</sup> )	1 (s <sup>-1</sup> )	5 (s <sup>-1</sup> )
Jog	4	2	2
JogPC	72	54	39
JogLP	86	37	6
Jog90MBPC	105	3	8
Jog95MBPC	72	105	17
Jog90MBLP	108	21	1
Jog95MBLP	117	4	2
Jog90PP	10	2	1
Jog95PP	2	1	1
Jog90HMS	117	54	10
Jog95HMS	88	49	6
PPMA1tg	20	1	4
PPMA3tg	3	11	1
PPMA5tg	2	3	7
PPMA10tg	6	9	2
PPMA1hg	62	4	2
PPMA3hg	50	2	34
PPMA5hg	95	3	3
PPMA10hg	40	13	9
PPMA1tk	1	1	1
PPMA3tk	1	1	1
PPMA5tk	3	1	1
PPMA10tk	3	1	1
PPMA1hk	124	4	1
PPMA3hk	6	5	1
PPMA5hk	71	2	1
PPMA10hk	70	2	1

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Kunststoffnachfrage nach Branche und Polymer in der EU28+NO/CH [8].....	3
Abbildung 2 werkstoffliches Recycling [13].....	5
Abbildung 3 Schematische Struktur von PPgMAH. [42].....	8
Abbildung 4 großer Extruder Extron EX-18-26-1.5.....	13
Abbildung 5 kleiner Extruder Haake Mini Lab Doppelschneckenextruder Außenansicht (li.) und Innenansicht (re.) .....	13
Abbildung 6 verwendete Prüfkörper nach DIN EN ISO 8256/1A (li.) und nach DIN EN ISO 527- 2/5A/10 (re.).....	14

Abbildung 7 Vorlage für quadratische (li.) und runde (re.) Prüfkörper .....	15
Abbildung 8 eingespannte Probe mit Querjoch .....	16
Abbildung 9 Prinzip eines MFR Geräts [66] .....	18
Abbildung 10 Platte-Platte Rheometer [66] .....	19
Abbildung 11 Eigenschaftsveränderung aufgrund der Lage des COPs [66] .....	20
Abbildung 12 Prinzip Dynamische Wärmestrom-Differenz Kalorimetrie [69] .....	22
Abbildung 13 Post Consumer Rezyklat mit Peroxiden versetzt, Bruchdehnung (li. o.), Schlagzugfähigkeit (re. o.), Zugfestigkeit (li. u.) und E-Modul (re. u.) .....	24
Abbildung 14 Dehnrheologie (li. o.) mit den daraus folgenden SH-Koeffizienten (re. o.) MFR Werte (li. u.) und Ergebnisse der Frequency Sweep Messung (re. u.) .....	25
Abbildung 15 Post Consumer Rezyklat mit Masterbatches versetzt, Bruchdehnung (li. o.), Schlagzugfähigkeit (re. o.), Zugfestigkeit (li. u.) und E-Modul (re. u.) .....	28
Abbildung 16 Dehnrheologie (li. o.) mit den daraus folgenden SH-Koeffizienten (re. o.) MFR Werte (li. u.) und Ergebnisse der Frequency Sweep Messung (re. u.) .....	29
Abbildung 17 Blends verschiedener Reinmaterialien, Bruchdehnung (li. o.), Schlagzugfähigkeit (re. o.), Zugfestigkeit (li. u.) und E-Modul (re. u.) .....	32
Abbildung 18 Dehnrheologie (li. o.) mit den daraus folgenden SH-Koeffizienten (re. o.) MFR Werte (li. u.) und Ergebnisse der Frequency Sweep Messung (re. u.) .....	33
Abbildung 19 mechanische Analyse am großen Extruder, Bruchdehnung (li. o.), Schlagzugfähigkeit (re. o.), Zugfestigkeit (li. u.) und E-Modul (re. u.) .....	36
Abbildung 20 Ergebnisse der Frequency Sweep Messung bei hohen (li.) und bei tiefen Temperaturen (re.) .....	37
Abbildung 21 MFR Ergebnisse des großen Extruders bei unterschiedlichen Verarbeitungstemperaturen .....	38
Abbildung 22 Dehnaviskosität (o.) und SH-Koeffizienten (u.) bei hoher Verarbeitungstemperatur (li.) im Vergleich zu niedriger Verarbeitungstemperatur (re.) .....	39
Abbildung 23 mechanische Analyse des kleinen Extruders, Bruchdehnung (li. o.), Schlagzugfähigkeit (re. o.), Zugfestigkeit (li. u.) und E-Modul (re. u.) .....	42
Abbildung 24 Frequency Sweep Analyse kleiner Extruder bei hohen (li.) und bei tiefen (re.) Temperaturen .....	43
Abbildung 25 MFR Ergebnisse des kleinen Extruders bei unterschiedlichen Verarbeitungstemperaturen .....	44

Abbildung 26 Dehnviskosität (o.) und SH-Koeffizienten (u.) bei hoher  
Verarbeitungstemperatur (li.) im Vergleich zu niedriger Verarbeitungstemperatur (re.)..... 45

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Eigenschaftsprofil von Polypropylen HC600TF [53].....	10
Tabelle 2 Eigenschaftsprofile der Peroxide [54,55].....	11
Tabelle 3 Eigenschaftsprofil von Daploy™ WB140HMS [56].....	12
Tabelle 4 Heizprogramm der Presse.....	15
Tabelle 5 Übersicht Post Consumer Rezyklat Modifikationen .....	23
Tabelle 6 Übersicht der rheologischen Ergebnisse der Frequency Sweep Analyse für Jog, JogLP und JogPC.....	26
Tabelle 7 Übersicht der Ergebnisse der DSC-Analyse von Jog, JogLP und JogPC.....	27
Tabelle 8 Übersicht der rheologischen Ergebnisse der Frequency Sweep Analyse für Modifikationen mit Masterbatches.....	30
Tabelle 9 Übersicht der Ergebnisse der DSC-Analyse der Modifikationen mit Masterbatches .....	31
Tabelle 10 Übersicht der rheologischen Ergebnisse der Frequency Sweep Analyse für Blends .....	34
Tabelle 11 Übersicht der Ergebnisse der DSC-Analyse der Blends .....	34
Tabelle 12 Übersicht großer Extruder .....	35
Tabelle 13 Übersicht der rheologischen Ergebnisse der Frequency Sweep Analyse der am großen Extruder verarbeiteten Proben .....	38
Tabelle 14 Übersicht der Ergebnisse der DSC-Analyse der am großen Extruder verarbeiteten Proben .....	40
Tabelle 15 Übersicht kleiner Extruder .....	41
Tabelle 16 Übersicht der rheologischen Ergebnisse der Frequency Sweep Analyse der am kleinen Extruder verarbeiteten Proben.....	43
Tabelle 17 Übersicht der Ergebnisse der DSC-Analyse der am kleinen Extruder verarbeiteten Proben .....	46

Tabelle A.1 Messergebnisse .....	VI
Tabelle A.2 SH-Koeffizienten .....	VII