



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



Diplomarbeit

Compatibilisierung von PET/PE Blends im Hinblick auf Recycling von Mehrschichtfolien

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer / eines

Diplom-Ingenieurin (Dipl.-Ing. oder DI) / Diplom-Ingenieurs (Dipl. Ing oder DI)

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Konrad-Lorenz W. Danzl

Mat.Nr.: 01126104

Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen und Maschinenbau

unter der Leitung von

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

(E308 Institut für Werkstoffwissenschaften und Werkstofftechnologie, Forschungsbereich: Polymer- und Verbundwerkstoffe)

Unterschrift

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

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

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

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

Wien, am

Unterschrift

Kurzbeschreibung

In der vorliegenden Studie wird eine mögliche Option zum Recycling von Mehrschichtfolien, welche als Verpackungsmaterial in der Lebensmittelindustrie herangezogen werden, untersucht. In einer vorhergehenden Arbeit wurde bereits die Zusammensetzung dieser Mehrschichtfolien analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass diese aus ca. 79% PET und 19% PE bestehen. Zudem ist ein geringer Anteil von ungefähr 2% EVOH vorhanden.

Es ist allgemein bekannt, dass PET und PE ungünstige Voraussetzungen bzgl. deren Mischbarkeit besitzen. Dennoch kann durch den Einsatz von geeigneten Verträglichkeitsvermittlern eine ausreichende Mischung bewerkstelligt werden. Dazu wurden drei verschiedene Verträglichkeitsvermittler herangezogen. Diese sind Kraton G1643 M, Kraton FG1901 G und Lucofin 1492M HG.

Weiter wurden drei verschiedene Blends erstellt, um einen realistischen Vergleich zu deren Wirkungsweise sicherzustellen. Das erste Blend enthielt reines PET und PE, während das zweite Blend reines PE aber statt dem reinen PET ein recyceltes PET beinhaltet, welches aus Kunststoffschalen der Lebensmittelindustrie gewonnen wurde. Das dritte Blend wurde durch die Mehrschichtfolie erstellt. Alle drei Blends wiesen ein ähnliches mechanisches Verhalten auf, wodurch ein Vergleich sinnvoll erscheint. Erst durch Zugabe der Verträglichkeitsvermittler konnten größere Unterschiede bei spezifischen mechanischen Eigenschaften festgestellt werden. Der Großteil dieser Abweichungen wird bei den letzten beiden Blends vermutlich auf Verunreinigungen und Inhomogenitäten zurückzuführen sein. Zudem sind auch die Verfahrensparameter als auch die Morphologie zu berücksichtigen. Es konnte festgestellt werden, dass sich durch das Spritzgussverfahren eine Haut-Kern-Struktur ausgebildet hat. Dadurch ist eine unterschiedliche Morphologie entlang des Querschnittes gegeben. Auch dies wirkt sich unmittelbar auf die mechanischen Eigenschaften aus.

Besonders der Verträglichkeitsvermittler Kraton FG1901 G als auch Lucofin 1492M HG konnten bemerkenswerte Ergebnisse vorweisen. Beide führten zu einer Vervielfachung der Bruchdehnung, welche in erster Linie optimiert werden sollte. Dennoch zeigten Großteils auch die weiteren mechanischen Eigenschaften eine wesentliche Verbesserung. Daher sollten diese zwei Verträglichkeitsvermittler für weitere Untersuchungen herangezogen werden.

Abstract

In the present study, a possible option for recycling multilayer films, which are used as packaging material in the food industry, is examined. The composition of these multilayer films has already been analyzed in a previous work. It was found that these consist of approximately 79% PET and 19% PE. There is also a small amount of approximately 2% EVOH.

It is generally known that PET and PE have unfavorable conditions with regard to their miscibility. Nevertheless, an adequate mix can be achieved by using suitable compatibility agents. Three different compatibility agents were used for this. These are Kraton G1643 M, Kraton FG1901 G and Lucofin 1492M HG.

In addition, three different blends were created to ensure a realistic comparison of how they work. The first blend contained pure PET and PE, while the second blend contained pure PE but instead of pure PET contains a recycled PET, which was obtained from plastic trays in the food industry. The third blend was created by the multilayer film. All three blends showed a similar mechanical behavior, which makes a comparison seem reasonable. It was only by adding the compatibilizers that larger differences in specific mechanical properties could be determined. The majority of these deviations in the last two blends will probably be due to impurities and inhomogeneities. The process parameters and the morphology must also be taken into account. It was found that a skin-core structure was formed through the injection molding process. This gives a different morphology along the cross section. This also has a direct impact on the mechanical properties.

In particular, the compatibility agent Kraton FG1901 G and Lucofin 1492M HG were able to show remarkable results. Both led to a multiplication of the elongation at break, which should primarily be optimized. Nevertheless, the other mechanical properties also showed a significant improvement. Therefore, these two tolerance mediators should be used for further investigations.

Danksagung

Ich möchte zunächst Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki meine tiefste Dankbarkeit aussprechen, mir die Chance gegeben zu haben, meine Thesis in ihrem Forschungsgebiet und aufbauend auf einer vorhergehenden wissenschaftlichen Arbeit zu verfassen. Es ist eine große Ehre für mich, Teil dieser Forschungstätigkeit mit ihren hervorragenden Teilnehmern zu sein.

Ein besonderer Dank kommt Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Koch, Univ. Ass Dipl.-Ing Erdal Karaagac, Dipl. Ing. Hoai Maria Nguyem Thu und Projektass. Dipl.-Ing. Nasseri Latifeh für ihre kontinuierliche Unterstützung während des gesamten Arbeitsprozesses zu. Sie standen mir zu jedwedem Zeitpunkt mit Rat und Tat zur Seite und halfen mir dabei, die sich ergebenden Zusammenhänge zu erfassen und die erhaltenen Ergebnisse konstruktiv interpretieren zu können. Sie sind sehr verständnisvolle und herausragende Menschen, sodass ich sehr dankbar dafür bin, dass ich mit ihnen zusammenarbeiten durfte.

Ferner möchte ich meinen Freunden und Studienkollegen für ihre ständige Unterstützung in allen Lebenslagen und die freudigen Zeiten abseits des Studiums danken.

Abschließend will ich meinen Eltern, Gerda Anna Danzl-Gabl und Kurt Danzl, herzlichst danken, ohne die ich niemals die Möglichkeit gehabt hätte, in den Genuss einer wissenschaftlichen Bildung zu kommen und ohne die ich niemals zu diesem Punkt gekommen wäre. Sie waren in guten wie in schlechten Zeiten an meiner Seite und glaubten in jeder Lebensphase an mich. Das werde ich ihnen niemals vergessen.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Recycling.....	2
Recycling von Kunststoffen in Österreich	2
Mechanisches Recycling	4
Chemisches Recycling	5
Auflösungs- und Fällungsverfahren	6
Verunreinigungen	6
Auswirkung des Recyclingprozesses auf die Kunststoffeigenschaften.....	8
Verarbeitung.....	8
Abbaumechanismen	8
Thermische Energie.....	9
Chemikalien.....	9
Einfluss von elektromagnetischer- und Korpuskularstrahlung.....	10
Mehrschichtfolien.....	10
Materialien	15
Polyethylenterephthalat (PET)	15
Polyethylen (PE).....	15
Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD).....	16
Polyethylen hoher Dichte (PE-HD).....	16
Lineares Polyethylen niedriger Dichte (PE-LLD).....	16
Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH)	16
Polymerblend.....	17
Verträglichkeitsvermittler	18
Kraton FG1901 G Polymer	18
Kraton G1643 M Polymer.....	19
Styren-Ethen-Buten-Styren-Copolymer gepropft mit MA (SEBS-g-MA).....	19
Ethylen Butylacrylat (EBA)	19
Lucofin 1492M HG	20
Stabilisatoren	20
Angewandte Methoden zur Versuchsdurchführung.....	21
Vorbereitung der Materialien für die Verarbeitung.....	21
Zerkleinern	21
Trocknen.....	22
Mischung erstellen	22
Verarbeitungsparameter	23

Differential Scanning Calorimetry (DSC).....	27
Doppelschneckenextruder	28
Ablauf der Extrusion	29
Spritzgießen.....	30
Proben Präparation	31
Zugversuch.....	32
Schlagzugversuch.....	32
Rasterelektronenmikroskop.....	33
Plattenpresse.....	33
Ergebnisse	35
Mechanischen Eigenschaften	35
Auswertung Rasterelektronenmikroskop	58
Differential Scanning Calorimetry	66
Diskussion	73
Zusammenfassung.....	77
Literaturverzeichnis.....	79

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Material Fluss Analyse von Kunststoffabfällen in Österreich (2013) [1].	2
Abbildung 2: Vergleich der Sammel-, Sortier- und Verwertungsraten pro Produktkategorie im Verhältnis zur jeweiligen Masse [1].	3
Abbildung 3: Grafische Darstellung des Recycling-Kreislaufes von Post Consumer und Post Industrial Kunststoffabfällen [1].	4
Abbildung 4: Prozessschritte beim mechanischen Recycling.	5
Abbildung 5: Verunreinigungen.	6
Abbildung 6: Aufbau der einzelnen Schichten der MSF der Untertasse [41].	13
Abbildung 7: Einzelne Komponenten der Verpackung [41].	14
Abbildung 8: Struktur bzw. Aufbau von EVOH [48].	17
Abbildung 9: Darstellung des Kristallinen und Amorphen Bereiches von EBA [59].	20
Abbildung 10: Parameter der Phasen (DSC).	28
Abbildung 11: Einfluss des Druckes auf die Qualitätsmerkmale des Werkstoffes [65].	31
Abbildung 12: Die einzelnen Phasen des Pressvorganges.	34
Abbildung 13: Schlagzugzähigkeit von LDPE mit verschiedenen Verfahren.	36
Abbildung 14: E-Modul von PE-LD mit verschiedenen Verfahren.	37
Abbildung 15: Zugfestigkeit von PE-LD mit verschiedenen Verfahren.	37
Abbildung 16: Bruchdehnung von PE-LD mit verschiedenen Verfahren.	38
Abbildung 17: Schlagzähigkeit der einzelnen Komponenten und der Blends ohne Compatibilizer.	39
Abbildung 18: Schlagzugzähigkeit von Blends mit und ohne Verträglichkeitsvermittler.	41
Abbildung 19: E-Modul der einzelnen Komponenten und der Blends ohne Verträglichkeitsvermittler.	42
Abbildung 20: E-Module der Blends, mit und ohne Verträglichkeitsvermittler.	44
Abbildung 21: Zugfestigkeit der reinen Komponenten und der Blends ohne Verträglichkeitsvermittler.	45
Abbildung 22: Zugfestigkeit der Blends, mit und ohne Verträglichkeitsvermittler.	46
Abbildung 23: Bruchdehnung der reinen Komponenten und der Blends ohne Verträglichkeitsvermittler.	47
Abbildung 24: Bruchdehnung der Mehrschichtfolie mit und ohne Verträglichkeitsvermittler.	48
Abbildung 25: Bruchdehnung der Mehrschichtfolie mit und ohne Verträglichkeitsvermittler.	49
Abbildung 26: Bruchdehnung der Blends, mit und ohne Verträglichkeitsvermittler.	50
Abbildung 27: Schlagzugzähigkeit der Blends mit dem Verträglichkeitsvermittler FG1901 G.	51
Abbildung 28: E-Modul der Blends mit dem Verträglichkeitsvermittler FG1901 G.	52
Abbildung 29: Zugfestigkeit der Blends mit dem Verträglichkeitsvermittler FG1901 G.	53
Abbildung 30: Bruchdehnung der Blends mit dem Verträglichkeitsvermittler FG1901 G.	53
Abbildung 31: Schlagzugprobe Nr. 28_3	59
Abbildung 32: Schlagzugprobe Nr. 28_5	60
Abbildung 33: Schlagzugprobe Nr. 42_1	61
Abbildung 34: Schlagzugprobe Nr. 42_6	62
Abbildung 35: Schlagzugprobe Nr. 48_2 Teil 1	63
Abbildung 36: Schlagzugprobe Nr. 48_2 Teil 2	64
Abbildung 37: Schlagzugprobe Nr. 49_9	65
Abbildung 38: Ergebnisse der DSC für reines PET.	67
Abbildung 39: Ergebnisse der DSC für einmalig recyceltes PET.	68
Abbildung 40: Ergebnisse der DSC für mehrfach recyceltes PET.	69
Abbildung 41: Ergebnisse der DSC für PE-LD.	70

Abbildung 42: Abbildung 41: Ergebnisse der DSC für Mehrschichtfolie. 71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammensetzung der einzelnen Mischungen.....	23
Tabelle 2: untersuchte Verarbeitungsparameter (Teil 1).....	25
Tabelle 3: untersuchte Verarbeitungsparameter (Teil 2).....	26
Tabelle 4: Materialien welche dem Extruder beigefügt wurden.	29
Tabelle 5: Mechanische Eigenschaften der einzelnen Komponenten und der Blends (Teil 1).	55
Tabelle 6: Mechanische Eigenschaften der Blends (Teil 2).	56
Tabelle 7: Blends mit gemahlenem Verträglichkeitsvermittler.....	57
Tabelle 8: Vergleich der gepressten Proben und der Spritzgussproben.	57
Tabelle 9: Ausgewählte Schlagzugproben	58
Tabelle 10: Schmelzbereiche der einzelnen Komponenten und der Mehrschichtfolie.	66

Abkürzungsverzeichnis

allg.	allgemein
bgzl.	bezüglich
bzw.	Beziehungsweise
DHBA	Dihydroxybenzoesäure
DPA	Diphenylamin
DSC	Dynamische Differenz-Thermoanalyse
EBA	Ethylen Butylacrylat
EVOH	Ethylen-Vinylalkohol
Gew.	Gewicht
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte
PE-LD	Polyethylen niedriger Dichte
PE-LLD	Lineares Polyethylen niedriger Dichte
lt.	laut
MA	Maleinsäureanhydrid
MFI	Mold Flow Index/Schmelzflussindex
MSF	Mehrschichtfolie
SD	Standardabweichung
SEBS	Styren-Ethen-Buten-Styren-Block-Copolymer
SEBS-g-MA	Styren-Ethen-Buten-Styren-Block-Copolymer gepropft mit Maleinsäureanhydrid
PAB	Aminobenzoessäure
PC	post-consumer
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat

PET-A	Amorphes Polyethylenterephthalat
PET-C	Teilkristallines Polyethylenterephthalat
PI	post-industrial
PP	Polypropylen
REM	Rasterelektronenmikroskop
R-PET	recycltes Polyethylenterephthalat
vgl.	vergleich
xR-PET	mehrfach recycltes Polyethylenterephthalat
z.B.	zum Beispiel

Einleitung

Die Umweltverschmutzung und die daraus entstehenden Probleme stellt die Menschheit vor große Herausforderungen. Eine dieser Herausforderungen ist der Umgang mit den immensen Kunststoffabfällen. Dabei machen Kunststoffverpackungen einen Großteil der anfallenden Abfälle aus. In der vorliegenden Arbeit wird die Recyclbarkeit von Mehrschicht-Verpackungen, welche speziell bei Wurstwaren zum Einsatz kommen, untersucht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Recyclingprozess von Mehrschicht-Verpackungen mehrere komplexe Problemstellungen beinhaltet. Basierend auf vorhergehenden Untersuchungen von Mehrschicht-Verpackungen und deren Charakterisierung, wird in dieser Arbeit speziell das Recycling von Mehrschicht-Verpackungen durch die Anwendung eines geeigneten Kompatibilisierers bzw. Verträglichkeitsvermittlers untersucht. Durch den Einsatz des Kompatibilisierers, sollen insbesondere die mechanischen Eigenschaften so weit aufgewertet werden, dass im Vergleich zu Blends, welche aus reinen Polymeren aufgebaut sind, ähnliche oder sogar höherwertige mechanische Eigenschaften erzielt werden. Nach intensiver Literaturrecherche wurden folgende drei Kompatibilisierer ausgewählt.

- Kraton G1643 M
- Kraton FG1901 G
- Lucofin 1492M HG

Weiter wurde aufgrund der Zusammensetzung der Mehrschicht-Verpackungen ein Verhältnis von 80% PET zu 20% PE gewählt. Dabei wurden das Polyclear Refresh PET 1101 von INVISTA und das LDPE 290 E von DOW herangezogen. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen der Weiterentwicklung von Strategien zum Recycling von Mehrschicht-Verpackungen dienen.

Recycling

In dem folgenden Kapitel wird ein Überblick über den Recycling Prozess gegeben. Dabei stehen Plastikverpackungen, speziell Mehrschichtfolien, im Mittelpunkt. Es werden die wichtigsten Methoden und Strukturen erläutert, um die Abläufe und die daraus entstehenden Herausforderungen nachvollziehen zu können. Einzelne Verfahren, wie das mechanische und das chemische Recycling werden genauer beschrieben, da diese beim Recycling von Kunststoffen eine zentrale Rolle einnehmen. Zudem werden mögliche Wechselwirkungen von recycelten Polymeren und Lebensmitteln, welche sich schädlich auf die menschliche Gesundheit auswirken könnten, erörtert.

Recycling von Kunststoffen in Österreich

In Österreich werden jährlich ca. 300.000 Tonnen Kunststoffabfälle, welche aus Kunststoffverpackungen resultieren, wiederaufbereitet. Diese bestehen zur Hälfte aus Folien und zu einem Drittel aus Hohlkörpern, zu denen auch die PET-Flaschen zählen. Von den gesamt anfallenden Kunststoffabfällen, werden 34% über mechanisches Recycling wiederaufbereitet, der Rest wird vorwiegend zur Energiegewinnung genutzt und in der industriellen Verbrennung. Um den Materialfluss besser nachvollziehen zu können, wurden die entsprechenden Daten in Abbildung 1 grafisch aufbereitet. Die Kunststoffabfälle bestehen zum Großteil aus PE-LD (46%±6%), PET (19%±4%) und HD-PE (11%±6%) [1]. Somit sind PE und PET mit einem geschätzten Gesamtanteil von 76% bei den Kunststoffverpackungsabfällen vertreten [1].

In der herangezogenen Studie werden die Kunststoffverpackungsabfälle in mehrere Kategorien unterteilt. Unter anderem in kleine (<1,5m²) und große (>1,5m²) Folien. Diese zwei Kategorien sind

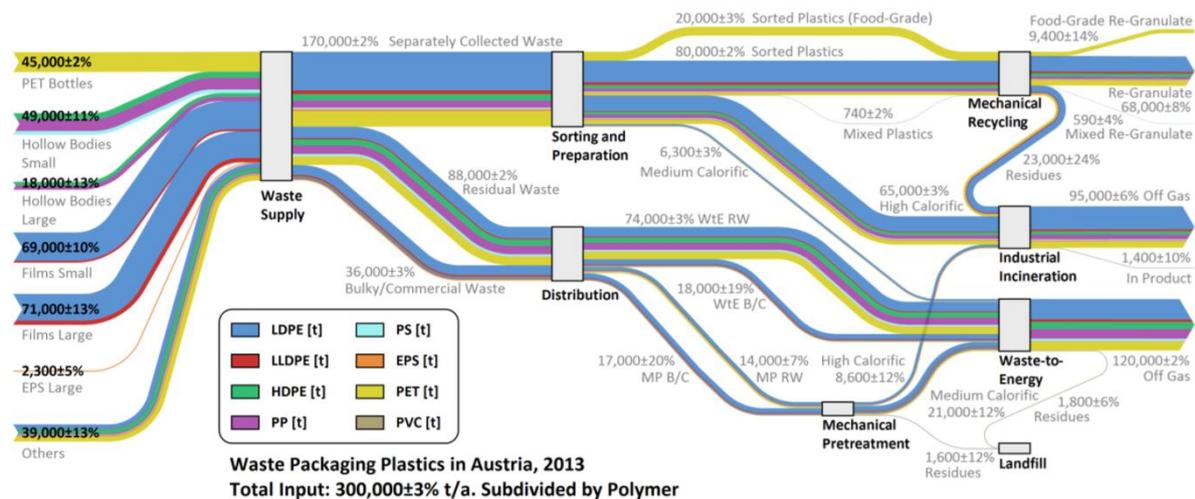


Abbildung 1: Material Fluss Analyse von Kunststoffabfällen in Österreich (2013) [1].

bereits für ca. 24% der 300.000 Tonnen Kunststoffabfälle verantwortlich. Die Mehrschichtfolien, welche in dieser Arbeit untersucht werden, sind den kleinen Folien zuzuordnen. In Abbildung 2 wird ersichtlich, welches Potential das Recycling von kleinen Folien - welchen auch die Mehrschichtfolien angehören - besitzt. Gerade einmal 18% der kleinen Filme werden recycelt, während ca. 81% industriell verbrannt oder zur Energiegewinnung genutzt werden [1]. Die Daten beziehen sich auf Österreich und wurden für das Jahr 2013 erhoben.

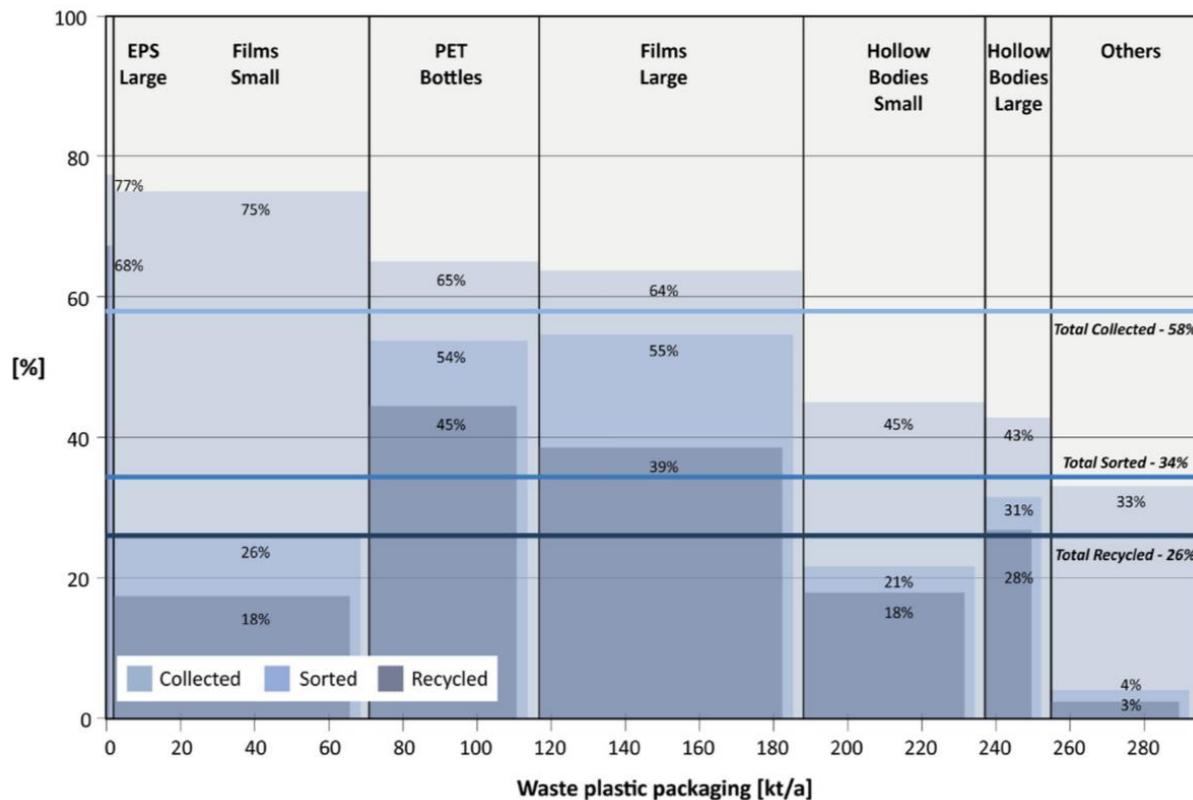


Abbildung 2: Vergleich der Sammel-, Sortier- und Verwertungsraten pro Produktkategorie im Verhältnis zur jeweiligen Masse [1].

Weiter ist unter post-industrial (PI) waste und post-consumer (PC) waste zu unterscheiden (siehe Abb. 3). Bei post-industrial waste, handelt es sich um einen nicht verunreinigten, meist homogenen und nicht vorbelasteten Kunststoffabfall. Obwohl diese Materialien noch keinen äußeren Einflüssen ausgesetzt wurden und somit nicht vorbelastet sind, kann es durch den Recycling Prozess zu Veränderungen der mechanischen und thermischen Eigenschaften kommen. Dies ist für den weiteren Einsatz solcher Materialien unbedingt zu berücksichtigen. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei post-consumer waste, um einen meist verunreinigten, vorbelasteten und inhomogenen Kunststoffabfall, welcher zudem auch aus unbekanntem Komponenten bestehen kann [2]. In Abbildung 3 wird der Unterschied zwischen PI und PC nochmals grafisch verdeutlicht. Die Mehrschichtfolien, welche eine zentrale Rolle in dieser Forschungsarbeit einnehmen, gehören der letzteren Kategorie der Kunststoffabfälle an.

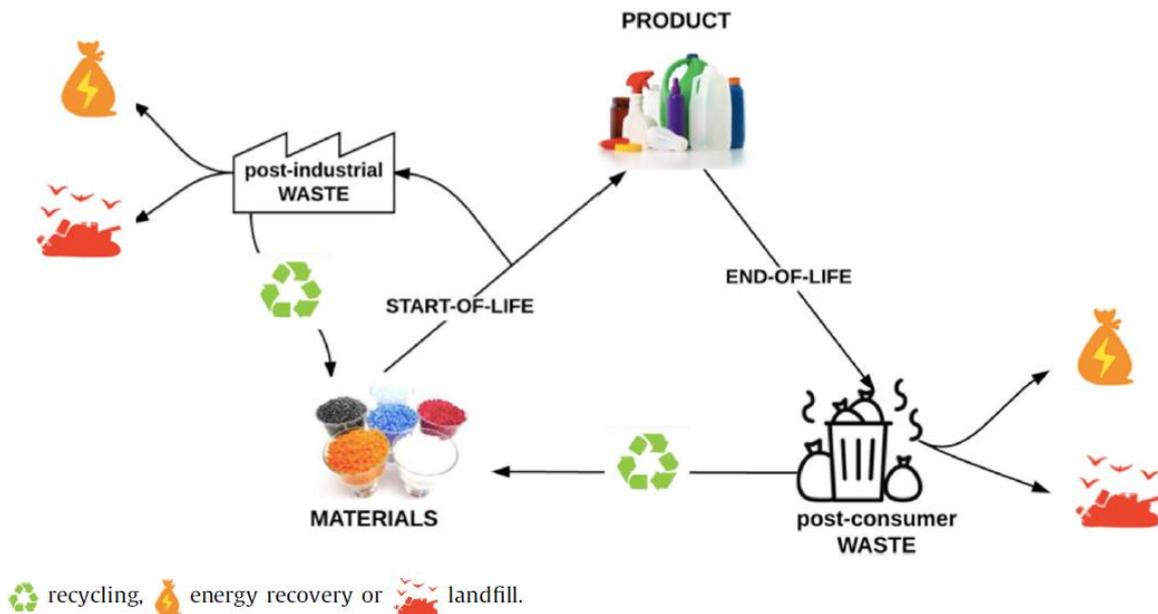


Abbildung 3: Grafische Darstellung des Recycling-Kreislaufes von Post Consumer und Post Industrial Kunststoffabfällen [1].

Zudem wird noch zwischen einem geschlossenen und einem offenen Kreislauf differenziert. Bei dem geschlossenen Kreislauf werden aus den gesammelten Kunststoffabfällen Produkte hergestellt, welche dieselbe Funktionsweise erfüllen, wie diese es im vorherigen Lebenszyklus getan haben. Während beim offenen Kreislauf die recycelten Kunststoffe für die Herstellung beliebiger Produkte wiederverwendet werden [2].

Dennoch ist Recycling nicht unbedingt immer der bessere Weg für die Umwelt. Kunststoffabfälle müssen zuerst gesammelt, sortiert und gereinigt werden, bevor diese weiterverarbeitet werden können. Um diesen aufwendigen Prozess des Recyclings zu bewerkstelligen, müssen einige Ressourcen zur Verfügung gestellt werden [3].

Mechanisches Recycling

Der Prozess des mechanischen Recyclings besteht aus einer Abfolge von mehreren Schritten. Im ersten Schritt werden die Kunststoffabfälle getrennt bzw. sortiert. Anschließend werden die Kunststoffe gereinigt, um Verunreinigungen zu entfernen und falls erforderlich getrocknet. Im letzten Schritt werden die Kunststoffe zerkleinert und zermahlen, damit diese für die Weiterverarbeitung zu neuen Produkten einsatzbereit sind [2]. Einer der größten Herausforderungen beim mechanischen Recycling ist die Komplexität des Abfallstromes, sowie die Heterogenität, die Verunreinigungen der Kunststoffe und die dadurch resultierende Verschlechterung der Anwendungseigenschaften [2], [4]. Durch den Einsatz von geeigneten Verträglichkeitsvermittlern könnte dieses Problem unter Umständen gelöst werden [5].



Abbildung 4: Prozessschritte beim mechanischen Recycling.

Durch eine zusätzliche chemische Behandlung - welche auf die Spülung mit reinem Wasser folgt - konnte bei PET, welches von Flaschen stammt, eine deutlich höhere Reinheit erzielt werden. Während die Wahl der Temperatur - bei der Spülung mit reinem Wasser - keinen signifikanten Einfluss auf die erreichbare Sauberkeit der Materialien hatte. Aus ökonomischer Sicht verursacht dieser zusätzliche Reinigungsschritt zwar Kosten, diese können aber durch den höheren Verkaufspreis und die Vermarktung der dabei entstehenden Nebenprodukte wie z.B. Terephthalsäure ausgeglichen werden. Der höhere Verkaufspreis kommt dadurch zustande, da sich die Eigenschaften des recycelten Materials dem reinen Material stark annähern. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass der Einsatz von chemisch behandelten Materialien in der Lebensmittelindustrie fraglich ist [6], [7].

Weiter ist zu berücksichtigen, dass beim mechanischen Recycling ein thermomechanischer Abbau stattfinden kann. Dabei ist die gewählte Kombination aus Temperatur und der Scherrate entscheidend, welche Prozesse initiiert werden. Ein zweiter Faktor, welcher sich stark auf den Abbau der Kunststoffe auswirkt, sind die unterschiedlichsten Einflüsse wie z. B. Hitze, Oxidation und Licht, mit der das Material während des Lebenszyklus konfrontiert ist [8], [9], [10].

Dennoch besitzt das mechanische Recycling - aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten betrachtet - das größte Potential gegenüber dem chemischen Recycling sowie der Lagerung und der Verbrennung zur Energiegewinnung [5].

Chemisches Recycling

Obwohl dieses Verfahren seit einigen Jahrzehnten erforscht wird, existieren - gerade im Bezug auf PET - immer noch einige Verbesserungsmöglichkeiten. Dennoch konnten bereits einige Herausforderungen, wie zum Beispiel eine geringe Ausbeute sowie Verschmutzungshindernisse, gemeistert werden. Die Reaktionsgeschwindigkeit wurde durch entsprechende Katalysatoren gesteigert, der Output erhöht und Verunreinigungen können gründlicher entfernt werden. Jedoch müssen die auftretenden Probleme Schritt für Schritt gelöst werden und können bis heute nicht gleichzeitig bearbeitet werden. Die Hauptschwierigkeit besteht darin, effizient zu sein und gleichzeitig möglichst umweltfreundlich zu arbeiten [11].

Gewisse chemische Recycling Verfahren sind gerade dann von Vorteil, wenn aufgrund von ökonomischen und technischen Rahmenbedingungen, dass mechanische Verfahren nicht mehr angewendet werden kann. Besonders für heterogene und stark verunreinigte Kunststoffabfälle erweist sich das chemische Recycling als hervorragende Alternative [12], [13]. Dieses kann grob in zwei

Arten unterschieden werden. Auf der einen Seite in einen thermochemischen Umwandlungsprozess und auf der anderen Seite in einen katalytischen Umwandlungsprozess [2].

PET kann durch dieses Verfahren in seine einzelnen Monomere zerlegt werden. Dies entspricht einer völligen Depolymerisation. Zudem existieren weitere Verfahren, mit denen PET in andere chemische Substanzen zerlegt werden kann. Bei diesen Prozessen handelt es sich um [2]:

- Methanolyse
- Glykolyse
- Hydrolyse
- Ammonolyse
- Aminolyse
- Hydrierung

Der Prozess der Pyrolyse ermöglicht die Wiederaufbereitung von Kunststoffabfällen, welche für die Depolymerisation ungeeignet sind. Dazu zählen die Mehrschichtfolien, die aufgrund deren Struktur und Aufbau nur schwer mechanisch recycelbar sind [13]. Die Herausforderung dieses Verfahrens besteht darin, die Komplexität der auftretenden Abläufe zu kontrollieren bzw. vorherzusagen. Dies wird zusätzlich durch heterogene Kunststoffabfälle erschwert [2], [14].

Auflösungs- und Fällungsverfahren

Die Anwendung des Auflösungs- und Fällungsverfahrens ermöglicht eine effiziente Polymer Rückgewinnung. Diese Methode wurde bereits bei PET, PE-LD, HD-PE als auch PP getestet. Es hat sich gezeigt, dass sich die Behandlung nicht nennenswert auf die chemische Struktur der Polymere auswirkt. Dennoch konnte in wenigen Proben ein geringer Kettenabbau beobachtet werden [15], [16].

Verunreinigungen

Verunreinigungen von Kunststoffabfällen sind eine der größten Herausforderungen für die Wiederaufbereitung. Bereits sehr geringe Mengen an Rückständen können zu signifikanten Änderungen der Kunststoffeigenschaften führen und erschweren dadurch deren möglichen Einsatz [17], [10], [18], [19]. Zudem ist die Anwendung solcher aufbereiteten Materialien in der Lebensmittelindustrie bedenklich. Folgende Verunreinigungen werden näher beschrieben:



Abbildung 5: Verunreinigungen

Rückstände wie Feuchtigkeit, welche zum Beispiel durch den Reinigungsprozess begünstigt werden, müssen berücksichtigt werden. Diese können durch Hydrolyse, zu einer erheblichen Reduktion der molekularen Masse beitragen. Zum Beispiel sollte bei der Weiterverarbeitung von PET darauf geachtet werden, dass der Anteil an Wasser einen Wert von 0,02% nicht überschreitet. Ansonsten könnte die Feuchtigkeit - durch den Prozess der Hydrolyse - einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Materialeigenschaften haben [20]. Vorhergehendes trocknen, kann zu einer Verbesserung der rheologischen als auch mechanischen Eigenschaften führen [10]. Eine weitere Lösung wäre der Einsatz von Kettenverlängerern, um dem thermischen Abbau entgegen zu wirken [18].

Sowohl Etikette als auch Rückstände von Klebstoffen, können im Recyclingprozess zur Bildung von Säuren führen, welche sich bei hohen Temperaturen zersetzen [19]. Zudem haben sich saure Verunreinigungen, speziell bei der Schmelzverarbeitung von PET, wie ein Katalysator für die Kettenspaltung erwiesen [18].

Wenn PET recycelt wird, können Nebenreaktionen auftreten, welche zur Bildung von Acetaldehyd, Oligomere und Diethylenglykol führen. Besonders die Oligomere können von der Verpackung in die Lebensmittel migrieren und diese kontaminieren [21]. Diethylenglykol wird für die Synthese von PET verwendet und dient zur Steuerung der Kristallisationskinetik. Problematisch wird Diethylenglykol erst beim Recycling, da dieses bei höheren Temperaturen eine thermische Schwachstelle bedingt. Dadurch kann bereits bei einer Temperatur von 245°C der Abbau von PET ausgelöst werden [22], [23].

Weiter konnte nachgewiesen werden, dass in Kunststoffabfällen unterschiedlichste Metall Rückstände auffindbar sind. Besonders Aluminium (Al), Blei (Pb), Titan (Ti) und Zink (Zn) treten in erhöhter Konzentration in Haushaltsabfällen auf. Vermutlich finden diese Metalle mittels Additiven ihren Weg in die Produkte. Zudem können sich einige dieser Rückstände schädlich auf den menschlichen Organismus auswirken. Zwar wurden die gesetzlichen Grenzwerte nicht überschritten, dennoch sollte - im Hinblick auf eine erhöhte Recyclingrate - eine Veränderung der erlaubten Grenzwerte in Betracht gezogen werden [24].

Zudem wirken sich Spuren von Papieretiketten beim Recycling stark auf die Verarbeitbarkeit und die Eigenschaften von PET aus. Bereits geringe Papierrückstände, führen zu einer drastischen Verringerung der Zähigkeit [25].

Es wurden bereits einige Konzepte entwickelt, welche sich mit der effizienten Beseitigung solcher Verunreinigungen beschäftigen. Unter anderem wurde für PET ein Reinigungsverfahren entwickelt, welches bis zu 99,9% bestimmter Rückstände entfernt [26]. Solche Aufbereitungsverfahren könnten besonders in der Lebensmittelindustrie von großem Interesse sein.

Auswirkung des Recyclingprozesses auf die Kunststoffeigenschaften

In dem folgenden Abschnitt werden die bedeutendsten Prozesse aufgezeigt, welche beim Recycling von Kunststoffen berücksichtigt werden sollten. Unter anderem werden Abbaumechanismen erläutert, welche speziell für diese Arbeit von Interesse sind. Zudem wird der Einfluss von wiederholtem Recycling auf die Kunststoffeigenschaften besprochen und anhand von Studien nachgewiesen.

Verarbeitung

In [27], wurde nachgewiesen, dass aufgrund verschiedener Ausgangsmaterialien, die Eigenschaften von PET beim Spritzgießen variieren können. Während reines PET ein duktileres Verhalten aufwies, zeigte das recycelte PET ein sprödes Verhalten. Dabei wurden beide Ausgangsmaterialien unter denselben Bedingungen verarbeitet. Dies resultiert unter anderem aus der unterschiedlichen Kristallinität. Weiter existieren für diese Unterschiede mehrere Ursachen, wie z.B. Verunreinigungen, Abnahme der Grenzviskosität sowie des durchschnittlichen Molekulargewichtes und Unterschiede in der thermischen und mechanischen Vorgeschichte [27].

Einer der größten Herausforderungen bei der Verarbeitung bei PET stellt der Prozess der Hydrolyse dar. Dieser Mechanismus wird im Unterkapitel Abbaumechanismen ausführlich beschrieben.

In der Studie [28], wurden die Auswirkungen von extensivem mechanischem Recycling ermittelt. Es wurde nachgewiesen, dass bei PE-LD - durch mehrfaches Recycling - eine zusätzliche Veränderung der rheologischen, thermischen als auch der mechanischen Eigenschaften zu erwarten sind. Dabei wurde festgestellt, dass in den ersten Zyklen der Effekt der Kettenspaltung dominiert. Während nach mehreren Zyklen der Effekt der Vernetzung überhandnimmt. Die Messungen des MFI bestätigten diese Analyse, da dieser kontinuierlich mit der Anzahl der Extrusionen abnahm. Bei dem Vergleich von reinem und recyceltem PE-LD, wurde keine signifikante Veränderung der Schmelz- und Kristallisationstemperatur gemessen. Jedoch zeigte sich ab dem fünfzigsten Zyklus, eine Reduzierung der Kristallinität. Dies ist auf strukturelle Unregelmäßigkeiten zurückzuführen, welche durch eine erhöhte Vernetzung zustande kommt. Anhand dieser Studie konnte nachgewiesen werden, dass PE-LD bis zu vierzig Mal recycelt werden kann, ohne dass es zu signifikanten Veränderungen kommt [28]. Auch bei PET wurde bereits beobachtet, dass der Recycling Prozess mit steigender Anzahl der Abläufe zu einer Verringerung der Viskosität als auch der molaren Masse führt [29].

Abbaumechanismen

Bereits moderate Bedingungen reichen aus, damit bei Polymeren eine chemische Reaktion ausgelöst wird. Jedoch führen diese Reaktionen nicht nur zu einer Veränderung der chemischen Eigenschaften sondern auch zu einer erheblichen Veränderung der mechanischen Eigenschaften. Dieses Verhalten veranschaulicht die Komplexität bei der Verarbeitung und den Einsatz solcher Materialien [30].

Durch das Einwirken der verschiedensten Formen von Energie werden konterproduktive Prozesse angestoßen, welche zu einer Abbaureaktion der Materialien führen. Dazu zählen unter anderem

Wärme, elektromagnetische Strahlung und mechanische Energie. Zudem reagieren die unterschiedlichen Polymere individuell auf diese äußeren Einflüsse. Dadurch lässt sich keine allgemeine Aussage über deren zukünftiges Verhalten treffen. Bei diesen Abbaureaktionen handelt es sich zum Beispiel um die Abtrennung oder Auflösung von Teilen der Polymerkette [30]. In dem folgenden Abschnitt, werden jene Abbaumechanismen, welche für diese Arbeit relevant sind, näher beschrieben.

Thermische Energie

Um Kunststoffe zu verarbeiten, müssen diese für einen gewissen Zeitraum einer erhöhten Temperatur ausgesetzt werden. Dabei verändern sich deren Struktur und deren Molekulargewicht [30].

Degradation

Die Degradation wird durch das Erreichen einer bestimmten Temperatur ausgelöst und beschreibt einen Prozess, bei dem sich schrittweise einzelne Monomere von den Kettenenden abtrennen. Obwohl dieser Prozess verhältnismäßig langsam von statten geht, kann dieser durch die Anwesenheit von Radikalen, deutlich beschleunigt werden. Teilweise wird dieser Effekt in speziellen Bereichen gezielt eingesetzt, wie zum Beispiel beim chemischen Recycling [30].

Einwirkung von Wärme und Scherung

Bei der Verarbeitung von Kunststoffen werden diese nicht nur einer verhältnismäßig hohen Temperatur ausgesetzt sondern werden zusätzlich durch Scherung beansprucht, welche den Kettenabbau fördert [30].

Zudem wurde festgestellt, dass eine höhere Scherrate bei der Extrusion den Abbau der molaren Masse begünstigt. Diesem Effekt kann durch das Beifügen von Additiven entgegen gewirkt werden. Bei recycelten PET genügt die Zugabe von einem Prozent, damit die molare Masse des Ausgangsmaterials erhalten bleibt. Dabei wirkt das Additiv auf zwei Ebenen. Auf der einen Seite mindert es den Abbau während der Verarbeitung und auf der anderen Seite initiiert dieses einen entgegengesetzten Prozess. Beide Prozesse führen zu einer Steigerung der molaren Masse [31].

Chemikalien

Die meisten Polymere treten - während deren Lebenszyklus - mehrmals mit den verschiedensten Chemikalien in Kontakt. Diese können von einfachen Verfärbungen bis zur vollständigen Zerstörung der Polymere führen. Grundsätzlich sind teilkristalline Thermoplaste, im Vergleich zu anderen Polymeren, beständiger gegenüber Chemikalien. Dennoch besitzen manche Polymere funktionelle Gruppen, welche sehr anfällig auf Reagenzien reagieren. Die vermutlich am häufigsten auftretenden chemischen Reaktionen, sind die Hydrolyse und die Oxidation [30].

Oxidation tritt besonders oft in Verbindung mit Luftsauerstoff auf. Da aufgrund von Diffusionsvorgängen in den meisten Polymeren Luftsauerstoff vorhanden ist. Dabei steigt dessen

schädlicher Einfluss mit zunehmender Temperatur. Dadurch ist dieser Effekt gerade bei der Verarbeitung zu berücksichtigen, wo die Polymere hoher Hitze ausgesetzt sind [30].

Hydrolyse bezeichnet einen Prozess bei dem die funktionellen Gruppen der Hauptkette eines Polymers mit Wasser reagieren. Nicht wenige Kunststoffe weisen ein stark hygroskopisches Verhalten auf. Durch diese Reaktion kommt es zur Kettenspaltung, welche die entgegengesetzte Reaktion zur Polymersynthese darstellt. Daher müssen Materialien - welche ein hygroskopisches Verhalten aufweisen - unmittelbar vor der Verarbeitung getrocknet werden. Sonst können beispielweise beim Spritzgießen – durch die vorhandene Feuchtigkeit - Unreinheiten an der Oberfläche entstehen [32], [33]. Dieser Prozess kann durch die Anwesenheit von Säuren und Laugen verstärkt werden. Um die Auswirkung einer Hydrolyse möglichst vollständig zu vermeiden, sollten Kunststoffe, welche für diese Reaktion anfällig sind, vor der Verarbeitung getrocknet werden und anschließend direkt verarbeitet werden. Denn gerade PET neigt dazu, Wasser aus seiner Umgebung (z.B. Luft) aufzunehmen [33], [30].

Einfluss von elektromagnetischer- und Korpuskularstrahlung

Einige Polymere sind in der Lage elektromagnetische Strahlung zu absorbieren. Aber auch andere Strahlungsformen, können den Kunststoffen stark zusetzen. Die Auswirkung der Strahlung, hängt im Wesentlichen von der Eindringtiefe und der Strahlendosis ab. Weitere Faktoren, welche bei der Bestrahlung einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss haben, sind die Temperatur, Feuchtigkeit und Sauerstoff. Dadurch wird ein angeregter Zustand initiiert, welcher zu chemischen Reaktionen als auch lokalen Erwärmungen führen kann. Diese wiederum verursachen strukturelle Veränderungen, welche die Eigenschaften der Kunststoffe beeinflussen. Dieser Problematik kann mit dem Einsatz geeigneter Additive begegnet werden [30].

Weitere Einflüsse sind biologische Einwirkungen als auch die Pyrolyse, welche unter Ausschluss von Luft durch einen rein thermischen Einfluss einen Abbau der Polymerketten induziert [30].

Mehrschichtfolien

Mehrschichtfolien bestehen aus mindestens zwei verschiedenen Schichten. Die Vorteile solcher Verbundfolien überwiegen so stark, das Monofolien im Bereich Lebensmittelverpackungen großteils verdrängt wurden [34]. Zum einen bieten mehrere Schichten den Vorteil, dass bei Beschädigung einer Schicht die Funktionalität aufrecht erhalten wird. Zum anderen bieten zwei dünne Schichten eine qualitativ hochwertigere Barriereeigenschaft als eine einzige Folie mit derselben Gesamtdicke [35].

Die vorrangige Aufgabe von Mehrschichtfolien in der Lebensmittelindustrie ist der Schutz des Inhaltes vor Umwelteinflüssen. Um dies zu gewährleisten, sind nicht nur gute mechanische Eigenschaften gefordert, sondern auch eine möglichst geringe Durchlässigkeit. Da die äußeren Einflüsse vielfältig sind und stark variieren, müssen mehrere Barrieren aufgestellt werden. Dies kann durch den Einsatz von Kunststoffen effizient und kostengünstig bewerkstelligt werden. Neben der

Barriereedicke existieren weitere Faktoren, welche für die Permeationsminderung entscheidend sind. In Abhängigkeit der Verarbeitungsparameter können unterschiedliche Werkstoffstrukturen auftreten, wie zum Beispiel orientierte oder kristalline Bereiche. Diese wirken sich direkt auf die Qualität der Barriereigenschaften aus [30].

Es gibt mehrere Gründe, welche die Herstellung von Mehrschichtfolien begünstigen. Speziell bei mehreren Leistungsanforderungen dienen unterschiedliche Schichten der optimalen Erfüllung aller Bedingungen. Sogar wenn die erforderlichen Eigenschaften von einer einzelnen Folie abgedeckt werden könnten, ist es aus ökonomischer Sicht oft sinnvoll, ein günstigeres Material beizufügen. Dadurch sinkt der Anteil der teureren Komponente bzw. reduziert die Foliendicke. Zudem unterstützt der wirtschaftliche Wettbewerb die Herstellung von flexiblen Verpackungsstrukturen [34].

Die Anforderungen sind vielfältig und variieren stark. Speziell in der Lebensmittelindustrie sind folgende Eigenschaften von Interesse, um nur wenige zu nennen:

- Barriere für Gase
 - Sauerstoff
 - Stickstoff
 - Kohlendioxid
 - Wasserdampf
- geschmacksneutral
- geruchsneutral [34]
- Schutz vor Umwelteinflüssen
- optisches Erscheinungsbild
- geringes Gewicht
- angenehme Haptik und Handhabung
- umweltschonend [36]

In einigen Mehrschichtfolien wird Ethylen-Vinylalkohol (EVOH) eingesetzt. Dieser eignet sich deutlich besser als Barriere wie z.B gegen Sauerstoff als PET oder PE [13]. Zudem können diese problemlos mit Polyamid koextrudiert werden. Lediglich die Koextrusion mit Polyolefinen oder Polyestern erfordert den Einsatz von Klebstoffen. Diese mehrschichtigen Verpackungsmaterialien besitzen meist folgenden Aufbau: Basisfolie, Klebstoff, EVOH, Klebstoff und ein Versiegelungsmittel [37]. Die Mehrschichtfolien welche für diese Arbeit herangezogen wurden, enthalten ebenfalls einen geringen Anteil an EVOH.

Die Herstellung solcher Mehrschichtfolien findet in den meisten Fällen durch den Einsatz der Koextrusion statt. Bei der Koextrusion werden mehrere Schmelzströme einzelner Extruder räumlich zusammengeführt, um schließlich in einem Werkzeug verarbeitet zu werden [38], [39]. Damit können Folien erstellt werden, welche nur wenige Mikrometer dick sind. Jedoch weisen mehrere Studien

darauf hin, dass sich bei Folien, welche nur wenige Mikrometer dick sind, die Eigenschaften - mit weiterer Abnahme der Dicke - drastisch ändern kann [39], [40]. Ein weiteres Verfahren zur Herstellung von Folien ist die Blasfolienextrusion. Auch hier können Folien welche nur wenige Mikrometer Dick sind, erzeugt werden. Bei dieser Herstellungsmethode wird der im Extruder plastifizierte Kunststoff durch eine meist vertikale aufwärts arbeitende Ringdüse ausgegeben und auf der Oberseite als Schlauch nach oben gezogen. Im Gegensatz zum Extrudieren ermöglicht das Kalandrieren eine weitere Möglichkeit, um Folien herzustellen. Bei diesem Verfahren, wird ein Kunststoff-Agglomerat mehreren Walzen zugeführt, wo dieses durch Scherkräfte plastifiziert und weiterverarbeitet wird [40].

Wie bereits erwähnt, wurde in der Arbeit „Charakterisierung von Mehrschicht-Verpackungen in Hinblick auf den weiterführenden Recycling-Prozess“ von Lukas Pasler [41] ein gemittelter Massengehalt von 84% PET, 9% PE, 2% EVOH und 4% Kleber bzw. Haftvermittler festgestellt. Auf der Basis dieser Werte wurde für die Probenkörper ein Verhältnis von 80% PET zu 20% PE gewählt. Dabei wurde für diese Arbeit im speziellen die Untertasse von „Hütthaler Rauchschinken“ untersucht. Dieses Produkt wurde gewählt, weil es die vorausgesetzte Zusammensetzung von 80% PET zu 20% PE am ehesten erfüllt. Es wurden insgesamt 47 Untertassen benötigt, um die gewünschte Anzahl an Proben zu fertigen. In Abbildung 5 ist der Aufbau der einzelnen Schichten der MSF, welche für diese Untersuchung herangezogen wurde, dargestellt. Die Reihenfolge der einzelnen Schichten inklusive der Dicke lautet, von der Außenseite beginnend, wie folgt [41]:

- | | |
|--------------------|--------|
| 1. PET | 174 µm |
| 2. PE | 26 µm |
| 3. Haftvermittler? | 18 µm |
| 4. EVOH | 5 µm |
| 5. PE | 19 µm |

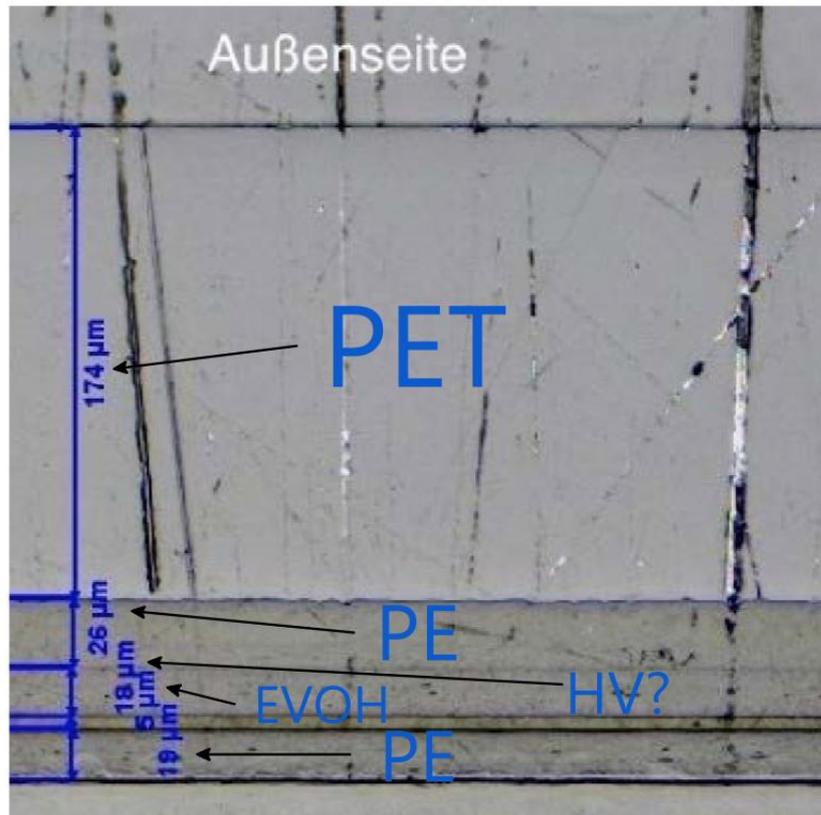


Abbildung 6: Aufbau der einzelnen Schichten der MSF der Untertasse [41].

In Abbildung 6 sind die einzelnen Bestandteile der Verpackung, in der Reihenfolge beginnend von oben nach unten, aufgelistet. Für diese Arbeit wurde eine Komponente herangezogen, welche im Rahmen dieser Untersuchung als Untertasse bezeichnet wird. Für die weiteren Komponenten müssen weitere Verfahren erforscht werden, falls es noch keine geeigneten Recyclingstrategien geben sollte.

In dieser Arbeit wurde eine Methode erforscht, welche speziell das Recycling der Untertasse des „Hütthaler Rauchschinken“ ermöglicht. Diese besteht zu ca. 79% aus PET, 19% PE. Zusätzlich ist noch ein Anteil von ca. 2% EVOH enthalten [41]. Sowohl die Deckfolie als auch das Etikett, wurden vor dem nächsten Prozessschritt entfernt. Dennoch sind geringe oberflächliche Spuren von Klebstoffen vorhanden. Detailliertere Informationen sind der wissenschaftlichen Arbeit „Charakterisierung von Mehrschicht-Verpackungen in Hinblick auf den weiterführenden Recycling-Prozess“ von Lukas Pasler enthalten [41].

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Lebensmittelverträglichkeit. Durch Migration können Stoffe sich zwischen verschiedenen Substraten bewegen. Wenn Polymere mit Ölen und Fetten in Kontakt kommen, können unerwünschte Wechselwirkungen auftreten. Besonders bei Lebensmittelverpackungen muss darauf geachtet werden, damit Standards in der Lebensmittelindustrie nicht verletzt werden. Daher ist die physiologische Unbedenklichkeit der eingesetzten Kunststoffe unerlässlich. Im Wesentlichen existieren vier Faktoren, welche für die Migration von Inhaltsstoffen aus der Verpackung entscheidend sind [40].



Aufkleber

- Komponenten: Mehrheitlich Papier, Tinte
- Haftung: Kleber



Deckel

- Komponenten: PE, EVOH, PA, PET
- Typ: Mehrschichtfolie



Untertasse

- Komponenten: PET (~79%), PE (~19%), EVOH (~2%)
- Typ: Mehrschichtfolie



Etikett

- Komponenten: Mehrheitlich Papier, Tinte
- Haftung: Kleber

Abbildung 7: Einzelne Komponenten der Verpackung [41].

1. Art und Struktur des verwendeten Polymers sowie eingesetzte Hilfsstoffe, Klebstoffe, Farben und Lacke
2. Dimension und Gestalt der Verpackung
3. Art und Menge der niedermolekularen, migrier-fähigen Anteile im Polymer
4. Art des Inhaltes [40]

Eine Möglichkeit für den Einsatz von recycelten Mehrschichtfolien in der Lebensmittelindustrie könnte das Einbetten einer recycelten Folie in zwei nicht recycelte Folien sein. Die entstehende Mehrschicht Folie würde somit gewährleisten, dass jene Folie welche aus dem recycelten Material besteht, nicht in direktem Kontakt mit dem Lebensmittel ist. Dadurch sollte die Migration von unerwünschten Partikeln in die Nahrungsmittel reduziert werden [42].

Materialien

Polyethylenterephthalat (PET)

Für die Herstellung von Polyethylenterephthalat werden die zwei Ausgangsstoffe Terephthalatsäure und Ethylenglykol benötigt. Aus der Polykondensation dieser zwei Komponenten wird PET gewonnen. Dieser ist der Gruppe der Thermoplaste zuzuordnen. In Abhängigkeit von den Verarbeitungsbedingungen und dem Werkstofftyp kann PET in zwei unterschiedlichen Formen vorliegen. Auf der einen Seite in einem amorph-transparenten Zustand und auf der anderen Seite in einem kristallin-opaken Zustand [38], [43], [44].

Das teilkristalline Polyethylenterephthalat (PET-C) ist durch seine hohe Steifigkeit und Härte gekennzeichnet. Während das amorphe Polyethylenterephthalat (PET-A) im Gegenzug eine höhere Schlagzähigkeit und Zähigkeit aufweist. Zudem besitzen beide eine gute Beständigkeit gegen verdünnte Säuren, aromatische und aliphatische Kohlenwasserstoffe, Fette und Öle auf. Wobei die mechanischen Eigenschaften stark vom Kristallisationsgrad beeinflusst werden, welche wiederum von den gewählten Prozessparametern abhängen [38], [43], [44].

PET wird in den meisten Fällen mittels Spritzguss verarbeitet. Hochmolekulare Sorten können auch durch Spritzstreckblasen oder Blasformen bearbeitet werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der Temperaturbereich von 260°C bis 280°C nicht über- bzw. unterschritten wird [38], [32], [44]. Der vielfältige Einsatz von PET in der Verpackungsindustrie ist durch mehrere seiner Eigenschaften begründet. Es ist sehr leicht und für den Kontakt mit Lebensmitteln geeignet. Zudem bildet es eine verlässliche Barriere gegen Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid, um nur wenige Vorteile dieses Kunststoffes zu nennen [38], [43].

In dieser Arbeit wurde das **Polyclear Refresh PET 1101** von INVISTA verwendet. Dieses PET zeichnet sich durch seine Klarheit aus und weist eine gute dimensionale Stabilität auf, welche Schrumpfung bzw. Expansion verhindert. Zudem ist es für den Kontakt mit Nahrungsmitteln zugelassen. Die Erfahrung zeigt, dass es sich hervorragend für Anwendungen zum Streckblasformen eignet. Die wesentlichen Eigenschaften, von diesem Material, sind die intrinsische Viskosität, welche $0,83 \pm 0,002 \frac{ml}{g}$ beträgt und einen Schmelzpunkt von 252°C besitzt. Die Dichte wird mit $1,39 \frac{g}{cm^3}$ Gramm pro Kubikzentimeter beziffert [45].

Polyethylen (PE)

Polyethylen ist der Gruppe der Polyolefine zuzuordnen. Dabei handelt es sich um einen teilkristallinen Thermoplast. In Abhängigkeit von dem gewählten Polymerisationsverfahren, kann Polyethylen in wenig oder stark verzweigten Kettenstrukturen vorliegen. Dies ist auch ausschlaggebend für das unterschiedliche Kristallisationsvermögen, welches sich wiederum auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt [44], [46].

Das breite und vielseitige Einsatzspektrum von PE ist den speziellen Katalysatoren zu verdanken. Diese ermöglichen eine sehr enge Molmassenverteilung. Zu den meist verbreitetsten PE-Typen gehören unter anderem [46]:

- PE-HD
- PE-LD
- PE-LLD

Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD)

LD-PE besitzt eine geringe Steifigkeit und eine hohe Dehnbarkeit. Dadurch eignet sich dieser Kunststoff besonders für die Herstellung von Folien [44]. Die Herstellung wird durch eine Hochdruckpolymerisation bewerkstelligt, welche zu verzweigten Makromolekülen führt [46].

Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)

Im Gegensatz zu LD-PE, ist HD-PE in einem gewissen Rahmen als Konstruktionswerkstoff geeignet. Es besitzt eine ausreichende Festigkeit und Zähigkeit. Zudem zeichnet sich dieses Material durch seine hervorragenden chemischen Eigenschaften aus [44]. Die Herstellung wird durch eine Niederdruckpolymerisation und den Einsatz von Katalysatoren bewerkstelligt. Dies führt zu einer wenig verzweigten Makromoleküle und somit zu einer vergleichsweise höheren Dichte als LD-PE [46].

Lineares Polyethylen niedriger Dichte (PE-LLD)

Im Vergleich zum LD-PE besitzt PE-LLD kurze Verzweigungen. Dies führt dazu, dass sich die Reißigenschaften wesentlich verbessert während die Eigenschaften von LD-PE weitgehendst erhalten bleiben. Dadurch eignen sich diese ausgezeichnet für die Herstellung von Verpackungsfolien [46].

Für diese Arbeit wurde das **LDPE 290 E** von DOW verwendet. Dieses weist einen MFI von $0,9 \frac{g}{10 \text{ min.}}$, bei einer Temperatur von 190°C und einer Masse 2,19 kg, auf. Zudem wurde eine Schmelztemperatur von ca. 113°C ermittelt.

Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH)

EVOH ist ein statistisches Copolymer, welches sich aus Ethylen- und Vinylalkoholmonomereinheiten zusammensetzt. Die Synthese von EVOH erfolgt in zwei Stufen. Im ersten Schritt wird in Anwesenheit von Ethylen und Vinylacetat eine Copolymerisationsreaktion initiiert, wodurch das Copolymer Ethylenvinylacetat entsteht. Dieses wird im nächsten Schritt durch die Umesterung mit Methanol in EVOH umgewandelt [47], [48]. In Abbildung 8 wird der chemische Aufbau von EVOH dargestellt.

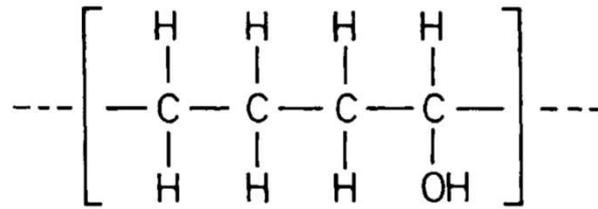


Abbildung 8: Struktur bzw. Aufbau von EVOH [48].

Wie bereits erwähnt, wird dieses Material aufgrund seiner hervorragenden Barriereigenschaften gegenüber permanenten Gasen wie zum Beispiel Sauerstoff, Kohlendioxid oder Stickstoff oft in Mehrschichtfolien eingesetzt. Besonders Verbundfolien, in denen EVOH-Folien mit PE-LD, PE, PA und PET kombiniert werden, weisen exzellente Sperreigenschaften gegenüber Aromastoffen und Gasen auf. Die ausgeprägten Barriereigenschaften der EVOH-Folien sind auf die starken inter- und intramolekularen Bindungen zurückzuführen, welche durch die Anwesenheit der Hydroxylgruppen zustande kommt. Dennoch ist EVOH gerade wegen dieser Hydroxylgruppen sehr feuchtigkeitsempfindlich. Auf der anderen Seite ist die Durchlässigkeit solcher Folien stark von der Temperatur und dem Feuchtigkeitsgehalt abhängig. Denn die Hydrophilität begünstigt die Aufnahme von Wasser, welches wiederum die Hydroxylgruppen plastifiziert und somit die Bindung schwächt. Daher werden EVOH-Folien in der Mehrschichtfolienstruktur meistens mittig platziert. Dadurch soll der direkte Kontakt mit Feuchtigkeit verhindert werden [47], [48].

EVOH-Folien werden in der Verpackungsindustrie, besonders bei Lebensmittelverpackungen eingesetzt, um Aroma- und Geschmacksverfälschungen zu verhindern. Zudem bietet es eine gute chemische Beständigkeit gegenüber flüchtigen organischen Verbindungen, Kohlenwasserstoffen und organischen Lösungsmitteln [47]. EVOH ist biologisch verträglich und abbaubar [49].

Ein weiterer wichtiger Aspekt, welcher nicht außer Acht gelassen werden sollte, ist der mögliche Einfluss von EVOH auf das Blend. Zwar ist der Anteil von EVOH mit ca. 2% eher gering. Dennoch zeigen Studien auf, dass bereits ab einem Anteil von 5% EVOH, zu kontraproduktiven Auswirkungen führen kann. Bei PE, konnte nachgewiesen werden, das bereits das Vorhandensein von fünf Prozent EVOH, einige unerwünschte Auswirkungen mit sich bringt. Unter anderem kommt es bei der Extrusion zu einer Vergilbung der Materialien, einer starken Zunahme von Trübungen, Gelen und Flecken sowie zur Bildung von Blasen, welche häufig als Bruchursache identifiziert werden konnten. Daraus kann eine begrenzte Verträglichkeit von EVOH und PE abgeleitet werden [50].

Polymerblend

Bei einem Polymerblend, handelt es sich um eine Mischung aus zwei oder mehreren Thermoplasten. Diese dienen dazu, maßgeschneiderte Werkstoffe zu erstellen, welche die gewünschten Eigenschaften aller beteiligten Thermoplaste enthalten und diese möglicherweise noch durch Synergieeffekte zu verstärken. Es werden oft Doppelschneckenextruder eingesetzt, um solche Blends zu erstellen. Jedoch

müssen insbesondere die Wechselwirkungen in der Grenzschicht der vorhandenen Phasen berücksichtigt werden [44]. Hier kommt der Verträglichkeit der vorhandenen Komponenten eine besondere Bedeutung zu. Diese können verträglich, teilweise verträglich oder unverträglich sein. Im Falle der Verträglichkeit der anwesenden Thermoplaste können problemlos Polymerblends erstellt werden [30]. Ist diese Verträglichkeit nicht gegeben, tritt zum Beispiel bei Blends, welche aus PET und PE bestehen, eine deutliche Phasentrennung auf. Aufgrund der schwachen Verbindung beider Phasen, verschlechtern sich deren Eigenschaften gegenüber deren reinen Komponenten drastisch [51], [52].

So kann auf Basis der folgenden thermodynamischen Zustandsgleichungen, eine Aussage über die Verträglichkeit der Polymermischung getroffen werden. Werden beide Bedingungen (siehe Formel 1 und 2) erfüllt, können die Polymere gemischt werden [30].

$$\Delta G (w) = \Delta H (w) - T \cdot \Delta S (w) < 0 \quad \text{Formel 1}$$

$$\left(\frac{d^2 \Delta G}{dw^2} \right)_{p,T} > 0 \quad \text{Formel 2}$$

ΔG ...freie molare Reaktionsenthalpie

ΔH ...molare Reaktionsenthalpie

T...Temperatur

ΔS ...molare Reaktionsentropie

Aus den Gleichungen lässt sich erkennen, dass die Verträglichkeit sehr stark von der Temperatur abhängt. Zudem muss berücksichtigt werden, dass eine sehr hohe Abkühlgeschwindigkeit zu einer inhomogenen Mischung führen kann. Dies liegt darin begründet, dass zu wenig Zeit bleibt damit sich ein homogenes Gefüge ausbilden kann. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, werden Verträglichkeitsvermittler eingesetzt [30].

Verträglichkeitsvermittler

Kompatibilisatoren bzw. Verträglichkeitsvermittler haben in Polymermischungen die Aufgabe, für die notwendige Verträglichkeit zu sorgen. Dies wird durch die Bildung einer physikalischen oder chemischen Bindung, welche sich an der Grenzfläche der unmischbaren Stoffe befindet, bewerkstelligt. Trotz dieses Eingriffes bleiben die Thermoplaste weiter verarbeitbar [44], [30].

Kraton FG1901 G Polymer

Bei diesem Verträglichkeitsvermittler handelt es sich um ein lineares Styren-Ethen-Buten-Styren-Copolymer, welches auf Styren-Ethen und Buten-Styren basiert und einen Anteil von ca. 30% Polystyrol besitzt. Der Schmelzflussindex (MFI) beträgt bei einer Temperatur von 230°C und einem Durchsatz von 2,16 kg, zwischen 14 und $25 \frac{g}{10 \text{ min}}$. Dieses Triblock-Copolymer wurde mit

Maleinsäureanhydrid gepropft [53]. Das aufgepropfte Maleinsäureanhydrid reagiert mit den Hydroxyl-Endgruppen von PET. Während das Grundgerüst von SEBS Regionen aufweist welche mit PE kompatibel sind [54]. Dieses macht einen Masseanteil von 1,4 - 2% aus.

Kraton G1643 M Polymer

Bei diesem Verträglichkeitsvermittler handelt es sich um ein lineares Styren-Ethen-Buten-Styren-Copolymer, welches auf Styren-Ethen und Buten-Styren basiert und einen Anteil von ca. 20% Polystyrol besitzt. Der Schmelzflussindex (MFI) beträgt, bei einer Temperatur von 230°C und einem Durchsatz von 5 kg, zwischen 14 und $28 \frac{g}{10 \text{ min}}$. Zudem besitzt es Antioxidans, welche einen Anteil von 0,06 - 0,14% ausmachen [55].

Styren-Ethen-Buten-Styren-Copolymer gepropft mit MA (SEBS-g-MA)

Bei SEBS handelt es sich um ein Blockcopolymer. Um es als geeigneten Verträglichkeitsvermittler einzusetzen, sollte zumindest ein Teil bzw. Block von SEBS mit mindestens einem anwesenden Polymer mischbar sein. Durch die Zugabe von Maleinsäureanhydrid erhält SEBS eine reaktive funktionelle Gruppe. Dadurch entsteht ein feineres Gefüge, welches sich wiederum auf die mechanischen Eigenschaften des Materials auswirkt. Mehrere Studien weisen auf die Wirksamkeit von SEBS-g-MA bei Polymerblends, welche aus PET und PE bestehen, hin [54], [56], [54], [57], [58]. Sowohl der Verträglichkeitsvermittler FG1901 G als auch G1643 M von Kraton sind diesem Blockcopolymer zuzuordnen. Dennoch wurde nur bei FG1901 G zusätzlich MA aufgepropft. Während bei G1643 M Antioxidans zugefügt wurden [53], [55].

Ethylen Butylacrylat (EBA)

Bei Ethylen Butylacrylat (EBA) besteht – wie der Name bereits verrät – aus Ethylen und Butylacrylat, welches durch eine Hochdruck-Radikalpolymerisation hergestellt wird. Aufgrund des Butylacrylat Gehalts kann es für Anwendungen eingesetzt werden, bei denen Weichheit, Flexibilität und Polarität erforderlich sind. Aufgrund der Zusammensetzung teilt sich dieses in zwei Regionen auf. In einen kristallinen und einen amorphen-Bereich [59]. Bei Lucofin 1492M HG handelt es sich um ein EBA Copolymer, welches mit MA gepropft wurde [60].

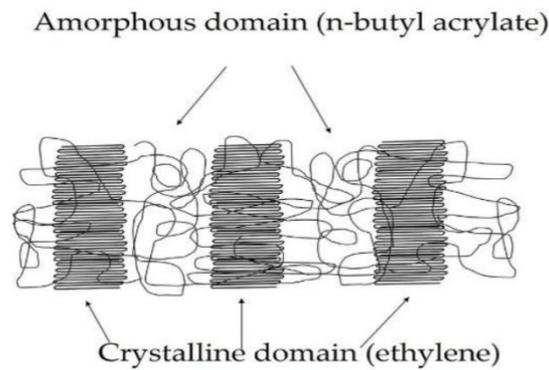


Abbildung 9: Darstellung des Kristallinen und Amorphen Bereiches von EBA [59].

Lucofin 1492M HG

Lucofin 1492M HG ist ein chemisch modifiziertes mit Maleinsäureanhydrid (MA) gepfropftes Polyethylen-butylacrylat (EBA) Copolymerisat, wobei das zugrundeliegende EBA ein ‚random‘ Copolymer ist, welches aus einem kontinuierlichen Röhrenreaktorprozess entsteht. Zudem weist es aufgrund der MA-Pfropfung eine, i. Vgl. zum Basispolymer, erhöhte Polarität auf. Der Schmelzflussindex (MFI) beträgt bei einer Temperatur von 190°C und einer Last von 2,16 kg zwischen 2 und $5 \frac{g}{10 \text{ min}}$. Das gepfropfte MA hat einen Masseanteil zwischen 0,7% und 1% [60].

Stabilisatoren

Polymere können durch den Einsatz von Stabilisatoren von den meisten äußeren Einflüssen geschützt werden. Diese verhindern, dass chemische Substanzen bzw. Energien deren Struktur und/oder Eigenschaften nachteilig beeinflussen. Um eine möglichst effektive Wirkung zu erzielen, sollte der Stabilisator ausreichend gut verteilt sein. Ohne die Anwesenheit von geeigneten Stabilisatoren, könnten einige Kunststoffe erst gar nicht verarbeitet werden [30].

Angewandte Methoden zur Versuchsdurchführung

Auf den folgenden Seiten werden die angewandten Methoden und Instrumente näher erläutert, um ein Bild von der Versuchsdurchführung zu bekommen. Folgende Verfahren und Instrumente wurden für die Durchführung herangezogen:

- Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC)
- Haake Mini Lab II (Extruder)
- Haake Mini Jet 2 (Spritzguss)
- Plattenpresse 200 P (Presse)
- Zwick Z050 (Zugversuch)
- Instron CEAST 9050 (Pendelschlagwerk)
- Philips XL-30 (Rasterelektronenmikroskop)

Vorbereitung der Materialien für die Verarbeitung

Um die verwendeten Kunststoffe verarbeiten zu können, müssen diese vorbehandelt werden. Dies bedeutet unter anderem, dass das Material – sofern dieses nicht bereits als Granulat vorliegt - soweit verkleinert wird, das es dem Extruder beigefügt werden kann. Zudem wurden das PET und die zerkleinerte Mehrschichtfolie vor der Verarbeitung getrocknet.

Zerkleinern

Das recycelte PET sowie die Mehrschichtfolien mussten vor der Verarbeitung zerkleinert werden. Für die fachgerechte Zerkleinerung wurde eine Schneidemühle eingesetzt, welche das Material durch Scherung in splitterförmiges Granulat zerschneidet. Da das Material in sehr unterschiedliche Partikelgrößen zerschnitten wird, müssen diese im Anschluss gesiebt werden. Dies führt dazu, dass zu große Partikel aussortiert werden, wodurch wiederum die übrig gebliebenen Partikel eine verhältnismäßig geringere geometrische Abweichung von einander haben. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass der Staubanteil nur geringe Ausmaße annimmt. Ansonsten sollte dieser durch einen weiteren Prozessschritt entfernt werden. Dies hat zur Folge, dass es zu einer nicht zu vernachlässigbaren Verringerung der recycelten Masse kommt [32]. Dabei wurden die Materialien auf maximal $4 \times 4 \text{ mm}^2$ große Schnipsel zerkleinert. Folgende Parameter und Geräte wurden ausgewählt:

- | | |
|----------------------------|--|
| ▪ Universal-Schneidemühle: | Pulverisette 19 (FRITSCH) |
| ▪ Schneidewerkzeug: | Rotor mit V-Schneiden p-19 |
| ▪ Sieb: | P-19 sieve cassette V2A, 4 mm (quadratische Perforation) |
| ▪ Umgebungstemperatur: | Raumtemperatur ca. 23°C |

Trocknen

Für PET müssen bei der Wahl der geeigneten Parameter, einige Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Wird eine zu hohe Temperatur gewählt, kommt es zum thermischen Abbau. Bei der Wahl einer zu niedrigen Temperatur, wird die Feuchtigkeit nur sehr langsam abgegeben. Der Grund dafür liegt in der starken intermolekularen Bindung zwischen dem Polymer und den Wassermolekülen. Somit ist die Trocknungszeit ein weiterer wichtiger Aspekt für die optimale Trocknung von PET [61]. Auf Grundlage der Menge und Klasse des Feuchtigkeitsgrades muss der geeignete Trocknungsprozess ausgewählt werden [32]. Um die Auswirkung des Effektes der Hydrolyse auf die Messergebnisse zu vermeiden, wurde das PET als auch die Mehrschichtfolien, welche einen großen Anteil an PET beinhalten, getrocknet. Für detailliertere Informationen zur Hydrolyse, siehe Unterkapitel Abbaumechanismen auf Seite 18. Die Materialien wurden direkt nach dem Trocknungsverfahren weiterverarbeitet. Folgende Parameter und Geräte wurden ausgewählt:

- Kammerofen: Heraeus T6060
- Temperatur: $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Trocknungszeit: 15 h

Mischung erstellen

Die Mischungen wurden in kleinen Glasgefäßen, welche zuvor mit Wasser ausgespült und getrocknet wurden, zusammengestellt. Aufgrund der Größe des Granulates, wurde für die Kunststoffmischungen eine maximale Abweichung von $\pm 0,1$ g festgelegt. Für den Verträglichkeitsvermittler, welcher in einer feineren Struktur vorlag, wurde eine maximale Abweichung von $\pm 0,01$ g toleriert. Die Zusammensetzung der einzelnen Mischungen ist aus Tabelle 1 zu entnehmen.

Die Mischungen wurden unter Zuhilfenahme folgender Geräte und Bedingungen erstellt:

- Präzisionswaage: PCB 3500-2 (Kern), Genauigkeit 0,01 g
- Umgebungstemperatur: Raumtemperatur ca. 23°C

Tabelle 1: Zusammensetzung der einzelnen Mischungen.

Blend	Verträglichkeitsvermittler	Verhältnis
PET/PE	-	80/20
PET/PE	FG1901 G	80/20 + 2,5% Gew.
PET/PE	FG1901 G	80/20 + 5% Gew.
PET/PE	G1643 M	80/20 + 2,5% Gew.
PET/PE	G1643 M	80/20 + 5% Gew.
PET/PE	1492M HG	80/20 + 2,5% Gew.
PET/PE	1492M HG	80/20 + 5% Gew.
R-PET/PE	-	80/20
R-PET/PE	FG1901 G	80/20 + 2,5% Gew.
R-PET/PE	FG1901 G	80/20 + 5% Gew.
R-PET/PE	G1643 M	80/20 + 2,5% Gew.
R-PET/PE	G1643 M	80/20 + 5% Gew.
R-PET/PE	1492M HG	80/20 + 2,5% Gew.
R-PET/PE	1492M HG	80/20 + 5% Gew.
MSF	FG1901 G	80/20 + 2,5% Gew.
MSF	FG1901 G	80/20 + 5% Gew.
MSF	G1643 M	80/20 + 2,5% Gew.
MSF	G1643 M	80/20 + 5% Gew.
MSF	1492M HG	80/20 + 2,5% Gew.
MSF	1492M HG	80/20 + 5% Gew.

Verarbeitungsparameter

Im ersten Schritt wurden die optimalen Parameter für die Verarbeitung ermittelt. Um dem Umfang dieser Arbeit gerecht zu werden, wurden dreiundzwanzig Proben mit unterschiedlichen Steuergrößen bzw. Materialien erstellt. Diese sind in der Tabelle 2 und 3 aufgelistet. Anhand der gemessenen mechanischen Eigenschaften und der optischen Beurteilung der Proben wurden die idealen Parameter für die weiteren Verfahren gewählt. Für jede Variante wurden mindestens zwei Proben gefertigt und ausgewertet. Daher sind die gemessenen Daten, aufgrund der geringen Stichprobe, nicht statistisch abgesichert. Dennoch genügt deren Aussagekraft, um eine grobe Abschätzung bezüglich deren Verarbeitbarkeit zu treffen.

Zuerst wurde die Verarbeitungstemperatur des Extruders sowie die Zylinder- und Werkzeugtemperatur der Spritzgussmaschine ermittelt. Dabei wurde untersucht, ob sich die Proben

bei 265°C oder 275°C besser verarbeiten lassen. Es hat sich gezeigt, dass sich die Proben bei 275°C einfacher verarbeiten lassen. Dies könnte unter anderem damit zusammen hängen, dass die 275°C etwas höher über der Schmelztemperatur von PET liegen. Im nächsten Schritt wurden der Druck und die Scherrate verändert. Wobei der Vor- bzw. Nachdruck stets gleich war. Bei einer Scherrate von 120 Umdrehungen pro Minute konnte eine deutlich höhere Bruchdehnung gemessen werden als bei jenen Proben, welche mit einer geringeren Scherrate erstellt wurden. Jedoch wurde an den Probenrändern eine stark ausgeprägte Hautbildung festgestellt. Welche vermutlich auf einen nicht zu vernachlässigendem Abfall der Viskosität zurückzuführen ist. Aus diesem Grund wurde eine Drehzahl von $77 \frac{U}{min}$ beibehalten. Zudem wurde ein Druck von unter 350 bar ausgeschlossen, da jene Proben welche mit einem Vor- bzw. Nachdruck von 250 bar gefertigt wurden, aufgrund ihrer Oberflächenbeschaffenheit nicht weiter ausgewertet werden konnten. Nachdem, wie oben beschrieben, die geeigneten Parameter für die Verarbeitung von PET festgelegt wurden, mussten diese auch für das PE-LD bzw. die Blends getestet werden. Diese zeigten, wie bei PET, eine verhältnismäßig gute Verarbeitbarkeit.

Tabelle 2: untersuchte Verarbeitungsparameter (Teil 1)

Nummer	Vortrocknen		Extruder		Spritzgießen						Material	Bezeichnung
	Zeit [h]	Temp. [°C]	Temp. [°C]	Verweilzeit [min]	Drehzahl [U/min]	Zylindertemp. [°C]	Moldtemp. [°C]	Vordruck [bar]	Nachdruck [bar]	Druckzeit [s]		
1	15	120	265	5	77	265	140	350	350	10	PET	PET 1101 INVISTA
2	6	120	275	3	77	275	120	350	350	10	PET	PET 1101 INVISTA
3	6	120	265	3	77	265	120	350	350	10	PET	PET 1101 INVISTA
4	6	120	265	3	77	265	80	350	350	10	PET	PET 1101 INVISTA
5	6	120	275	3	77	275	80	350	350	10	PET	PET 1101 INVISTA
6	15	80	275	3	77	275	80	450	450	10	PET	PET 1101 INVISTA
7	15	120	275	3	77	275	80	250	250	10	PET	PET 1101 INVISTA
8	15	120	275	3	40	275	80	350	350	10	PET	PET 1101 INVISTA
9	15	120	275	3	100	275	80	350	350	10	PET	PET 1101 INVISTA
10	16	80	275	3	77	275	60	350	350	10	Blend	PET/LDPE 80/20
11	16	80	275	3	77	275	80	350	350	10	Blend	PET/LDPE 80/20
12	16	80	275	3	77	275	80	450	450	10	Blend	PET/LDPE 80/20
13	15	80	260	3	77	260	80	350	350	10	LDPE	LDPE 290 E DOW
14	15	80	270	3	77	270	80	350	350	10	LDPE	LDPE 290 E DOW
15	15	80	275	3	77	275	80	350	350	10	LDPE	LDPE 290 E DOW
16	15	80	275	3	77	275	80	450	450	10	LDPE	LDPE 290 E DOW
17	15	80	280	3	77	280	80	350	350	10	LDPE	LDPE 290 E DOW

Tabelle 3: untersuchte Verarbeitungsparameter (Teil 2)

Nummer	Vortrocknen		Extruder		Spritzgießen						Material	Bezeichnung
	Zeit [h]	Temp. [°C]	Temp. [°C]	Verweilzeit [min]	Drehzahl [U/min]	Zylindertemp. [°C]	Moldtemp. [°C]	Vordruck [bar]	Nachdruck [bar]	Druckzeit [s]		
18	6	80	275	3	77	275	80	450	450	10	PET	PET 1101 INVISTA
19	6	80	275	3	77	275	80	450	450	10	LDPE	LDPE 290 E DOW
20	6	80	275	3	77	275	80	450	450	10	Blend	PET/LDPE 80/20
21	17	100	275	3	77	275	80	450	450	10	PET	PET 1101 INVISTA
22	17	100	275	3	77	275	80	450	450	10	LDPE	LDPE 290 E DOW
23	17	100	275	3	77	275	80	450	450	10	Blend	PET/LDPE 80/20

Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Um das Verfahren ordnungsgemäß durchführen zu können, sind mehrere Rahmenbedingungen einzuhalten. Zudem wird eine Referenz benötigt, welche zum Abgleich der an der Probe gemessenen energetischen Veränderungen dient. In den vorliegenden Messungen wurde Luft als Referenz herangezogen. Um die aufgenommenen bzw. abgegebenen Wärmeströme zu erfassen, muss sowohl die Probe als auch die Referenz unter denselben Rahmenbedingungen aufgeheizt und abgekühlt werden. Die Abkühl- und Aufheizrate können frei gewählt werden. Anhand des Abkühl- und Aufheizverlaufes pro Zeiteinheit, können verschiedenste Aussagen über die Eigenschaften der Probe getroffen werden [62], [63]. Weiter ermöglicht dieses Verfahren, einen Einblick in die thermische Vorgeschichte des Materials zu bekommen, wie z.B. Verarbeitungsbedingungen und physikalische Alterung. Beispielsweise kann eine Nachkristallisation im DSC-Verlauf auf eine zu geringe Werkzeugtemperatur beim Spritzgießen hinweisen. Jedoch können diese Informationen nur beim Auswerten des ersten Heizlaufes ermittelt werden. Der Begründung liegt darin, dass nach dem ersten Heizlauf eine kontrollierte Abkühlung stattfindet. Erst beim zweiten Heizlauf werden die Materialkennwerte ermittelt [64], [62], [32].

Für diese Arbeit, waren im speziellen die Schmelzbereiche der einzelnen Kunststoffe von Interesse. Auf der einen Seite musste gewährleistet werden, dass die Kunststoffe bei der gewählten Verarbeitungstemperatur schmelzen. Auf der anderen Seite durfte die Verarbeitungstemperatur nicht zu hoch gewählt werden, damit es zu keinen Abbauvorgängen kommt und der Kunststoff in Folge irreversible beschädigt wird. Auf Grundlage der Verarbeitungstemperatur wurde für das DSC-Verfahren ein Temperaturbereich von 0°C bis 300°C gewählt.

Zuerst wurde das Material auf 300°C erhitzt um Informationen über dessen Vorgeschichte zu erhalten und anschließend kontinuierlich auf 0°C gekühlt. Dann wurde dieser Vorgang wiederholt. Im zweiten Durchgang wurden Informationen zu den Eigenschaften des Materials ermittelt. In Tabelle 10 sind die Kunststoffe und deren detektierten Schmelzbereiche aufgelistet.

Die Messdaten wurden mittels energetischer Veränderung unter Zuhilfenahme folgender Geräte und Bedingungen ermittelt:

- | | |
|-------------------------|--|
| ▪ Waage: | Sartorius LE 225 D |
| ▪ Probeneinwaage: | 5 mg +/-10% |
| ▪ Wiegepresse: | Tzero Press |
| ▪ DSC – Gerät: | TA Instruments DSC Q2000 |
| ▪ Kühlsystem:
(LNCS) | TA Instruments Liquid Nitrogen Cooling Accessory |
| ▪ Tiegel: | TA Instruments Standard Pan bzw. Standard Lid
(Material: Aluminium) |
| ▪ Referenzmaterial: | Luft |

- | | |
|----------------------|--|
| ▪ Spülgas: | 50 ml Stickstoff |
| ▪ Temperaturbereich: | 0°C – 300°C |
| ▪ Heizrate: | $10 \frac{K}{min}$ |
| ▪ Abkühlrate: | $10 \frac{K}{min}$ |
| ▪ Software: | TA Instruments Explorer Advantage v5.4.0 |
| ▪ Auswertung: | Universal Analysis |

Die analysierten Materialien (siehe Tabelle 10) wurden folgender Prozedur unterzogen¹:

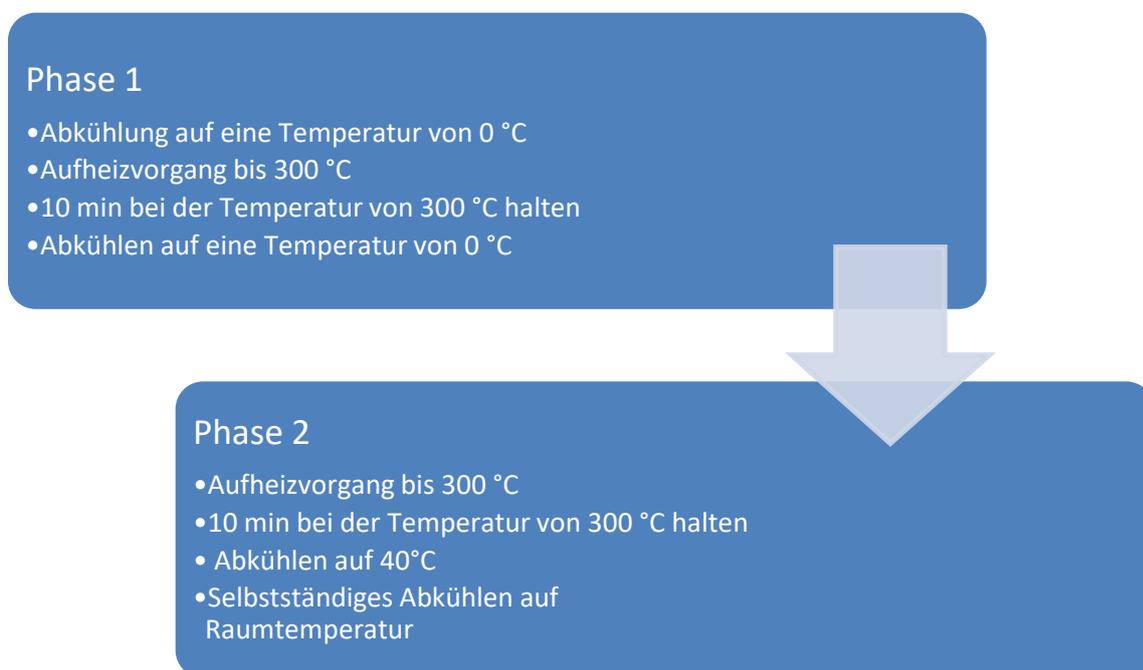


Abbildung 10: Parameter der Phasen (DSC).

Doppelschneckenextruder

Ein Extruder kann zur Herstellung von Halbzeugen, Rohren oder Folien verwendet werden und ist durch seine kontinuierliche Arbeitsweise gekennzeichnet [48], [32]. Dabei kann die zugeführte Formmasse in festem bis flüssigen Zustand vorliegen. Je nach Anwendung wird einer der folgenden drei Extruder eingesetzt:

1. Einschneckenextruder
2. Doppelschneckenextruder
3. Planetenwalzenextruder [32]

Für diese Arbeit wurde der Schneckenextruder Haak Mini Lab II eingesetzt. Dieser besitzt zwei nebeneinander liegende Schnecken, welche sich gegenläufig rotieren. Die Stege der einen Schnecke

¹ Abkühl- und Aufheizrate betragen 10 K/min.

gehen in die Gänge der anderen über. Der Aufbau einer Schnecke ist mit der geometrischen Form einer Schraube vergleichbar. Diese können entweder gleichsinnig oder gegensinnig rotieren. Die Besonderheit des gegenläufigen Doppelschneckenextruders besteht darin, dass die Förderung unabhängig von der Reibung zwischen Material und Zylinderwand stattfindet. Daher wird auch oft vom Prinzip der Zwangsförderung gesprochen [32].

Ablauf der Extrusion

Die Materialien wurden dem Extruder in fester Form zugeführt. Mischungen wurden, bevor diese dem Extruder beigefügt wurden, zusätzlich mechanisch vermischt. Dadurch soll eine möglichst homogene Mischung gewährleistet werden. Zudem wurden das PET und die zerkleinerten Mehrschichtfolien in einem vorherigen Prozess im Ofen vorgetrocknet, um eine Hydrolyse zu verhindern. Anschließend wurden die Materialien von dem Extruder verarbeitet. Für den Bearbeitungsprozess wurden folgende Parameter ausgewählt:

- i. Temperatur: 275°C
- ii. Verweilzeit: 3 min
- iii. Drehzahl: $77 \frac{U}{min}$

Nachdem das Material bei einer Verweilzeit von drei Minuten, einer Drehzahl von $77 \frac{U}{min}$ und einer Temperatur von 275°C verarbeitet wurde, wird es in einem fluiden Zustand ausgegeben.

In Tabelle 4 sind jene Materialien aufgelistet, welche mit dem Extruder verarbeitet wurden. Zudem wurde aufgezeichnet, in welcher geometrischer Form und Zustand die vorliegenden Materialien dem Extruder beigefügt wurden.

Tabelle 4: Materialien welche dem Extruder beigefügt wurden.

Material	Zustand	Geometrie
PET	virgin	Granulat
R-PET	recycelt	splitterförmiges Granulat
LDPE	virgin	Granulat
Mehrschichtfolie²	recycelt	splitterförmiges Granulat
Kraton FG1901 G	virgin	Granulat
Kraton G1643 M	virgin	Granulat
Lucofin 1492M HG	virgin	Granulat

² Verpackung Untertasse „Hütthaler Rauchschinken“

Die Verarbeitung mittels Extruder wurde unter Zuhilfenahme folgender Geräte und Bedingungen durchgeführt:

- Extruder: Haake Mini Lab II
- Waage: Sartorius LE 225 D
- Zugeführte Masse pro Durchgang: 4 g +/-10%
- Extrusion Atmosphäre: Luft
- Verarbeitungstemperatur: 275°C
- Verweilzeit: 3 min

Spritzgießen

Es existiert eine große Anzahl an Einflussgrößen, welche sich entscheidend auf die Qualität des Produktes auswirken können. Das Verfahren ist in folgende drei Prozessschritte zu unterteilen [48], [65].

Prozessschritte

1. Einspritzen
2. Nachdrücken und Kühlen
3. Formteil aus Werkzeug entfernen [48]

Bei der verwendeten Maschine handelt es sich um eine Kolbenspritzgießmaschine, welche keine Schnecke besitzt. Zuerst wird das Material, welches sich in einem fließenden Zustand befindet in das Werkzeug „gespritzt“. Dabei kann der Druck und die Zeit, mit der das Fluid in das Werkzeug gedrückt wird, frei gewählt werden. Anschließend folgt der Nachdruck, welcher in den meisten Fällen in etwa 50-70% des Vordruckes entspricht. Wenn die Kühlzeit vorüber ist, kann das Formteil aus dem Werkzeug entnommen werden und der nächste Zyklus beginnt [48], [65].

Auch wenn dieser Zyklus nur einige Sekunden andauert, haben die gewählten Parameter einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Outputs. Dazu zählen unter anderem die Eigenschaften des Endproduktes. Daher muss - bei der Wahl der geeigneten Parameter - auf mehrere Rahmenbedingungen geachtet werden. In Abbildung 11 wird der Einfluss des gewählten Druckes auf die Eigenschaften der Materialien aufgezeigt. So kann beispielsweise eine zu hoch gewählte Temperatur zu einer Verringerung der Schlagzähigkeit führen, da während der Verarbeitung ein molekularer Abbau stattfindet [48].

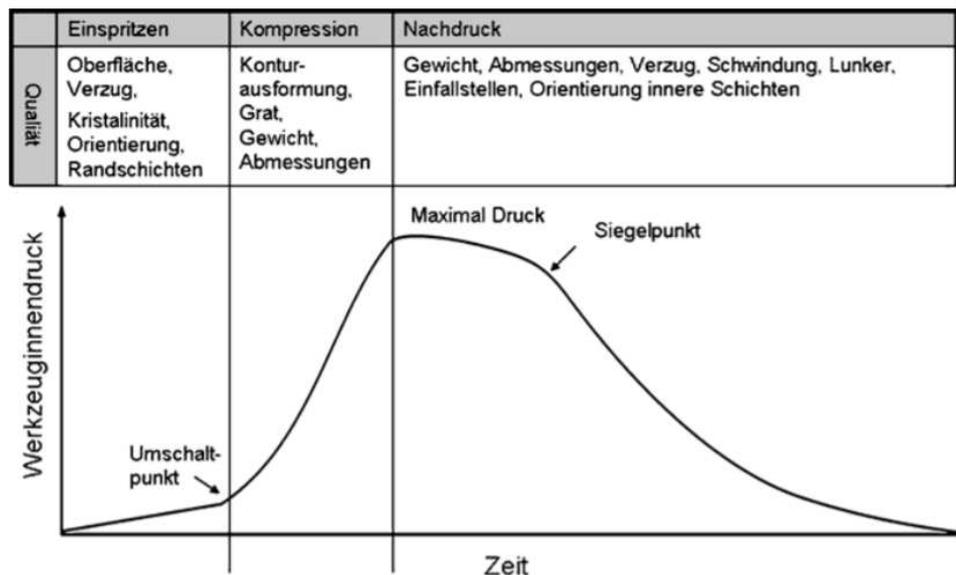


Abbildung 11: Einfluss des Druckes auf die Qualitätsmerkmale des Werkstoffes [65].

In Abbildung 11 sind einige Abweichungen aufgelistet, welche bei einem ungünstig gewählten Druck auftreten können. Dabei werden die qualitativen Abweichungen in drei Phasen aufgeteilt [65].

Auf den nächsten Seiten sind die exakten Parameter aufgelistet, welche für diese Arbeit verwendet wurden. Die Verarbeitung mittels Spritzguss wurde unter Zuhilfenahme folgender Geräte und Bedingungen ermittelt:

- Spritzgussmaschine: Haake Mini Jet 2
- Werkzeugformen: Flachzugprobe DIN EN ISO 527-2, Typ 5A
Schlagzugproben DIN EN ISO 8256
- Zylindertemperatur: 275°C
- Werkzeugtemperatur: 80°C
- Vordruck: 400 bar
- Nachdruck: 400 bar
- Vor- bzw. Nachdruck Dauer: 10 s
- Restkühlzeit bis zur Herausnahme: ca. 1 min
- Auswertung: Universal Analysis

Proben Präparation

Nachdem die Proben aus dem Werkzeug entnommen wurden, konnten diese nicht direkt auf ihre mechanische Beständigkeit geprüft werden. Die Proben mussten zuerst präpariert werden, um Unreinheiten bzw. Unregelmäßigkeiten zu entfernen. Anschließend wurden diese darauf untersucht ob deren geometrische Form mit der Norm vereinbar ist. Erst als diese zwei Bedingungen erfüllt waren, konnten die Proben für die Versuchsdurchführung freigegeben werden. Dabei wurden für die Zug- bzw. die Schlagzugproben folgende Normen DIN EN ISO 527-2 (5A) [66] bzw. DIN EN ISO 8256

[67] herangezogen. Für die Präparation der Proben wurden folgende Werkzeuge und Normen herangezogen:

- Schlagzugprobengeometrie: 60 mm x 10 mm x 1 mm
- Zugprobengeometrie: lt. DIN EN ISO 527-2 Typ A
- Schleifpapier: SiC Paper #1200 (Struers)
- Schneide Werkzeug 1: allg. Schneideschere
- Schneide Werkzeug 2: Rasierklinge (Hugo Herkenrath)
- Lehre: Messschieber mit Digitalanzeigen
- Umgebungstemperatur: Raumtemperatur ca. 25°C

Zugversuch

Im Vergleich zu anderen Werkstoffen, müssen bei der Prüfung von Kunststoffproben einige Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Zum einen sind deren Eigenschaften stark temperaturabhängig. Dies trifft besonderes bei thermoplastischen Kunststoffen zu. Daher wurde darauf geachtet, dass die Proben bei Raumtemperatur (ca. 23°C) gelagert wurden und von äußeren Einflüssen wie z.B. Licht geschützt waren. Zum anderen hat die Belastungsgeschwindigkeit einen wesentlichen Einfluss auf das plastische Verhalten. Bei der Prüfung der vorliegenden Proben wurde daher eine Belastungsgeschwindigkeit von $10 \frac{mm}{min}$ gewählt [62].

Für diese Arbeit waren im speziellen der E-Modul, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung von Interesse. Im Kapitel Ergebnisse sind die zugehörigen Diagramme beigelegt.

Die Versuche wurden unter Zuhilfenahme folgender Geräte und Bedingungen ermittelt:

- Prüfmaschine: Zwick Z050
- Versuchsgeschwindigkeit: 10 mm/min.
- Umgebungstemperatur: Raumtemperatur ca. 25°C
- Software: testXpert II
- Kraftsensor: 1 kN

Schlagzugversuch

Der Schlagzugversuch wird durchgeführt, um Informationen über das Zähigkeitsverhalten des Materials zu erlangen. Jedoch können die gleichen Materialien unterschiedliche Ergebnisse hervorbringen. Der Grund liegt darin, dass Faktoren wie z.B. Abkühlbedingungen oder Orientierung einen starken Einfluss auf dessen Eigenschaften haben [48].

Die Schlagzugproben wurden nach DIN EN ISO 8256 Methode A gekerbt und getestet. Zum Kerben der Proben wurde eine motorisierte Kerbmaschine von Instron eingesetzt. Um den Kerbabstand möglichst exakt zu bestimmen, wurde das Mikroskop Zeiss Stemi 2000-C eingesetzt. Zudem wurde

das Pendelschlagwerk vor jeder Anwendung kalibriert. Die Ergebnisse des Schlagzugversuches wurden auf Basis der Formel 1 ausgegeben.

Formel 1: Berechnung der Energiedifferenz

$$E = m * g * L * (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_0) \quad [68]$$

Die Vorbereitung bzw. Versuchsdurchführung wurde unter Zuhilfenahme folgender Geräte und Bedingungen bewerkstelligt:

- | | |
|------------------------|---|
| ▪ Pendelschlagwerk: | Instron CEAST 9050 |
| ○ Hammer: | Instron Typ 7600.302, 2 J, 15 g,
Auftreffgeschwindigkeit $2,9 \frac{m}{s}$ |
| ▪ Kerbmaschine: | Instron CEAST Type 6951, motorisiert |
| ○ Anzeige: | Digital |
| ○ Kerbgeschwindigkeit: | ca. $20 \frac{m}{min}$ |
| ▪ Mikroskop: | Zeiss Stemi 2000-C |
| ○ Software: | AxioVision Rel.4.8 |
| ○ Beleuchtung: | KL 1500 LCD |
| ▪ Umgebungstemperatur: | Raumtemperatur ca. 23 °C |

Rasterelektronenmikroskop

Die Proben wurden mit einer dünnen Goldbeschichtung überzogen, um eine ausreichende Leitfähigkeit zu gewährleisten. Zudem wurde an den Seiten Silber aufgebracht. Die Vorbereitung bzw. Versuchsdurchführung wurde unter Zuhilfenahme folgender Geräte und Bedingungen bewerkstelligt:

- | | |
|----------------------------|---|
| • Elektronenmikroskop: | Philips XL-30 Rasterelektronenmikroskop |
| • Detektor: | EDX-Detektor (EDAX Sapphir) |
| • Beschleunigungsspannung: | 10 kV |
| • Anlage zur Beschichtung: | Agar Sputter Coater B7340 |

Plattenpresse

Mit diesem Verfahren können gepresste Platten hergestellt werden. Neben dem Spritzgussverfahren, wurde auch die Plattenpresse zur Erzeugung von Probekörpern angewandt. Denn im Gegensatz zum Spritzgiesen sind beim Plattenpressen sind die Polymerketten nahezu orientierungsfrei. Vorausgesetzt, die Polymerketten wurden vor der Verarbeitung nicht ausgerichtet [48], [69]. Ein Nachteil an diesem Verfahren ist, dass keine Mischung einer möglichen inhomogenen Masse stattfindet. Somit muss vor der Verarbeitung sichergestellt werden, dass eine homogene Masse vorliegt. Das Material wird in fünf Phasen unter unterschiedlichen Bedingungen bearbeitet.

Die Vorbereitung bzw. Versuchsdurchführung wurde unter Zuhilfenahme folgender Geräte und Bedingungen bewerkstelligt:

- Presse: Plattenpresse Collin 200 P
- Presskraft: max. 125 kN
- Antihaft-Spray: WD-40 Hochleistungs PTFE Schmierspray
- Anzahl der Phasen: Fünf
- Heizrate: $5 \frac{K}{min}$
- Kühlrate: $5 \frac{K}{min}$

Die ausgewählten Materialien wurden folgender Prozedur unterzogen:

Phase 1	•Temperatur: 105°C •Druck: 10 bar	Zeit: 5 min Rate: 0 K/min
Phase 2	•Temperatur: 180°C •Druck: 20 bar	Zeit: 16 min Rate: 5 K/min
Phase 3	•Temperatur: 275°C •Druck: 40 bar	Zeit: 20 min Rate: 5 K/min
Phase 4	•Temperatur: 275°C •Druck: 60 bar	Zeit: 3 min Rate: 0 K/min
Phase 5	•Temperatur: 30°C •Druck: 70 bar	Zeit: 50 min Rate: 5 K/min

Abbildung 12: Die einzelnen Phasen des Pressvorganges.

Ergebnisse

In dem folgenden Kapitel werden die Ergebnisse präsentiert. Diese werden grob in drei Abschnitte unterteilt. Im ersten Abschnitt werden die ermittelten Parameter für die Versuchsdurchführung aufgezeigt. Im nächsten Abschnitt werden die gemessenen mechanischen Eigenschaften sowohl für die gepressten als auch spritzgegossenen Proben grafisch dargestellt und erläutert. Zudem werden die Bilder der Bruchoberfläche, welche mit dem Rasterelektronenmikroskop gefertigt wurden, vorgelegt. Im letzten Teil werden die ermittelten Daten aus dem DSC Verfahren bereitgestellt und erläutert.

Es wurden folgende Parameter gewählt:

Trocknen

- Temperatur: 100°C
- Zeit: 15 h

Extruder

- Extrusionstemperatur: 275°C
- Verweilzeit: 3 min
- Drehzahl: $77 \frac{U}{min}$

Spritzgussmaschine

- Zylindertemperatur: 275°C
- Werkzeugtemperatur: 80°C
- Vordruck: 450 bar
- Nachdruck: 450 bar
- Druckzeit: je 10 s

Mechanischen Eigenschaften

In dem folgendem Abschnitt, werden die Ergebnisse aus den Zug- und Schlagzugversuchen sowohl grafisch als auch in einer Tabelle mit den exakten Werten präsentiert. Bei den ermittelten mechanischen Eigenschaften handelt es sich um die Zugfestigkeit, E-Modul, Bruchdehnung und die Schlagzugzähigkeit.

In Abbildung 13 wurde die Schlagzugzähigkeit von PE-LD in Kilojoule pro Quadratmeter aufgetragen. Auf der linken Seite sind die Ergebnisse von den Proben welche mit der Presse gefertigt wurden dargestellt, während auf der rechten Seite die Ergebnisse von den Proben welche mit Spritzguss gefertigt wurden, vorgestellt werden. Die Auswertung zeigt, dass beide Probensätze einen arithmetischen Mittelwert von ungefähr $100 \frac{kJ}{m^2}$ aufweisen. Die Streuung ist ebenfalls bei beiden Probensätzen ähnlich. Somit kann anhand der Schlagzugzähigkeit kein signifikanter Unterschied

festgestellt werden. Jedoch lassen die Werte auf ein zähes Verhalten schließen, welches bei PE-LD zu erwarten ist.

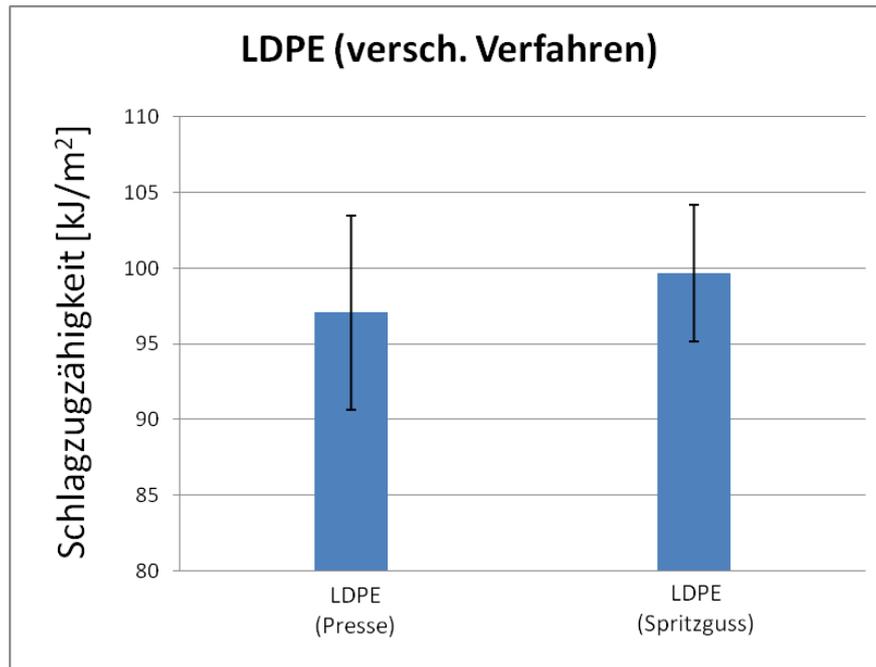


Abbildung 13: Schlagzugzähigkeit von LDPE mit verschiedenen Verfahren.

Bei der Betrachtung des E-Moduls in Abbildung 14 lässt sich für den arithmetischen Mittelwert eine Differenz erkennen, welche aufgrund der geringen Streuung die Aussage zulässt, dass jene Proben, welche mit der Presse gefertigt wurden, einen höheren E-Modul im Vergleich zu dem anderen Probensatz aufweisen. In der Vergleichsstudie wurde für das PE-LD ein Mittelwert von 95 MPa gemessen [58]. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Mittelwert, welcher in dieser Studie für PE-LD ermittelt wurde. Dies kann mehrere Gründe haben. Wie bereits erwähnt, können sich die spezifischen Eigenschaften der Materialien unterscheiden, wie zum Beispiel deren mittlere molare Masse und vor allem auch der Verzweigungsgrad. Ein weiterer Einfluss könnten die unterschiedlichen Verarbeitungsbedingungen sein.

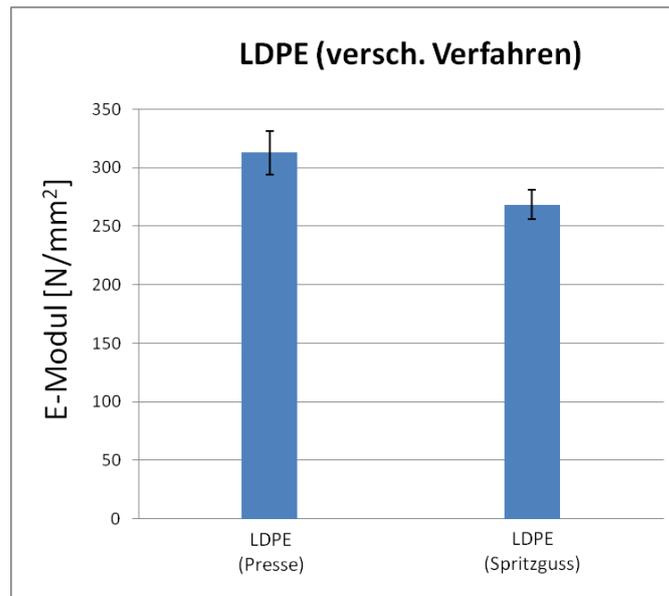


Abbildung 14: E-Modul von PE-LD mit verschiedenen Verfahren.

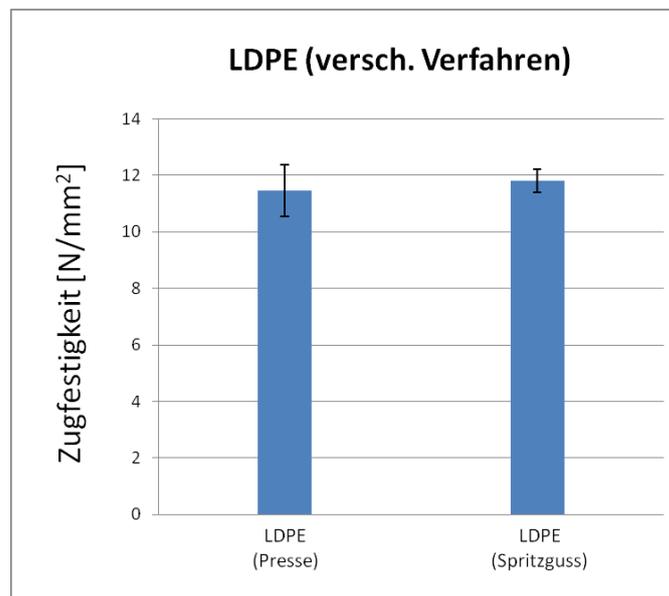


Abbildung 15: Zugfestigkeit von PE-LD mit verschiedenen Verfahren.

Bei den Ergebnissen der Zugfestigkeit lassen sich keine signifikanten Unterschiede erkennen. Beide Verfahren ergeben eine Zugfestigkeit zwischen 11 und 12 MPa. Nur die gepressten Proben weisen eine etwas breitere Streuung auf. Die Vergleichsstudie zeigt ähnliche Werte auf. Erst die Bruchdehnung zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen den zwei gewählten Verfahren auf. Jene Proben, welche mit der Presse verarbeitet wurden, weisen eine Bruchdehnung von 550% bei einer Standardabweichung von 124% auf. Diese Werte können durch die Vergleichsstudie bestätigt werden [58]. Jene Proben, welche mit dem Spritzgussverfahren hergestellt wurden, zeigen eine deutliche geringere Bruchdehnung von 116% bei einer Standardabweichung von 5% auf.

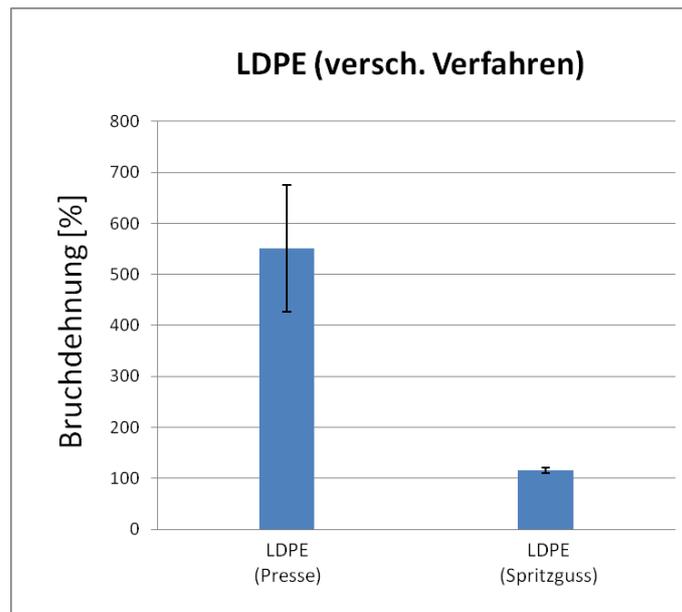


Abbildung 16: Bruchdehnung von PE-LD mit verschiedenen Verfahren.

Da PET mit der Presse nicht verarbeitet werden konnte, sind die folgenden Ergebnisse auf das Spritzgussverfahren zu beziehen. Bei den Grafiken wurden die Ergebnisse, welche denselben Verträglichkeitsvermittler beinhalten, mit der gleichen Farbe dargestellt. Jedoch ist darauf zu achten, dass der linke Balken stets eine Dosierung von 2,5% Gew. wiedergibt während der rechte Balken eine Dosierung von 5% Gew. beinhaltet. Die Dosierung wurde auf das Gesamtgewicht der vorhandenen Mischung bezogen. Einzelne Balken zeigen die Auswertung der Blends bzw. der einzelnen Komponenten denen kein Verträglichkeitsvermittler zugefügt wurde. Wenn größere Abweichungen zwischen den einzelnen Zusammensetzungen aufgetreten sind, wurden jene Werte, welche nicht deutlich zu erkennen sind, zusätzlich in einer eigenen Grafik nochmals vergrößert dargestellt.

PET und PE-LD zeigen deutliche Unterschiede bezüglich deren Schlagzugzähigkeit auf. Während PET eine gemittelte Schlagzugzähigkeit von $24 \frac{kJ}{m^2}$ aufweist, liefert PE-LD einen vier Mal so großen Wert. Anders das recycelte PET, dieses weist einen halb so großen Wert wie das nicht recycelte PET auf. Weiter ist der Abbildung 17 zu entnehmen, dass die Blends eine geringere Schlagzugzähigkeit wie deren einzelne Komponenten besitzen. Dennoch zeigt die MSF eine Schlagzugzähigkeit von $26 \frac{kJ}{m^2}$ auf. Dies entspricht einer doppelt so großen Schlagzugzähigkeit wie das Blend aus PET und PE-LD und einer drei Mal so großen Schlagzugzähigkeit wie das Blend aus R-PET und PE-LD. Die Streuung befindet sich sowohl bei den einzelnen Komponenten als auch den Blends in einem tolerierbaren Bereich.

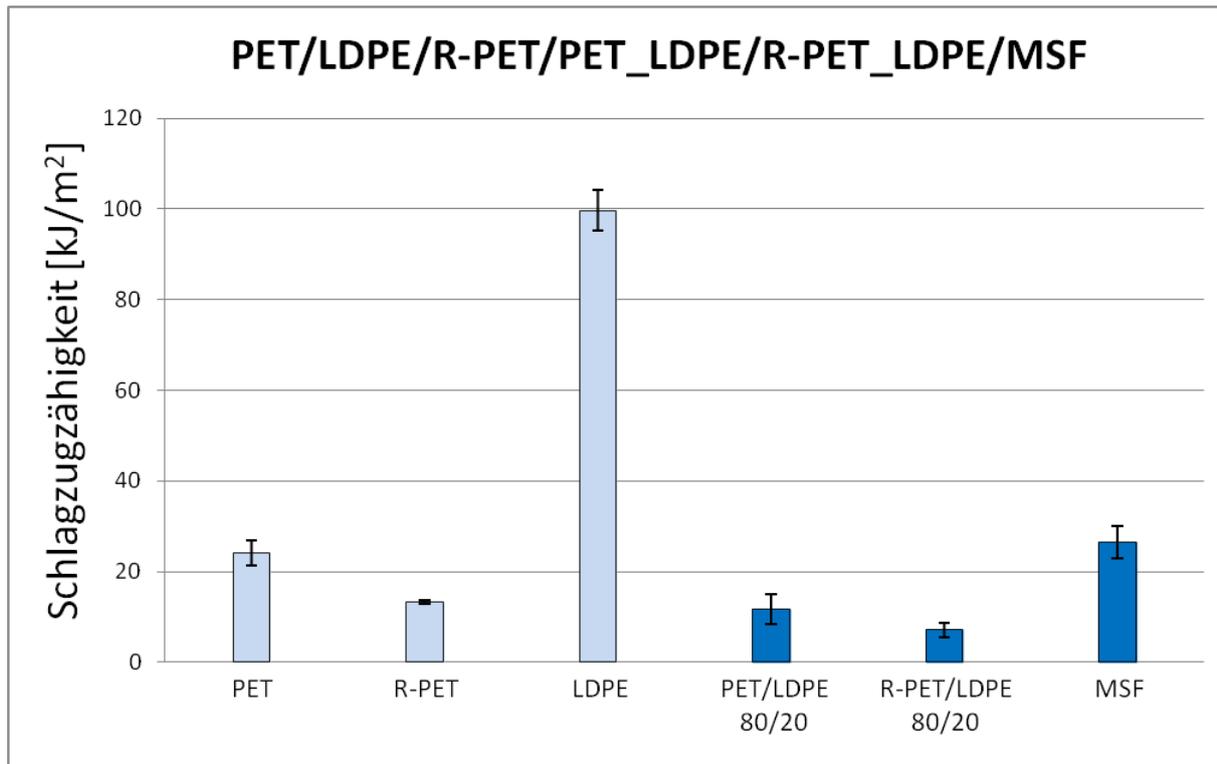


Abbildung 17: Schlagzähigkeit der einzelnen Komponenten und der Blends ohne Compatibilizer.

In Abbildung 18 werden die Ergebnisse betreffend der Schlagzugzähigkeit für Blends mit und ohne Verträglichkeitsvermittler präsentiert. Von links beginnend werden zuerst die Werte für den Verträglichkeitsvermittler **FG1901 G** vorgestellt. Dieser zeigt für die reine PET und LDPE Mischung eine beträchtliche Steigerung der Schlagzugzähigkeit. Durch das Beifügen von 2,5% FG1901 G, konnte ein Wert von $47 \frac{kJ}{m^2}$ erreicht werden. Bei 5% FG1901 G steigerte sich die Schlagzugzähigkeit nochmals um ungefähr 30%, auf $66 \frac{kJ}{m^2}$. Bei den Blends, welche aus recycelten PET und PE-LD bestehen, zeigt sich ein anderes Verhalten. Hier konnte durch Beifügen des Verträglichkeitsvermittlers FG1901 G keine wesentliche Veränderung festgestellt werden. Dennoch liegen die Werte minimal über jenem Blend ohne Verträglichkeitsvermittler. Ein ähnliches Verhalten ist bei den Mehrschichtfolien zu erkennen. Bei dieser Mischung führte der Verträglichkeitsvermittler FG1901 G bei Zufügen von 2,5%, zu einer Verringerung der Schlagzugzähigkeit auf 18 Kilojoule pro Quadratmeter und bei Zufügen von 5% zu einer Halbierung auf $8 \frac{kJ}{m^2}$. Der Einsatz des zweiten Verträglichkeitsvermittlers **G1643 M** zeigt ein verhältnismäßig ähnliches Verhalten. Bei den reinen Blends aus PET und PE-LD konnte die Schlagzugzähigkeit auf $43 \frac{kJ}{m^2}$ gesteigert werden. Dabei wurden sowohl für den Einsatz von 2,5% G1643 M als auch 5% G1643 M dieselben gemittelten Werte gemessen. Durch die Verdopplung des Verträglichkeitsvermittlers konnte nur eine breitere Streuung beobachtet werden. Bei den Blends, welche aus R-PET und LDPE bestehen, konnte durch den Einsatz von G1643 M keine Veränderung festgestellt werden. Die Mehrschichtfolie zeigte bei dem Einsatz von 2,5% G1643 M eine Halbierung der Schlagzugzähigkeit auf $9 \frac{kJ}{m^2}$. Während ein

Anteil von 5% G1643 M zu einer gemittelten Schlagzugzähigkeit von $21 \frac{kJ}{m^2}$ führte. Dieser Wert, würde in etwa jenem Wert entsprechen, welche die Mehrschichtfolie ohne Zugabe eines Verträglichkeitsvermittlers erreicht. Jedoch ist die Streuung sehr groß, wodurch keine verlässliche Aussage möglich ist.

Auch bei dem dritten Verträglichkeitsvermittler, **1492M HG**, konnte im Großen und Ganzen ein ähnliches Verhalten wie bei den zwei vorhergehenden Verträglichkeitsvermittlern beobachtet werden. So konnte auch hier, bei den Blends, welche aus PET und LDPE bestehen, eine enorme Steigerung erzielt werden. Durch Beifügen von 2,5% 1492M HG wurde eine Schlagzugzähigkeit von $59 \frac{kJ}{m^2}$ erreicht. Im Vergleich dazu erreichte das reine Blend eine Schlagzugzähigkeit von $11 \frac{kJ}{m^2}$. Das entspricht nahezu einer Versechsfachung. Bei einem Anteil von 5% 1492M HG, wurde eine gemittelte Schlagzugzähigkeit von $71 \frac{kJ}{m^2}$ gemessen. Dieser Wert geht über eine Versechsfachung hinaus. Somit zeigte dieser Verträglichkeitsvermittler, den stärksten Einfluss auf jene Blends, welche aus PET und PE-LD bestehen. Für die Blends, welche aus R-PET und PE-LD zusammengesetzt sind, konnte durch die unterschiedliche Dosierung keine Veränderung festgestellt werden. Dennoch führte der Einsatz von 1492M HG zu einer geringen, aber zu vernachlässigenden, Steigerung der Schlagzugzähigkeit. Bei den Blends, welche aus dem recycelten PET und PE-LD bestehen, konnte keiner der drei Verträglichkeitsvermittler eine wesentliche Veränderung der Schlagzugzähigkeit vorweisen. Während der Anteil von 2,5% 1492M HG bei den Mehrschichtfolien zu einer deutlichen Verringerung der Schlagzugzähigkeit führte, konnte durch Beifügen von 5% 1492M HG in etwa der gleiche Wert wie ohne den Einsatz eines Verträglichkeitsvermittler erreicht werden. Die Streuung ist bei beiden Probensätzen in einem akzeptablen Bereich. Die Mehrschichtfolie betreffend konnte dieser Verträglichkeitsvermittler die besten Ergebnisse vorweisen. Dennoch ist zu berücksichtigen, dass FG1901 G ähnliche Werte aufweist.

Weiter wurden die **E-Module** der einzelnen Komponenten und Mischungen ermittelt. In Abbildung 19 werden zuerst die Ergebnisse der reinen Komponenten und anschließend die Ergebnisse der Blends ohne und mit Verträglichkeitsvermittler aufgezeigt. Auf der einen Seite weist das reine PET einen gemittelten E-Modul von 2880 MPa auf. Das R-PET verhält sich mit 2507 MPa ähnlich wie das reine PET. Auf der anderen Seite, wurde beim PE-LD ein Wert von 268 MPa gemessen. Bei der Betrachtung der Blends, denen kein Verträglichkeitsvermittler zugefügt wurde, zeigt das Blend, welches aus dem reinen PET und PE-LD besteht, den größten Wert von 1804 MPa auf. Während jenes Blend, welches aus R-PET und PE-LD besteht, den geringsten E-Modul mit 1403 MPa aufweist. Die Mehrschichtfolie befindet sich mit 1685 MPa im mittleren Bereich der vorhergehenden Werte. Dennoch kann aufgrund der Streuung kein wesentlicher Unterschied festgestellt werden.

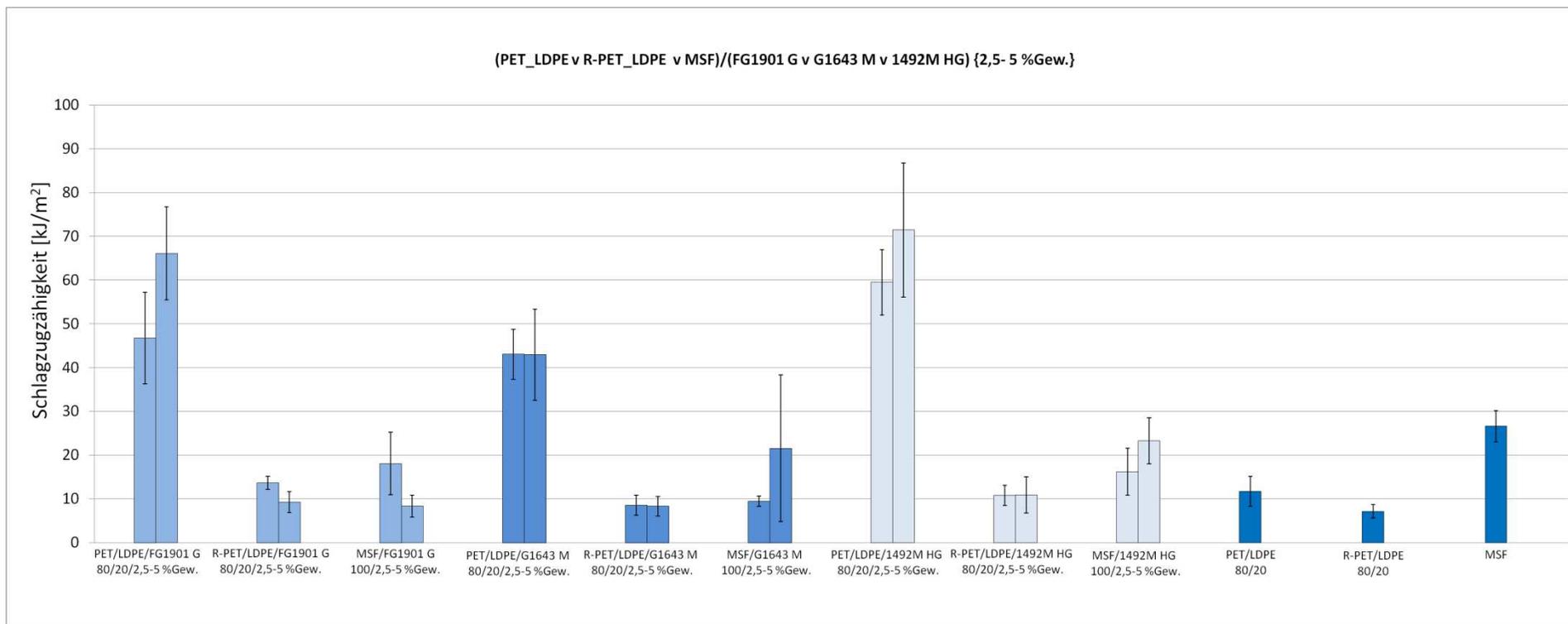


Abbildung 18: Schlagzugzähigkeit von Blends mit und ohne Verträglichkeitsvermittler.

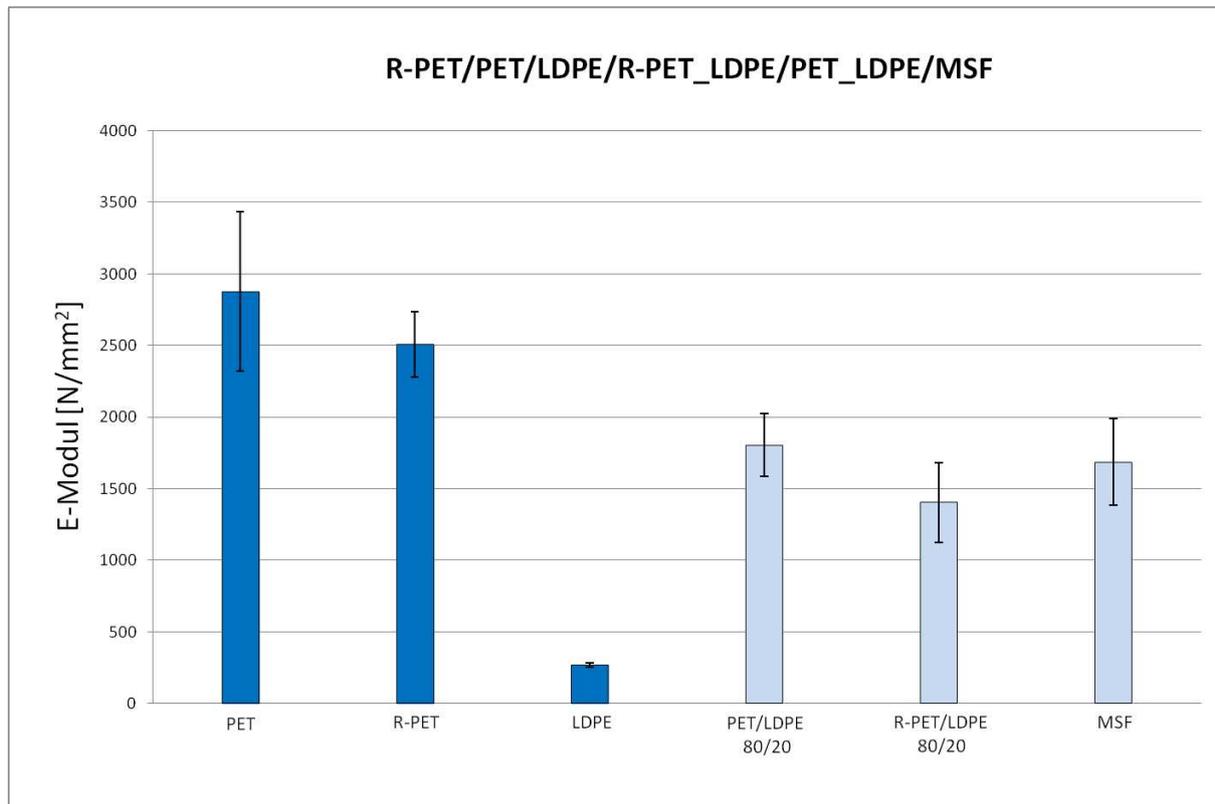


Abbildung 19: E-Modul der einzelnen Komponenten und der Blends ohne Verträglichkeitsvermittler.

In Abbildung 20 sind die Werte für die Blends mit Verträglichkeitsvermittler aufgelistet. Die gesamtliche Betrachtung dieser Ergebnisse zeigt auf, dass im Wesentlichen keine großen Unterschiede zwischen den verschiedenen Verträglichkeitsvermittlern als auch den Blends vorhanden sind. Von links beginnend weist der Einsatz des Verträglichkeitsvermittlers **FG1901 G** bei jenem Blend mit reinem PET einen Wert von 1813 MPa auf. Dieser entspricht jenem Wert, welcher die Blends ohne Verträglichkeitsvermittler aufweisen. Bei der Verdoppelung des Verträglichkeitsvermittlers auf 5%, sinkt der E-Modul auf 1516 MPa. Während sich die Streuung leicht verringert. In der Vergleichsstudie konnte ein ähnliches Verhalten festgestellt werden [58]. Bei den Blends, welche aus R-PET bestehen, sind aufgrund der Dosierung keine signifikanten Veränderungen zu erkennen. Dennoch führt der Einsatz von FG1901 G im Vergleich zu dem reinen Blend zu einer Steigerung des E-Moduls. Bei den Mehrschichtfolien verhält es sich umgekehrt. Hier führt der Einsatz von FG1901 G bei beiden Dosierungen zu einer Verringerung des E-Moduls. Zudem konnte zwischen den Dosierungen kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Als nächstes folgen die Ergebnisse, welche sich durch das Beifügen von **G1643 M** ergeben haben. Bei den Blends, welche aus reinem PET bestehen, führte der Einsatz von 2,5% G1643 M zu einer Verringerung des E-Moduls auf 1422 MPa. Während der Einsatz von 5% G1643 M einen Wert von 1397 MPa aufweist. Bei jenen Blends, welche R-PET beinhalten, konnte eine geringe Steigerung des E-Moduls beobachtet werden. Dennoch kann aufgrund der Streuung kein wesentlicher Einfluss bestimmt werden. Bei der Mehrschichtfolie führte die Zugabe von G1643 M zu fast denselben

Ergebnissen wie ohne Verträglichkeitsvermittler. Zumindest konnte eine Verringerung der Streuung bewerkstelligt werden.

Auch das Beifügen von **1492M HG** führte zu keinen signifikanten Veränderungen. Bei allen drei Blends konnten aufgrund der unterschiedlichen Dosierung keine aussagekräftigen Veränderungen festgestellt werden. Während der Verträglichkeitsvermittler bei den Blends mit reinem PET zur Verringerung des gemittelten Wertes führte, konnte bei den Blends mit R-PET ein geringfügiges Anheben der gemittelten Werte beobachtet werden. Dennoch kann aufgrund der Streuung keine wesentliche Veränderung festgestellt werden. Bei den Mehrschichtfolien verhält es sich ähnlich. Durch das Beifügen des Verträglichkeitsvermittlers konnten sowohl in der Streuung als auch bei den gemittelten Werten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Im nächsten Abschnitt werden die Ergebnisse betreffend der **Zugfestigkeit** präsentiert. In Abbildung 21 werden die Ergebnisse der reinen Komponenten und der Blends ohne Verträglichkeitsvermittler aufgezeigt.

Sowohl die einzelnen PET Komponenten als auch die reinen Blends weisen sehr ähnliche Ergebnisse auf. Während bei dem reinem PET und dem R-PET eine gemittelte Zugfestigkeit von 58 bzw. 55 MPa gemessen wurde, bewegt sich der gemittelte Wert der Blends zwischen 35 MPa und 38 MPa. Für das PE-LD wurde eine Zugfestigkeit von 11 MPa ermittelt. Bis auf das Blend, welches das R-PET beinhaltet, ist die Streuung verhältnismäßig sehr gering.

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse bzgl. der Zugfestigkeit für die Blends mit Verträglichkeitsvermittler dargestellt. Von links beginnend, sind zuerst die gemessenen Werte von **FG1901 G** aufgelistet. Bei den Blends, welche aus reinem PET bestehen, konnte durch die Zugabe von FG1901 G 2,5% keine Veränderung festgestellt werden. Jedoch kann durch die Zugabe von 5% FG1901 G eine geringe Verringerung der Zugfestigkeit auf 34 MPa beobachtet werden. Dies entspricht einer Differenz von 4 MPa. Dennoch kann aufgrund der schmalen Streuung von einer Verringerung gesprochen werden. Bei den Blends, welche R-PET beinhalten, konnte durch den Verträglichkeitsvermittler ein ähnliches Verhalten wie bei dem vorhergehenden Blend beobachtet werden. Die breitere Streuung lässt aber keine genauere Aussage zu. Die Zugabe von 2,5% FG1901 G führt bei der Mehrschichtfolie zu keiner nennenswerten Veränderung. Erst bei 5% bewirkte der Verträglichkeitsvermittler eine deutliche Verringerung der Zugfestigkeit auf 18 MPa.

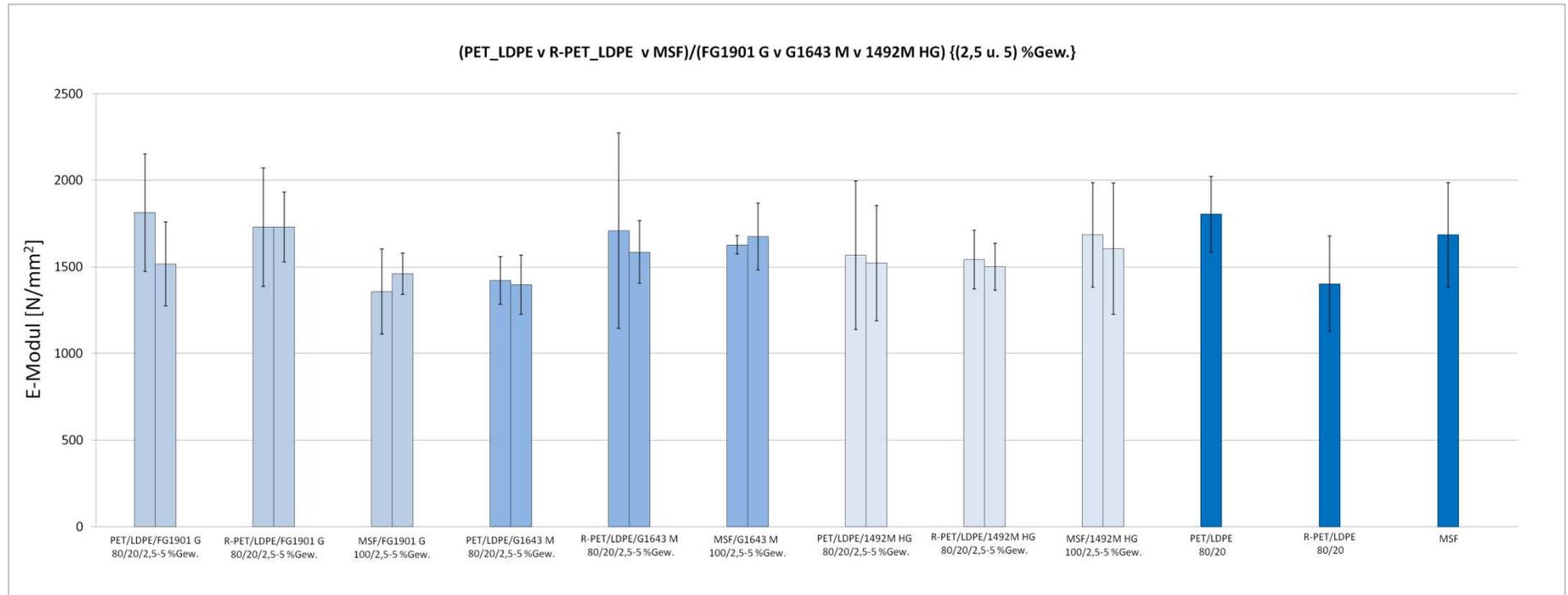


Abbildung 20: E-Module der Blends, mit und ohne Verträglichkeitsvermittler.

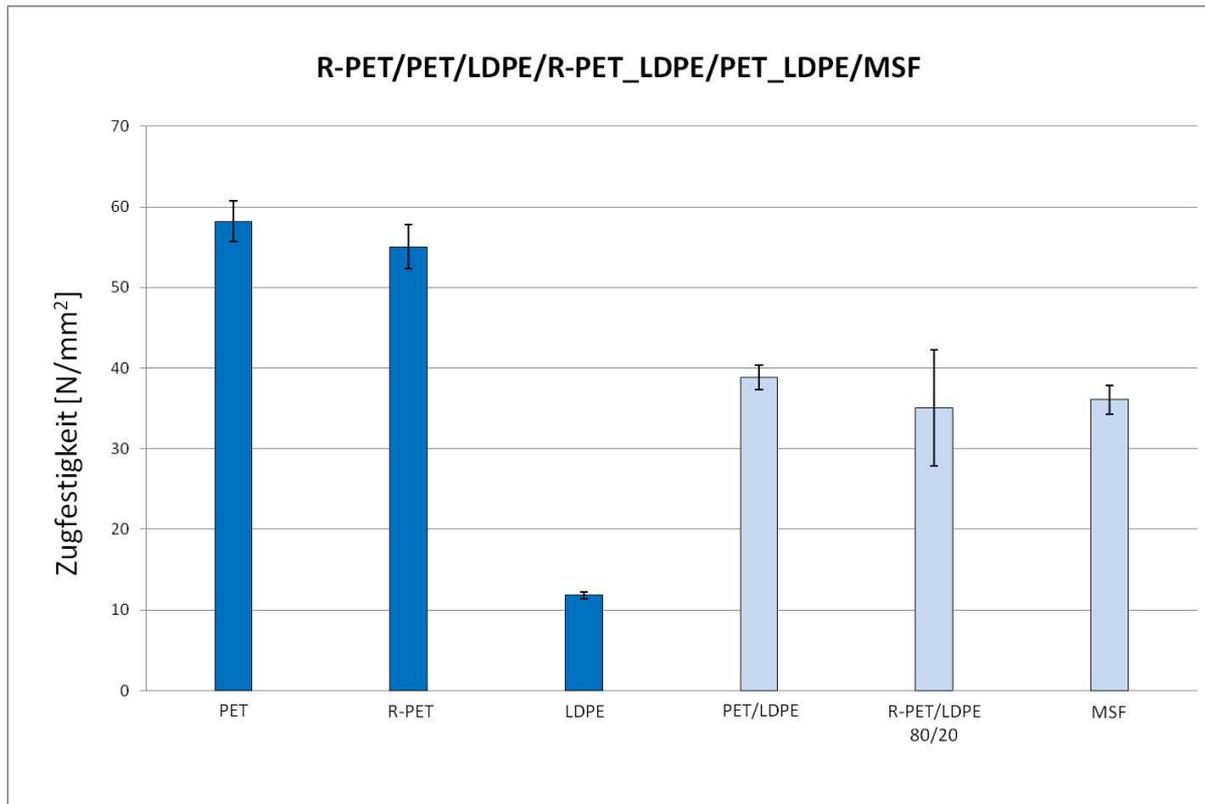


Abbildung 21: Zugfestigkeit der reinen Komponenten und der Blends ohne Verträglichkeitsvermittler.

Durch die Zugabe von **G1643 M** konnte keine wesentliche Veränderung bei den Blends aus reinem PET erreicht werden. Bei den Blends, welche R-PET beinhalten, konnte bei 2,5% G1643 M eine Halbierung der Zugfestigkeit auf 14 MPa ermittelt werden. Im Gegensatz zu den Proben welche 5% G1643 M beinhalten. Bei der Betrachtung dieses Wertes sind keine signifikanten Veränderungen feststellbar. Bei den Mehrschichtfolien konnte genau ein umgekehrtes Verhalten beobachtet werden. Während die Zugabe 2,5% G1643 M zu keiner wesentlichen Veränderung führte, konnte durch das Beifügen von 5% G1643 M eine Abnahme der Zugfestigkeit auf 11 MPa beobachtet werden. Bei diesem Verträglichkeitsvermittler konnte bei allen Werten eine verhältnismäßig sehr geringe Streuung gemessen werden.

Der Verträglichkeitsvermittler **1492M HG** führte bei den Blends mit dem reinen PET zu keiner Veränderung der Zugfestigkeit. Die Streuung liegt unter zwei Prozent. Bei den Blends welche R-PET beinhalten, konnte durch die Zugabe von 2,5% 1492M HG ein gemittelter Wert von 34 MPa gemessen werden. Dennoch kann in diesem Fall aufgrund der breiteren Streuung keine verlässliche Aussage über die Wirkung von 1492M HG getroffen werden. Im Gegensatz dazu kann bei der Zugabe von 5% 1492M HG eine Reduzierung der Zugfestigkeit auf 25 MPa beobachtet werden. Trotz der größeren Streuung im Vergleich zu den anderen Blends, konnte durch den Einsatz des Verträglichkeitsvermittlers eine wesentliche Verringerung der Zugfestigkeit erreicht werden. Bei den Mehrschichtfolien konnte weder eine Dosierung von 2,5% als auch eine Dosierung von 5% 1492M HG zu einer signifikanten Veränderung der Zugfestigkeit führen.

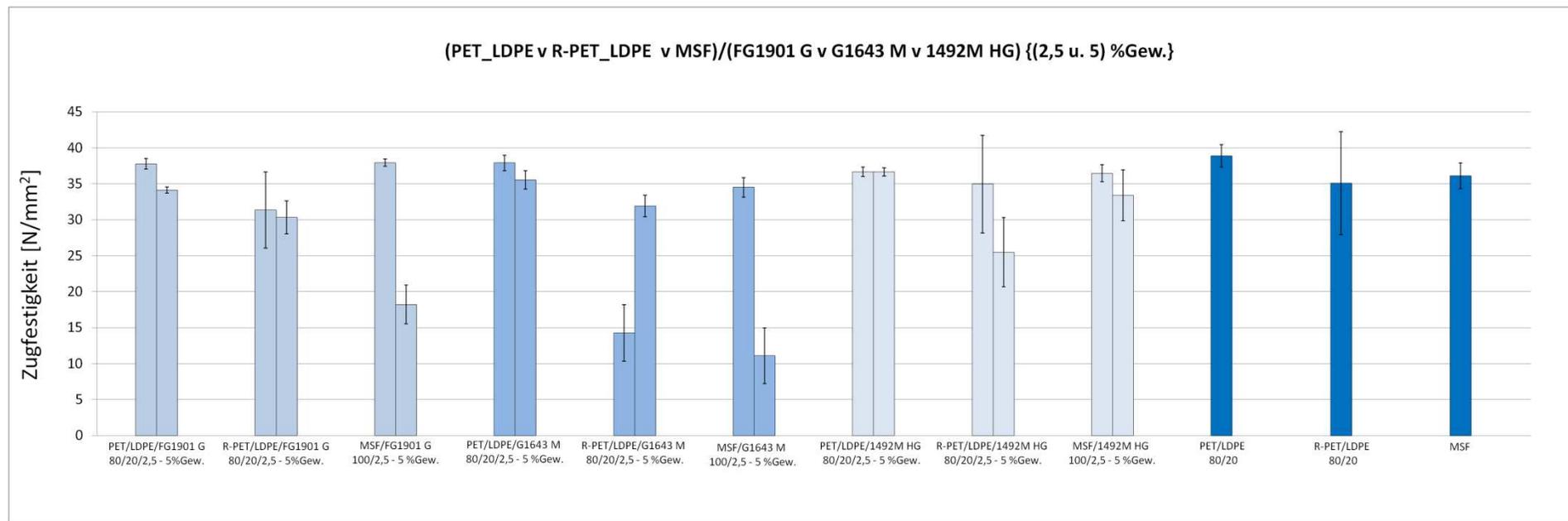


Abbildung 22: Zugfestigkeit der Blends, mit und ohne Verträglichkeitsvermittler.

In dem folgenden Abschnitt wird die ermittelte **Bruchdehnung** präsentiert. In Abbildung 23 werden die Ergebnisse der einzelnen Komponenten und der Blends ohne Verträglichkeitsvermittler dargestellt. PET weist eine gemittelte Bruchdehnung von 148% auf und eine Streuung von 86%. Während das R-PET eine Bruchdehnung von 2% aufweist. Das PE-LD, welches durch Spritzguss verarbeitet wurde, liegt mit einer Bruchdehnung von 116% deutlich näher an dem reinen PET als das R-PET. Bei der Betrachtung der Blends fällt auf, dass die Mehrschichtfolie und jene Blends welche R-PET beinhalten eine ähnliche Bruchdehnung von ungefähr von 3% aufweisen. Während bei dem Blend, welches das reine PET beinhaltet, eine gemittelte Bruchdehnung von 20% und eine Streuung von 35% gemessen wurde. Die breite Streuung lässt keine verlässliche Aussage über dessen Bruchdehnung zu. Die

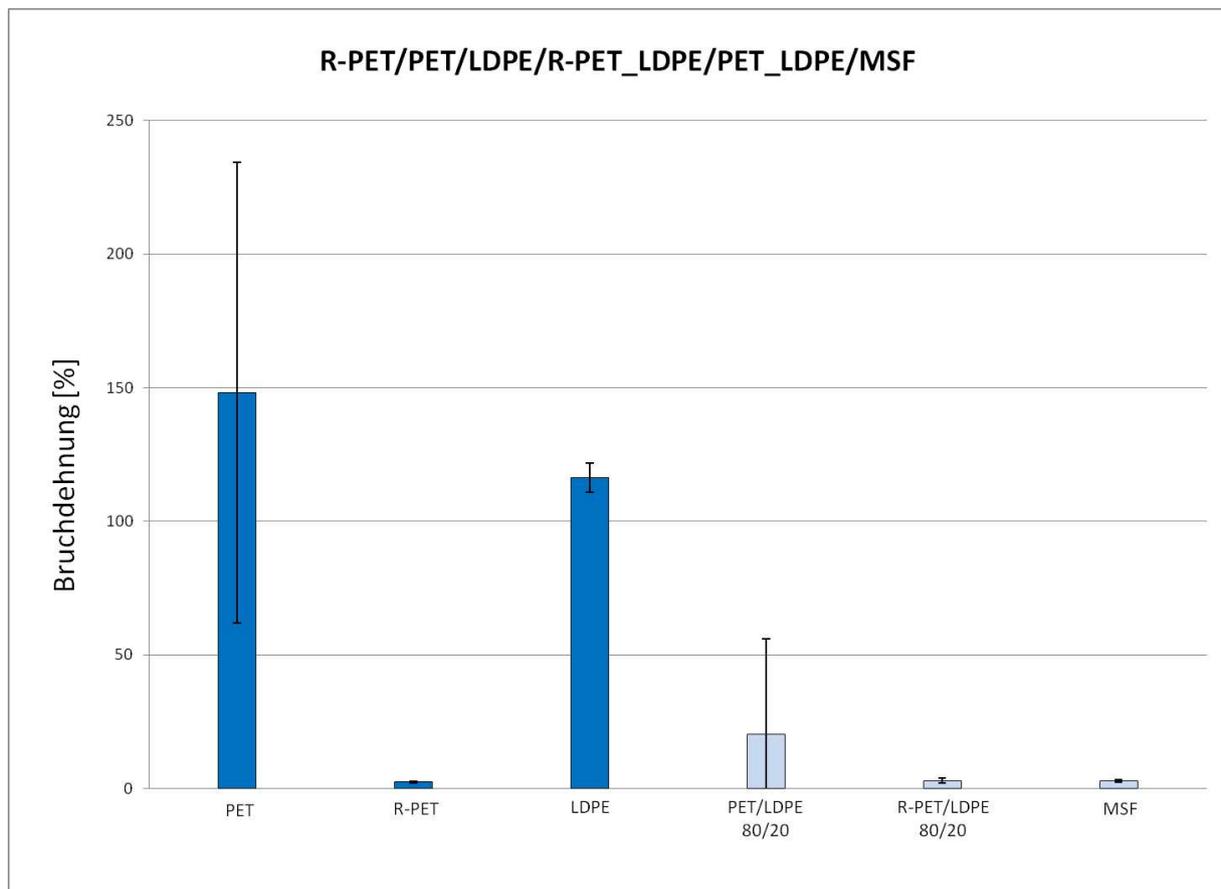


Abbildung 23: Bruchdehnung der reinen Komponenten und der Blends ohne Verträglichkeitsvermittler.

Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse der Blends mit Verträglichkeitsvermittler. Aufgrund der teils großen Abweichungen der einzelnen Ergebnisse untereinander, werden die Ergebnisse, die nicht deutlich erkennbar sind, durch eine gesonderte Skalierung nochmals dargestellt.

Von links beginnend werden die gemessenen Werte für **FG1901 G** aufgezeigt. Bei den Blends, welche aus reinem PET bestehen, konnte die Bruchdehnung auf 116% bzw. 165% gesteigert werden. Dies entspricht einer Versechsfachung- bzw. Verachtfachung. Da sich die Streuung in Grenzen hält, kann in diesem Fall von einer deutlichen Steigerung durch den Verträglichkeitsvermittler ausgegangen werden. Die Zugabe von FG1901 G zu den Blends, welche R-PET beinhalten, führte bei einer Dosierung von 2,5% zu einer Vervielfachung der gemittelten Bruchdehnung. Während die Zugabe von 5% zu einer

Verdreifachung führte. Dennoch kann aufgrund der enormen Streuung, welche fast 100% beträgt, keine verlässliche Aussage über den Einfluss des Verträglichkeitsvermittlers gemacht werden. Bei den Mehrschichtfolien konnte durch das Beifügen von 2,5% FG1901 G eine Bruchdehnung von 100% ermittelt werden. Im Vergleich zu der Mehrschichtfolie ohne Verträglichkeitsvermittler, entspricht dies einer Bruchdehnung die fünfzig mal so groß ist. Zwar ist auch bei diesen Proben eine breitere Streuung von 46% aufgetreten. Trotzdem konnte mit diesem Verträglichkeitsvermittler eine Vervielfachung erreicht werden. Interessanterweise konnte durch die Zugabe von 5% FG1901 G keine Veränderung erzielt werden.

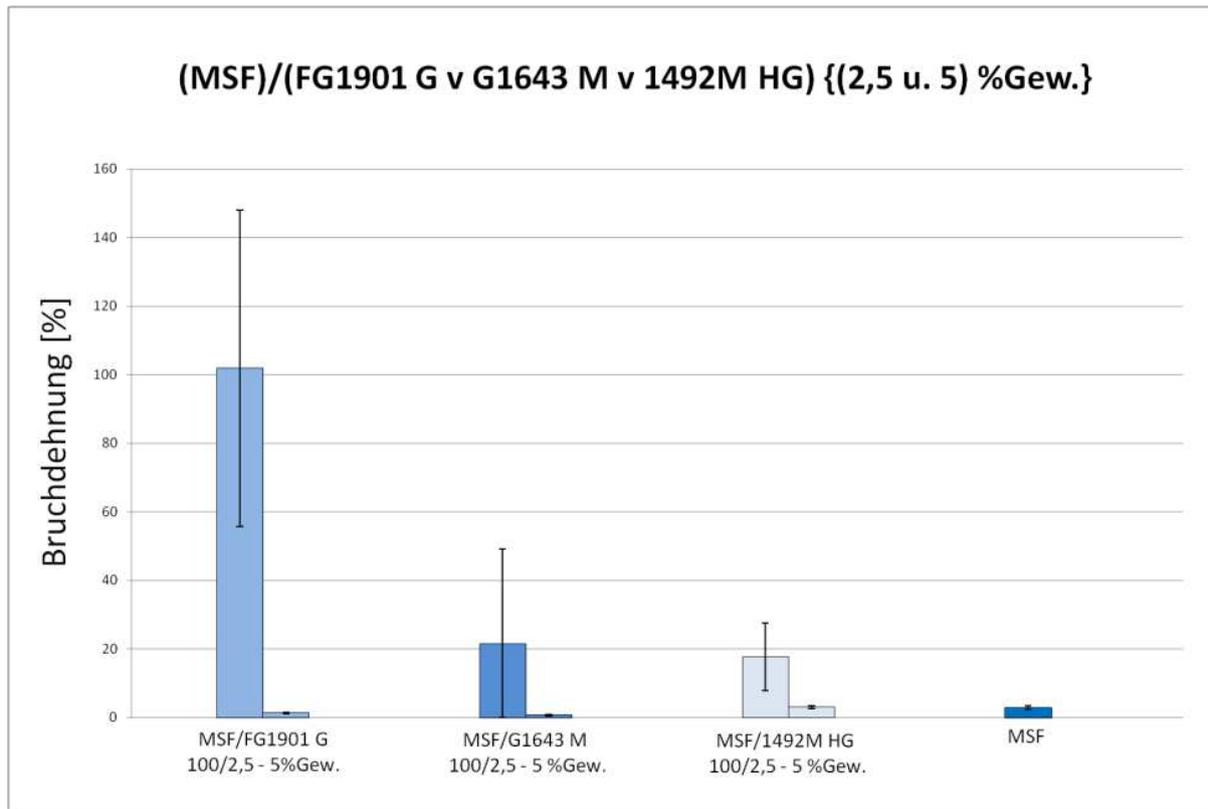


Abbildung 24: Bruchdehnung der Mehrschichtfolie mit und ohne Verträglichkeitsvermittler.

Der Verträglichkeitsvermittler **G1643 M** führte bei den Blends, welche aus reinem PET bestehen, zu einer Bruchdehnung von beinahe 120%. Die Streuung bei einer Dosierung von 2,5% betrug 32%. Dies entspricht der halben Streuung bei einer Dosierung von 5%. Bei den Blends welche aus R-PET bestehen, konnte bei einer Dosierung von 2,5% G1643 M eine Reduzierung der Bruchdehnung auf 1% beobachtet werden. Im Gegensatz zu einer Dosierung von 5%, welche einen gemittelten Wert von 11% aufwies. Auf Basis der breiten Streuung können keine verlässlichen Aussagen getroffen werden. Bei den Mehrschichtfolien konnte ein umgekehrtes Verhalten beobachtet werden. Während eine Dosierung von 2,5% zu einer gemittelten Bruchdehnung von 21% führte, konnte durch eine Dosierung von 5% eine gemittelte Bruchdehnung von 0,7% gemessen werden. Bei diesem Probensatz überstieg die Streuung die gemittelten Werte. Dadurch sind keine genaueren Schlussfolgerungen über das Wirken von G1643 M bei Mehrschichtfolien möglich.

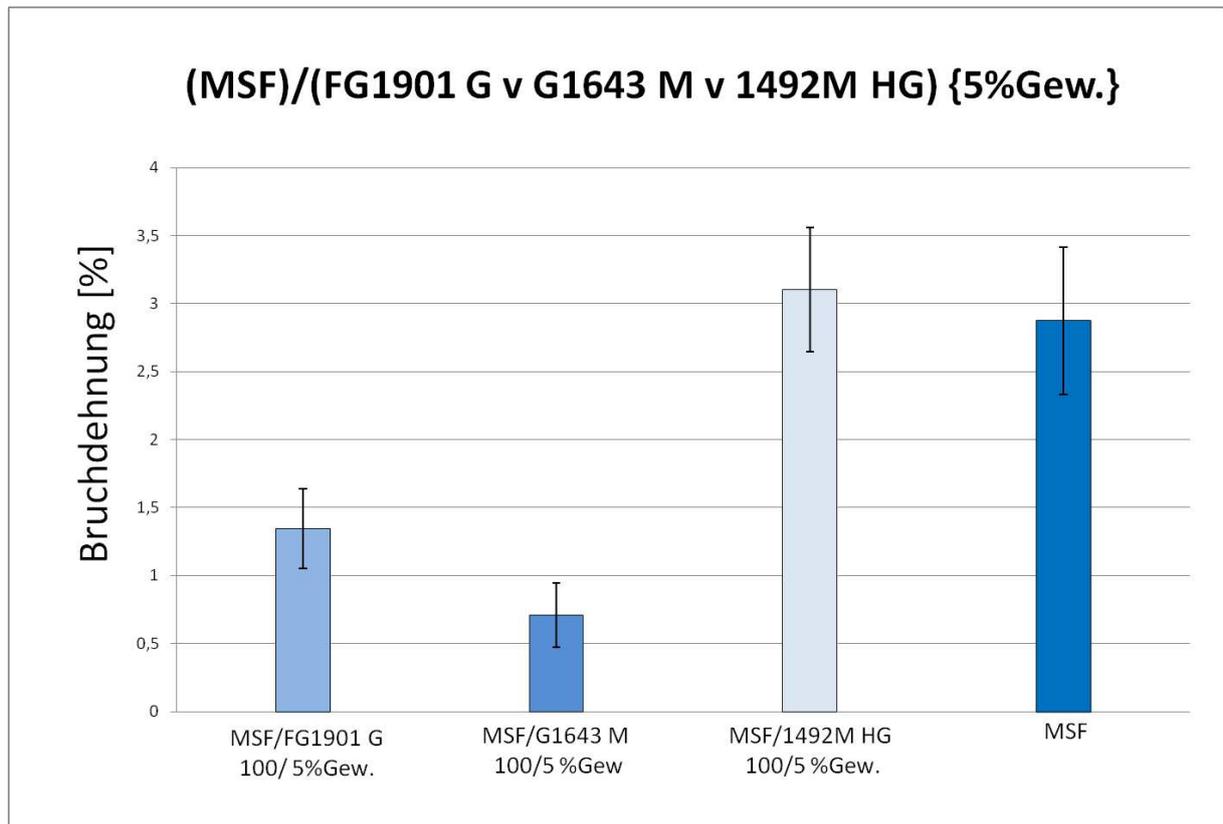


Abbildung 25: Bruchdehnung der Mehrschichtfolie mit und ohne Verträglichkeitsvermittler.

Bei den Blends, welche aus reinem PET bestehen, konnte durch die Zugabe von 2,5% **1492M HG** eine gemittelte Bruchdehnung von 350% gemessen werden. Bei einem Einsatz von 5% 1492M HG wurde eine gemittelte Bruchdehnung von 300% ermittelt. In beiden Fällen entspricht die Streuung in etwa einem Drittel des arithmetischen Mittelwertes. Bei den Blends, welche R-PET beinhalten, zeigte sich bei einer Dosierung von 2,5% 1492M HG eine Bruchdehnung die zehnmal so hoch ist, wie jene ohne Verträglichkeitsvermittler. Dennoch wurde auch eine Streuung, welche größer als der arithmetischen Mittelwertes ist, ermittelt. Bei einer Dosierung von 5% konnte keine Veränderung festgestellt werden. Bei den Mehrschichtfolien konnte ein ähnliches Verhalten beobachtet werden. Durch Beifügen von 2,5% 1492M HG konnte eine Verzehnfachung der Bruchdehnung bewerkstelligt werden. Wobei die Streuung der Hälfte des arithmetischen Mittelwertes entsprach. Trotz der breiten Streuung kann von einer deutlichen Steigerung durch die Zugabe von 1492M HG gesprochen werden. Jedoch konnte durch die Zugabe von 5% 1492M HG kein ähnliches Ergebnis erzielt werden. Im Gegenteil, bei einer Dosierung von 5%, konnte keine Veränderung festgestellt werden.

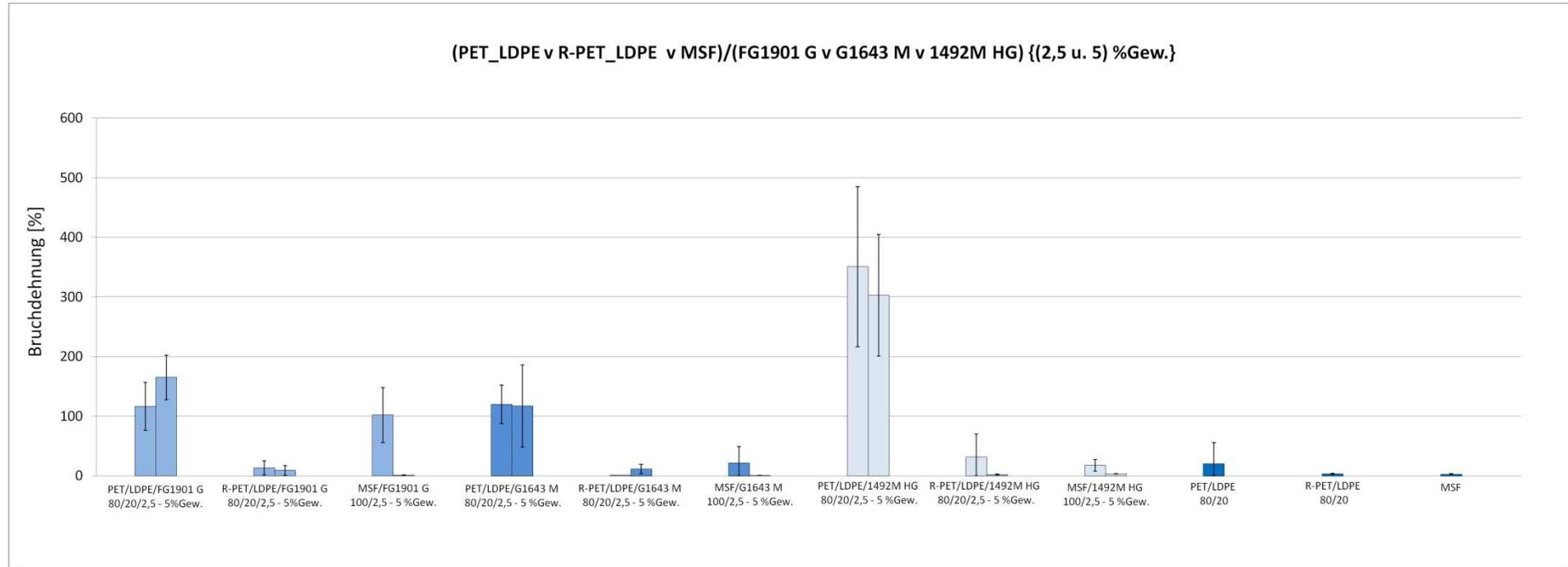


Abbildung 26: Bruchdehnung der Blends, mit und ohne Verträglichkeitsvermittler.

Bei einigen Ergebnissen ist eine sehr breite Streuung aufgetreten. Teilweise sind diese Streuungen so groß, dass keine verlässliche Aussage mehr möglich ist. Der Verträglichkeitsvermittler wurde als Granulat, in einer Menge die verhältnismäßig sehr gering war, beigelegt. Um eine bessere Verteilung des Verträglichkeitsvermittlers zu ermöglichen, wurde dieser in gemahlener Form beigelegt. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse gegenübergestellt, welche den Verträglichkeitsvermittler als Granulat bzw. in gemahlener Form beinhalten. Dieser Versuch wurde nur mit dem Verträglichkeitsvermittler FG1901 G bei einer Konzentration von 2,5% durchgeführt.

Zuerst werden die Ergebnisse bezüglich der Schlagzugzähigkeit präsentiert. Dabei wurde der Verträglichkeitsvermittler FG1901 G einmal als Granulat und einmal in gemahlener Form beigelegt. Die Dosierung betrug bei allen Proben 2,5%. Zum Vergleich wurden die Blends der Mehrschichtfolien und die Blends, welche das R-PET beinhalten, herangezogen.

In Abbildung 27 werden die Ergebnisse bezüglich der Schlagzugzähigkeit aufgezeigt. Der linke Balken repräsentiert jenes Blend, welches den Verträglichkeitsvermittler als Granulat beinhaltet. Während der rechte Balken den gemahlene Verträglichkeitsvermittler beinhaltet. Bei den Mehrschichtfolien konnte keine Veränderung durch den gemahlene Verträglichkeitsvermittler festgestellt werden. Lediglich die Streuung konnte etwas verringert werden. Bei den Blends, welche das R-PET beinhalten, kann ein anderes Verhalten beobachtet werden. Hier führte der gemahlene Verträglichkeitsvermittler zu einer leichten Verringerung des arithmetischen Mittelwertes auf 9 MPa. Bei der Streuung konnte keine Veränderung festgestellt werden, welche verhältnismäßig gering ist.

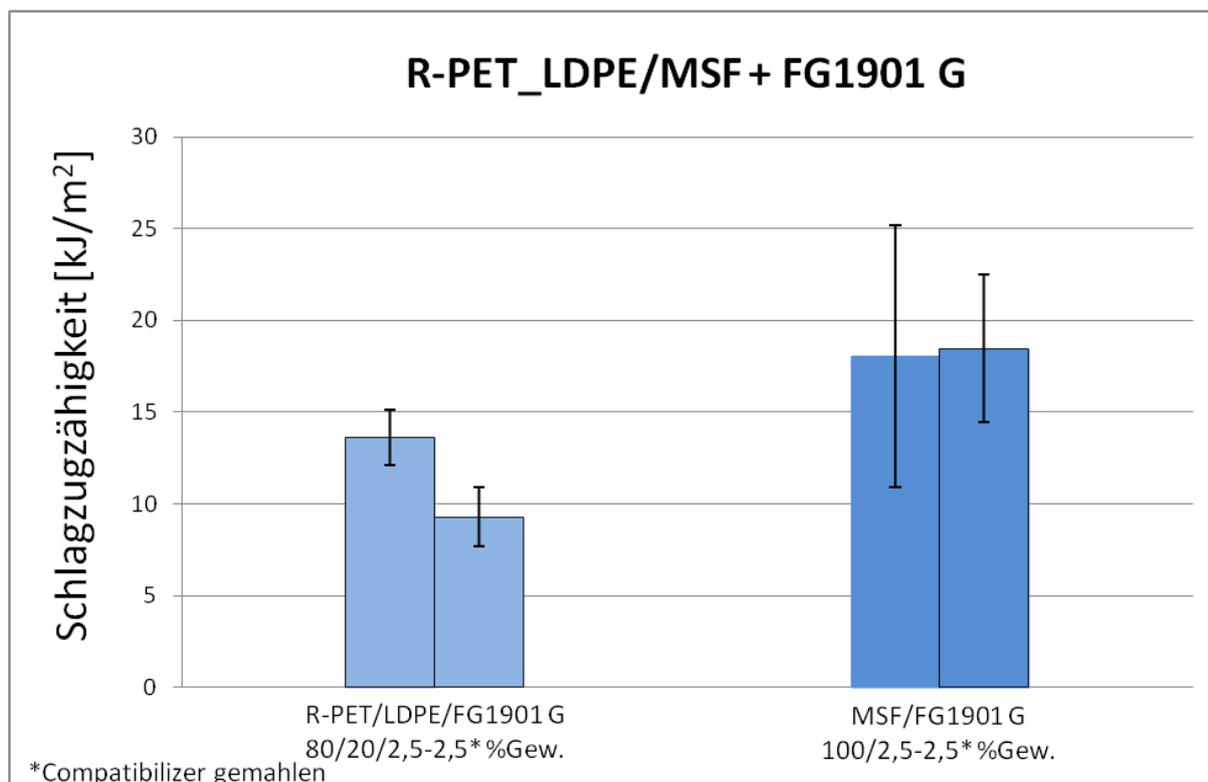


Abbildung 27: Schlagzugzähigkeit der Blends mit dem Verträglichkeitsvermittler FG1901 G.

Die Ergebnisse bezüglich des E-Moduls werden in Abbildung 28 aufgezeigt. Während bei den Mehrschichtfolien eine leichte Steigerung des arithmetischen Mittelwertes zu erkennen ist, kann bei den Blends aus R-PET eine leichte Verringerung des arithmetischen Mittelwertes beobachtet werden. Die Streuung verringert sich leicht durch den Einsatz des gemahlene Verträglichkeitsvermittlers. Dennoch kann beim E-Modul zwischen den verschiedenen Formen kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

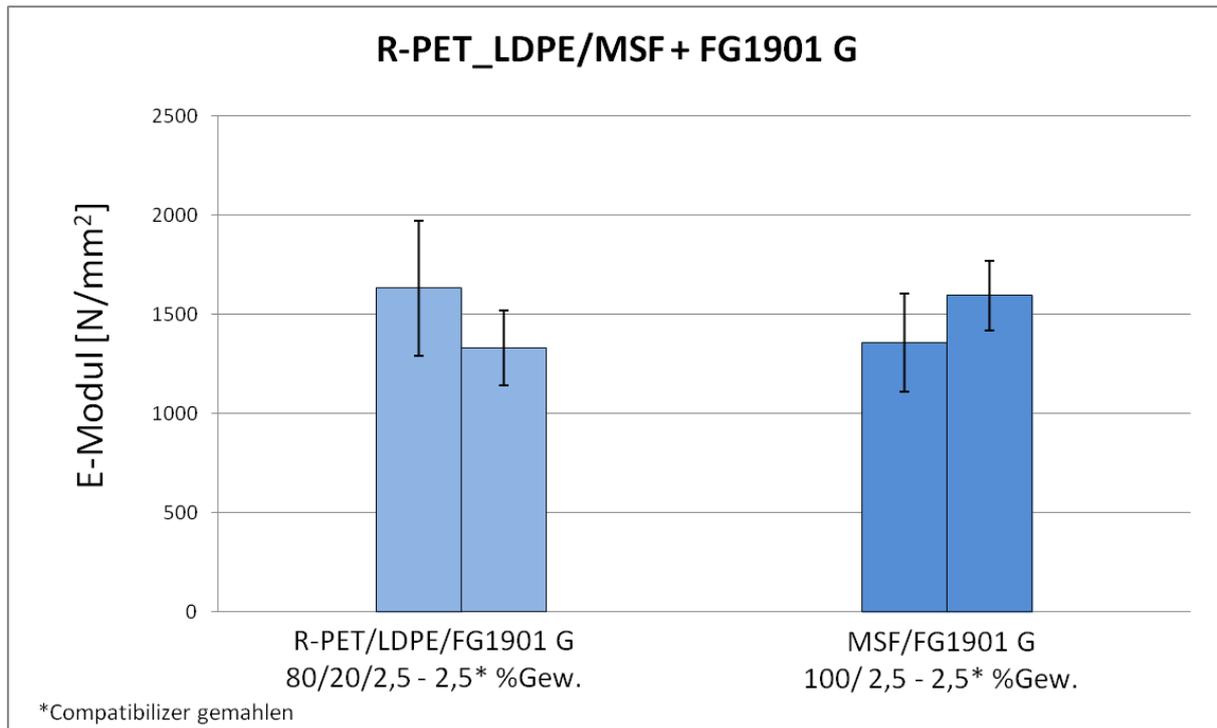


Abbildung 28: E-Modul der Blends mit dem Verträglichkeitsvermittler FG1901 G.

In Abbildung 29 können die Auswertungen bezüglich der Zugfestigkeit abgelesen werden. Bei den Mehrschichtfolien führte der gemahlene Verträglichkeitsvermittler zu einer breiteren Streuung und zu einer leichten Verringerung des arithmetischen Mittelwertes. Bei den Blends, welche das R-PET beinhalten, konnte ein umgekehrtes Verhalten beobachtet werden. Die Streuung konnte durch den Einsatz des gemahlene Verträglichkeitsvermittlers verringert werden, während der arithmetische Mittelwert leicht stieg. Auch hier können keine signifikanten Veränderungen festgestellt werden.

Die Ergebnisse der Bruchdehnung zeigten im Vergleich zu den vorhergehenden Ergebnissen deutliche Unterschiede. In Abbildung 30 werden die zugehörigen Werte grafisch dargestellt. Bei den Blends,

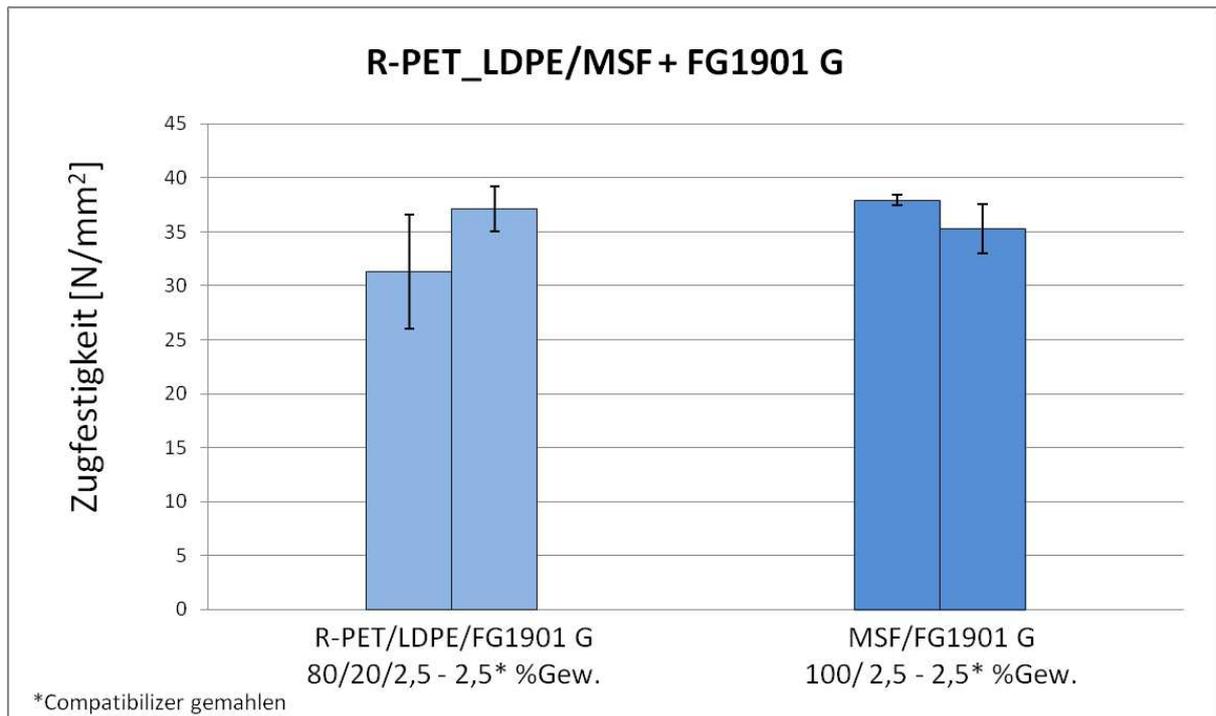


Abbildung 29: Zugfestigkeit der Blends mit dem Verträglichkeitsvermittler FG1901 G.

welche das R-PET

beinhalten, konnte die gemittelte Bruchdehnung beinahe verfünffacht werden. Obwohl auch bei dem gemahlene Verträglichkeitsvermittler eine breite Streuung auftritt, konnte diese verhältnismäßig reduziert werden. Bei den Mehrschichtfolien hat sich der arithmetische Mittelwert stark verringert.

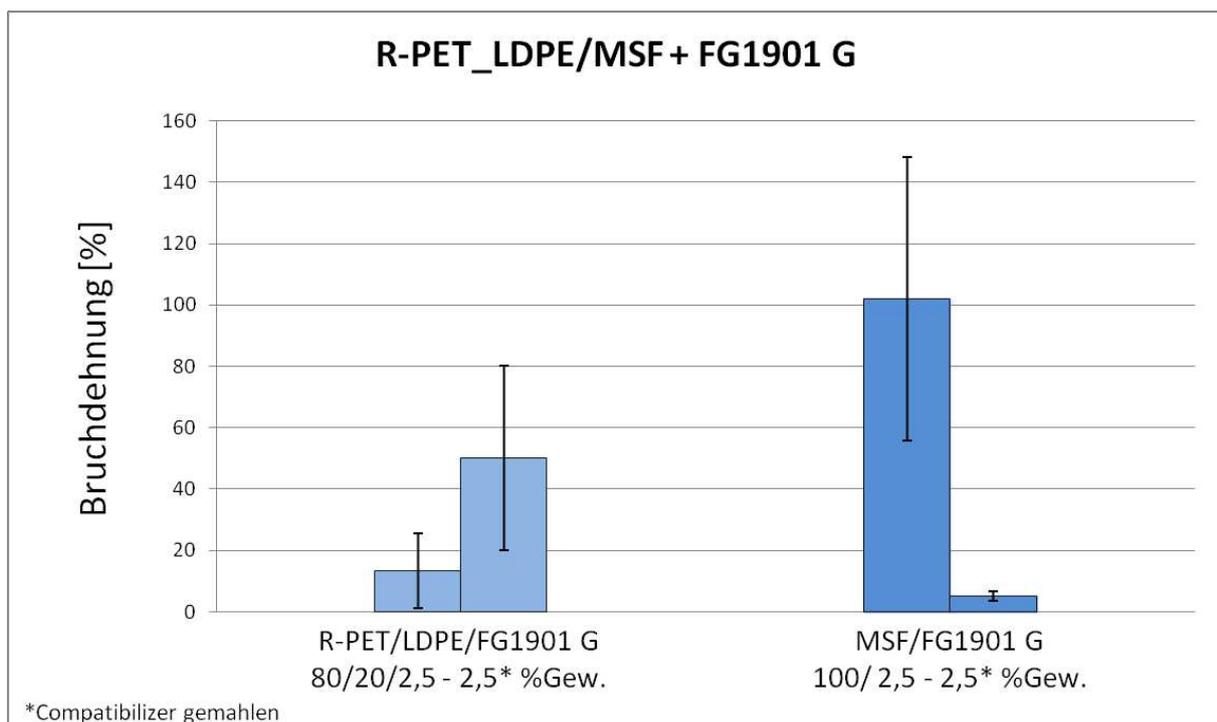


Abbildung 30: Bruchdehnung der Blends mit dem Verträglichkeitsvermittler FG1901 G.

Die Streuung ist verhältnismäßig gleich geblieben. Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse bzgl. der mechanischen Eigenschaften präsentiert. Diese wurden in vier übersichtliche Tabellen unterteilt. Dabei wurden die Werte auf ganze Zahlen aufgerundet, sofern diese größer eins sind. Die Werte, welche kleiner eins sind, wurden auf die zweite Kommastelle gerundet. In Tabelle 5 und 6 sind die einzelnen Komponenten und die Blends aufgelistet. Es werden der arithmetische Mittelwert der einzelnen Ergebnisse sowie dessen Standardabweichung angegeben. Weiter wird in Tabelle 7 die Auswertung jener Blends präsentiert, welche den gemahlten Verträglichkeitsvermittler beinhalten. Zusätzlich wurden die Ergebnisse jener Probensätze nochmals aufgelistet, welche den Verträglichkeitsvermittler in Form eines Granulates hinzugefügt bekommen haben. In Tabelle 8 werden die Proben aus den verschiedenen Verfahren verglichen. Einmal die Proben, welche gepresst wurden, und einmal jene Proben, welche mit Spritzguss gefertigt wurden.

Tabelle 5: Mechanische Eigenschaften der einzelnen Komponenten und der Blends (Teil 1).

Material	Zusammensetzung	Schlagzugzähigkeit		E-Modul [N/mm ²]		Zugfestigkeit [N/mm ²]		Bruchdehnung [%]	
		[kJ/m ²]							
	In Prozent [%]	Arithmetisches Mittel	SD	Arithmetisches Mittel	SD	Arithmetisches Mittel	SD	Arithmetisches Mittel	SD
PET	100	24	±3	2877	±557	58	±2,5	148	±86
R-PET	100	13	±0,33	2507	±226	55	±3	2	±0,26
LDPE	100	100	±5	268	±13	12	±0,41	116	±5
PET/LDPE	80/20	12	±3	1805	±219	39	±2	20	±35
R-PET/LDPE	80/20	7	±2	1403	±276	35	±7	3	±0,97
MSF	100	27	±4	1686	±302	36	±2	3	±0,54
PET/LDPE/FG1901 G	80/20 + 2,5% Gew.	47	±11	1814	±339	38	±0,74	116	±40
PET/LDPE/FG1901 G	80/20 + 5% Gew.	66	±11	1517	±243	34	±0,42	165	±37
R-PET/LDPE/FG1901 G	80/20 + 2,5% Gew.	14	±2	1632	±341	31	±5	13	±12
R-PET/LDPE/FG1901 G	80/20 + 5% Gew.	9	±2	1730	±201	30	±2	9	±8
MSF/FG1901 G	100 + 2,5% Gew.	18	±7	1358	±246	38	±0,49	102	±46
MSF/FG1901 G	100 + 5% Gew.	8	±2	1461	±119	18	±3	1	±0,29

Tabelle 6: Mechanische Eigenschaften der Blends (Teil 2).

Material	Zusammensetzung	Schlagzugzähigkeit		E-Modul [N/mm ²]		Zugfestigkeit [N/mm ²]		Bruchdehnung [%]	
		[kJ/m ²]							
	In Prozent [%]	Arithmetisches Mittel	SD	Arithmetisches Mittel	SD	Arithmetisches Mittel	SD	Arithmetisches Mittel	SD
PET/LDPE/G1643 M	80/20 + 2,5% Gew.	43	±6	1422	±139	38	±1	120	±32
PET/LDPE/G1643 M	80/20 + 5% Gew.	43	±11	1522	±333	36	±1	117	±69
R-PET/LDPE/G1643 M	80/20 + 2,5% Gew.	9	±2	1709	±564	14	±4	0,96	±0,24
R-PET/LDPE/G1643 M	80/20 + 5% Gew.	8	±2	1586	±181	32	±1	11	±8
MSF/G1643 M	100 + 2,5% Gew.	9	±1	1628	±52	34	±1	22	±28
MSF/G1643 M	100 + 5% Gew.	22	±17	1675	±193	11	±4	0,71	±0,23
PET/LDPE/1492M HG	80/20 + 2,5% Gew.	59	±7	1567	±429	37	±0,65	351	±134
PET/LDPE/1492M HG	80/20 + 5% Gew.	71	±15	1522	±333	37	±0,59	303	±102
R-PET/LDPE/1492M HG	80/20 + 2,5% Gew.	11	±2	1543	±170	35	±7	32	±38
R-PET/LDPE/1492M HG	80/20 + 5% Gew.	11	±4	1502	±136	25	±5	2	±0,77
MSF/1492M HG	100 + 2,5% Gew.	16	±5	1686	±302	36	±1	18	±10
MSF/1492M HG	100 + 5% Gew.	23	±5	1605	±379	33	±4	3	±0,46

Tabelle 7: Blends mit gemahlenem Verträglichkeitsvermittler.

Material	Zusammensetzung	Schlagzugzähigkeit [kJ/m ²]		E-Modul [N/mm ²]		Zugfestigkeit [N/mm ²]		Bruchdehnung [%]	
		In Prozent [%]	Arithmetisches Mittel	SD	Arithmetisches Mittel	SD	Arithmetisches Mittel	SD	Arithmetisches Mittel
R-PET/LDPE/FG1901 G	80/20 + 2,5% Gew.	14	±2	1632	±341	31	±5	13	±12
R-PET/LDPE/FG1901 G³	80/20 + 2,5% Gew.*	9	±2	1330	±191	37	±2	50	±30
MSF/FG1901 G	100 + 2,5% Gew.	18	±7	1358	±246	38	±0,4	102	±46
MSF/FG1901 G³	100 + 2,5% Gew.*	18	±4	1594	±177	35	±2	5	±2

Tabelle 8: Vergleich der gepressten Proben und der Spritzgussproben.

Material	Zusammensetzung	Schlagzugzähigkeit [kJ/m ²]		E-Modul [N/mm ²]		Zugfestigkeit [N/mm ²]		Bruchdehnung [%]	
		In Prozent [%]	Arithmetisches Mittel	SD	Arithmetisches Mittel	SD	Arithmetisches Mittel	SD	Arithmetisches Mittel
LDPE⁴	100	97	±6	313	±19	11	±0,9	551	±124
LDPE	100	100	±5	268	±13	12	±0,4	116	±5

³ gemahlener Verträglichkeitsvermittler⁴ gepresste Proben

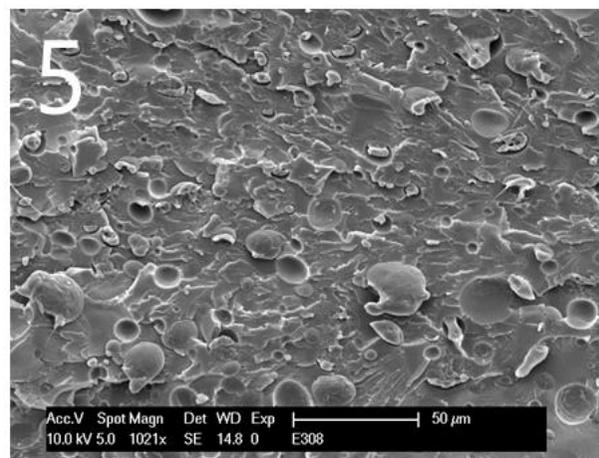
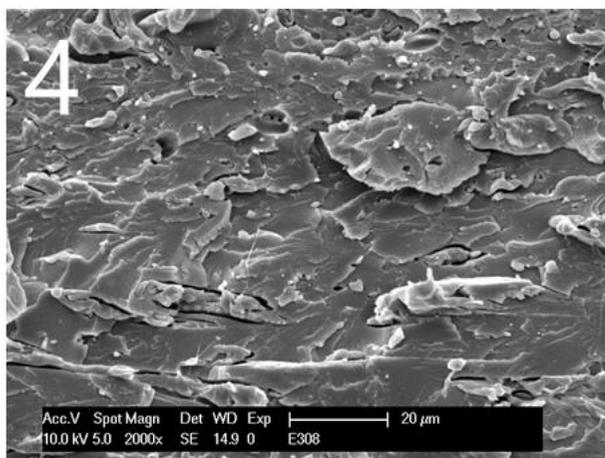
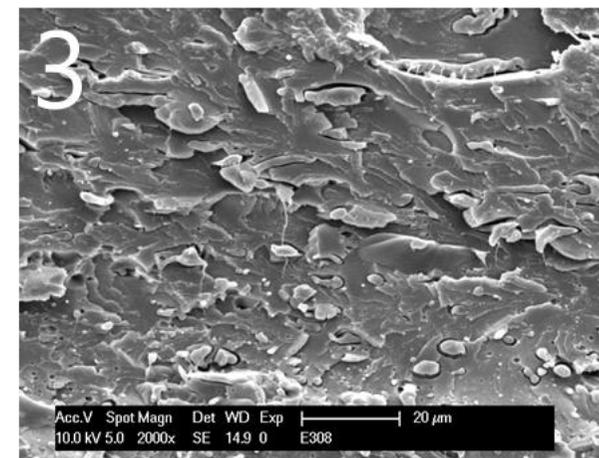
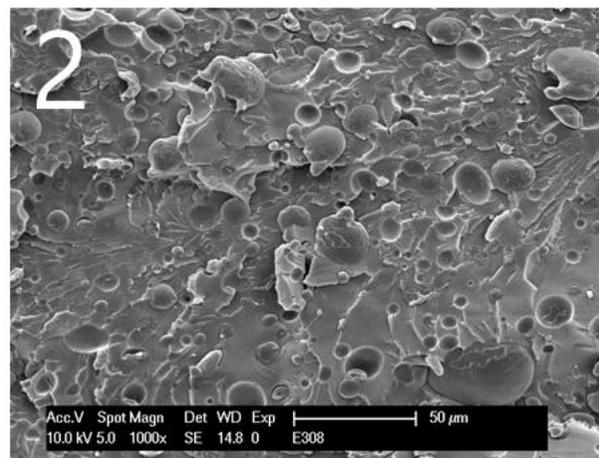
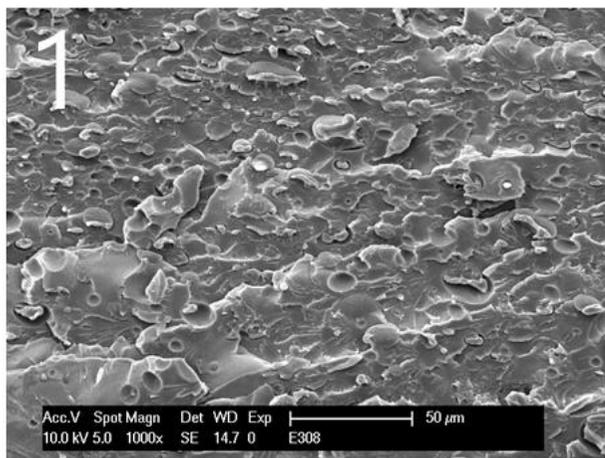
Auswertung Rasterelektronenmikroskop

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie präsentiert. Zuerst werden die Bruchoberflächen der Schlagzugproben aufgezeigt. Die ausgewählten Schlagzugproben sowie deren Zusammensetzung werden in Tabelle 9 dargestellt. Zudem wurde zu allen Bildersätzen eine Skizze gefertigt, welche den ungefähren Ort, wo das Bild am Probenquerschnitt aufgenommen wurde, kennzeichnet. Dadurch können die Bilder mit den zugehörigen Oberflächenabschnitten in Verbindung gebracht werden. Aufgrund von größeren Unterschieden der Morphologie an verschiedenen Stellen einer Bruchfläche wurden zwischen fünf und elf Bilder gefertigt.

Tabelle 9: Ausgewählte Schlagzugproben

Bezeichnung	Blend	Zusammensetzung	Schlagzugzähigkeit [kJ/m ²]	Abb.
Nr. 28_3	R-PET/PE/FG1901 G	80/20 + 2,5% Gew.	15	Abb. 31
Nr. 28_5	R-PET/PE/FG1901 G	80/20 + 2,5% Gew.	11	Abb. 32
Nr. 42_1	MSF/ FG1901 G	100 + 2,5% Gew.	23	Abb. 33
Nr. 42_6	MSF/ FG1901 G	100 + 2,5% Gew.	7	Abb. 34
Nr. 48_2	MSF/ FG1901 G ⁵	100 + 2,5% Gew.*	26	Abb. 35 - 36
Nr. 49_9	R-PET/PE/FG1901 G ⁵	80/20 + 2,5% Gew.*	8	Abb. 37

⁵ beinhalten den gemahlten Verträglichkeitsvermittler



Probenquerschnitt inkl. Betrachtungspunkte

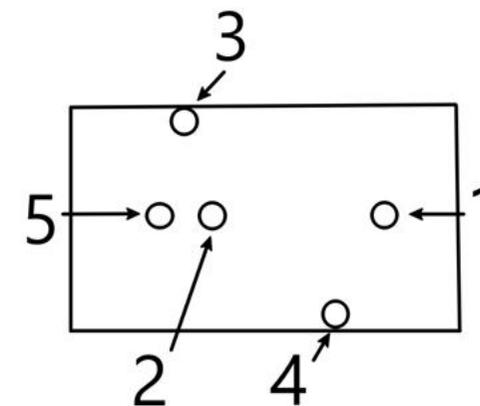


Abbildung 31: Schlagzugprobe Nr. 28_3

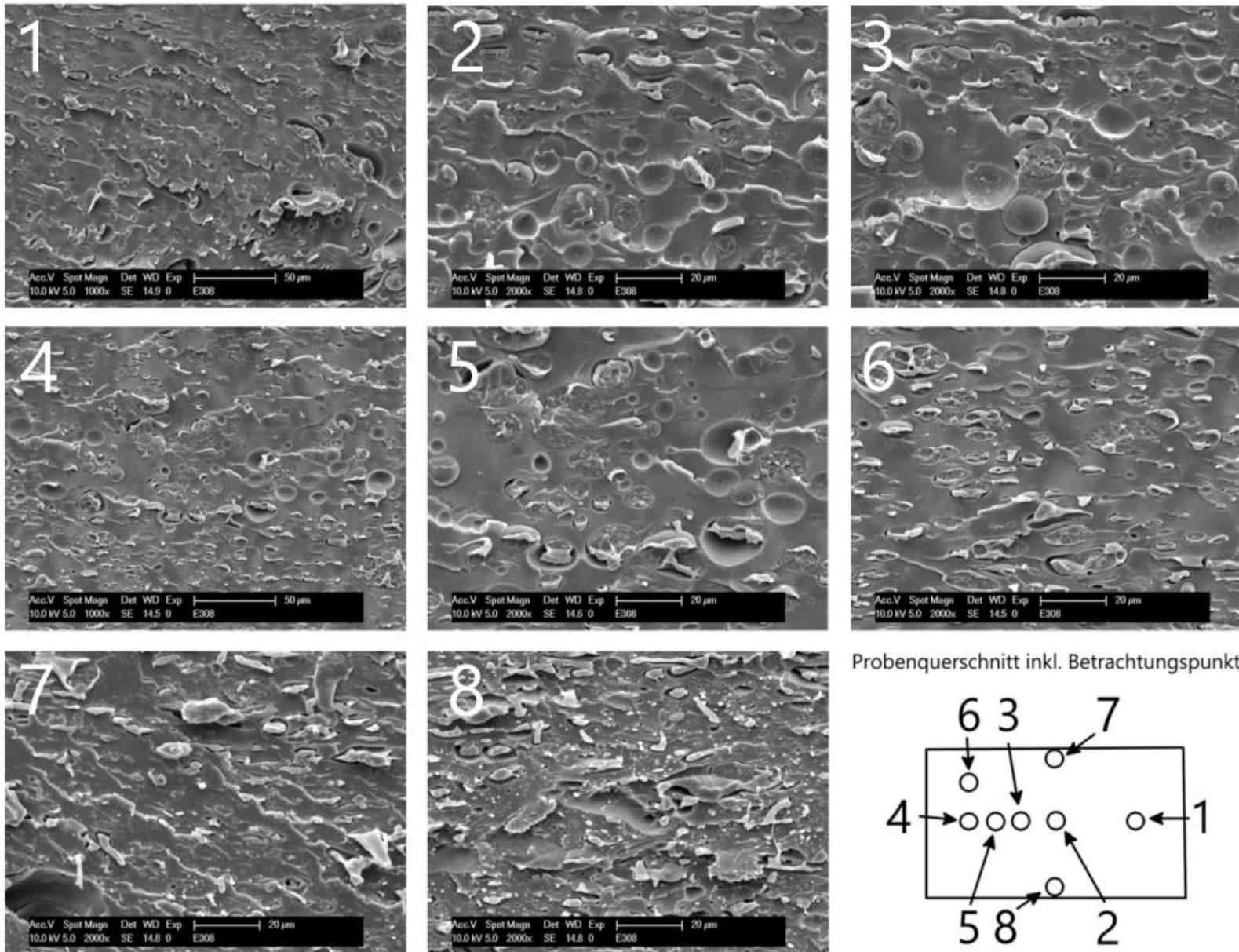
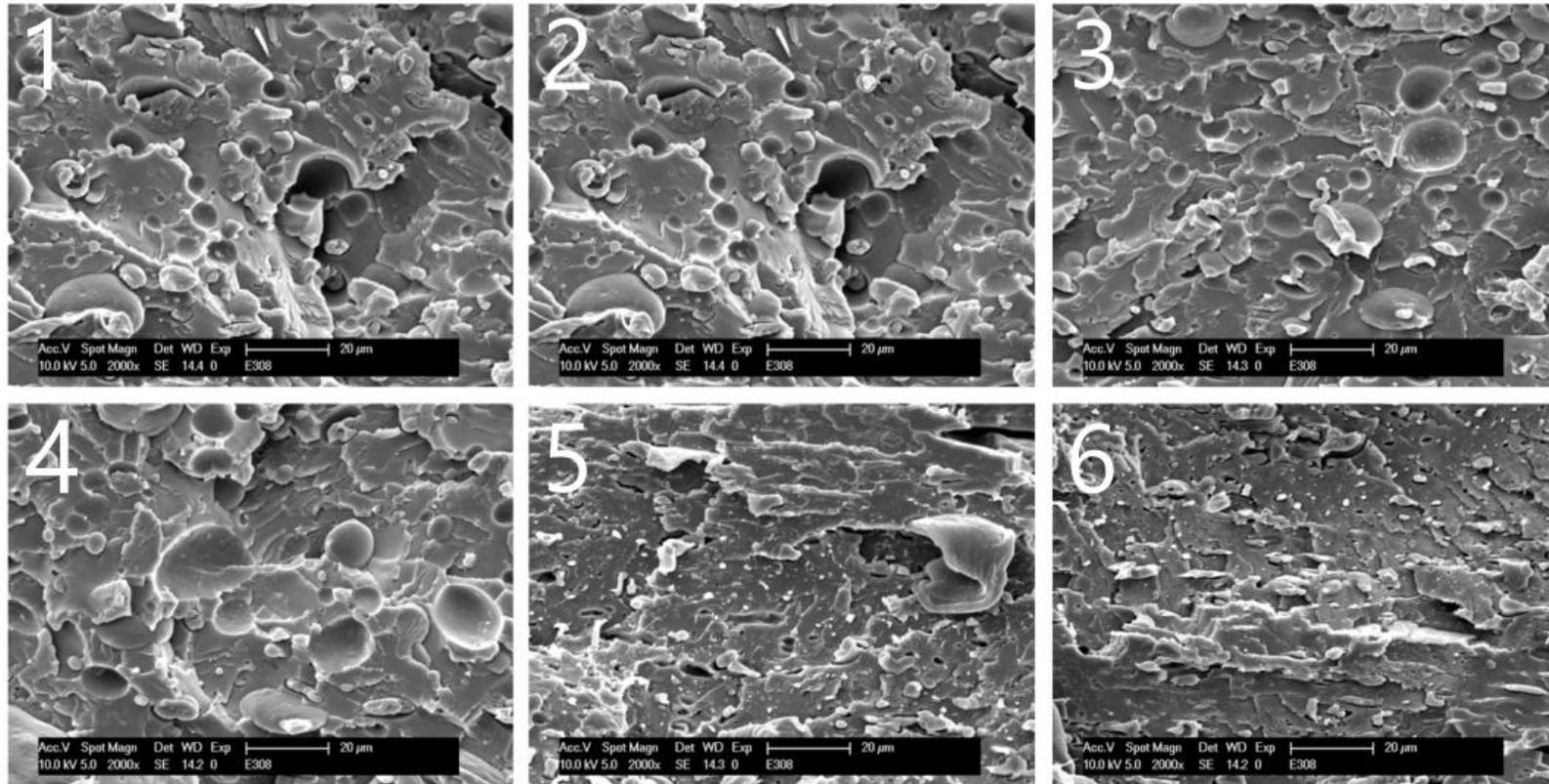


Abbildung 32: Schlagzugprobe Nr. 28_5



Probenquerschnitt inkl. Betrachtungspunkte

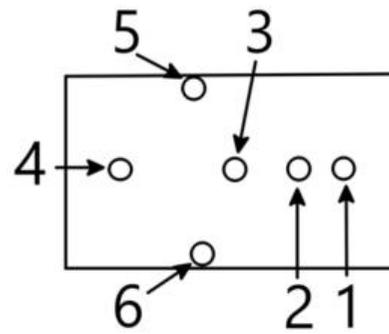
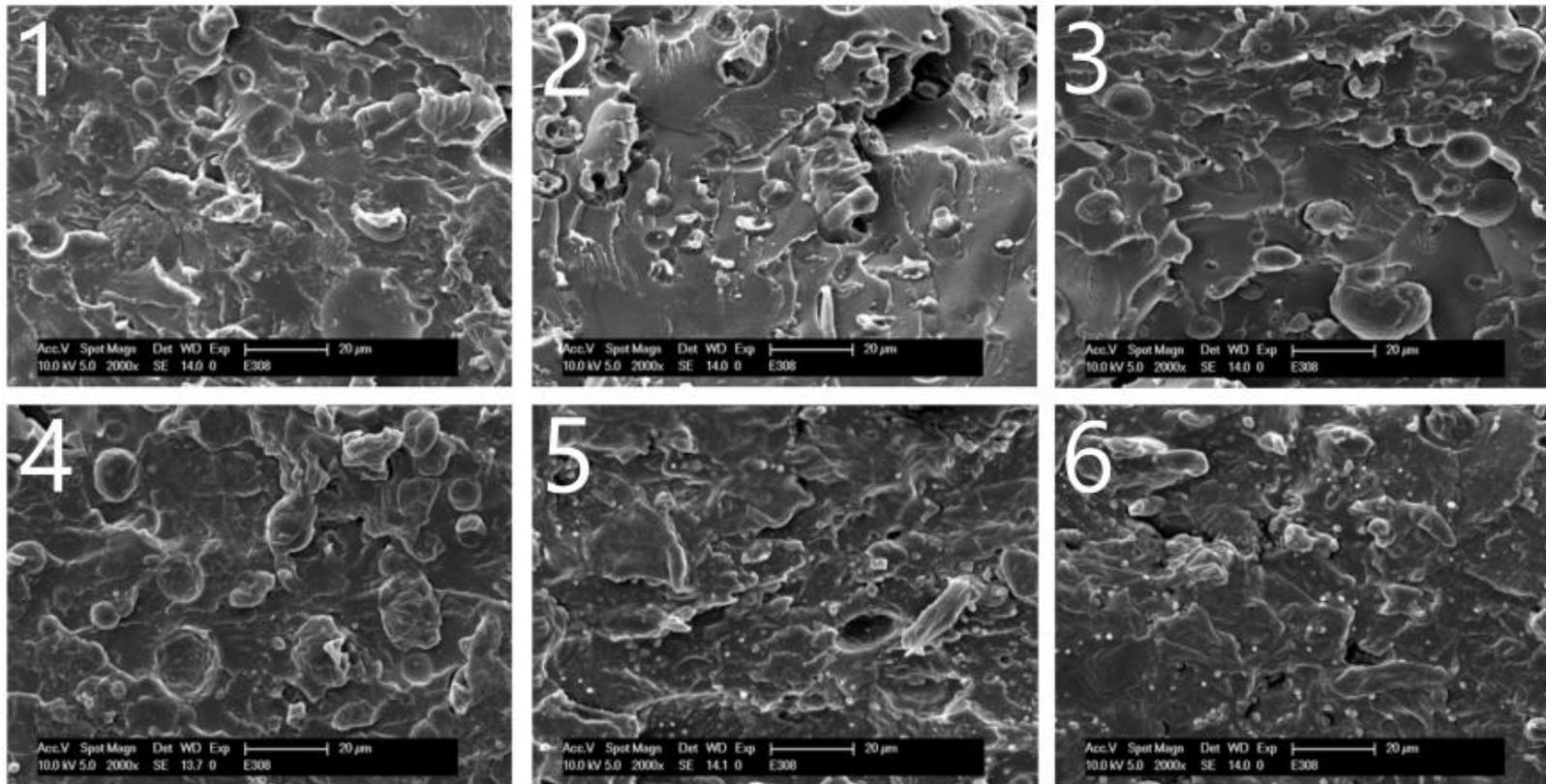


Abbildung 33: Schlagzugprobe Nr. 42_1



Probenquerschnitt inkl. Betrachtungspunkte

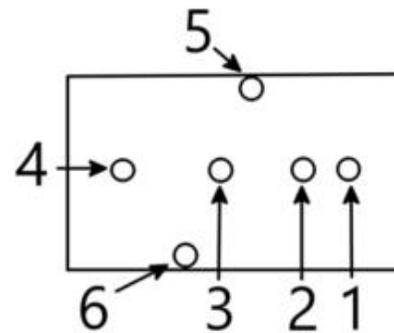


Abbildung 34: Schlagzugprobe Nr. 42_6

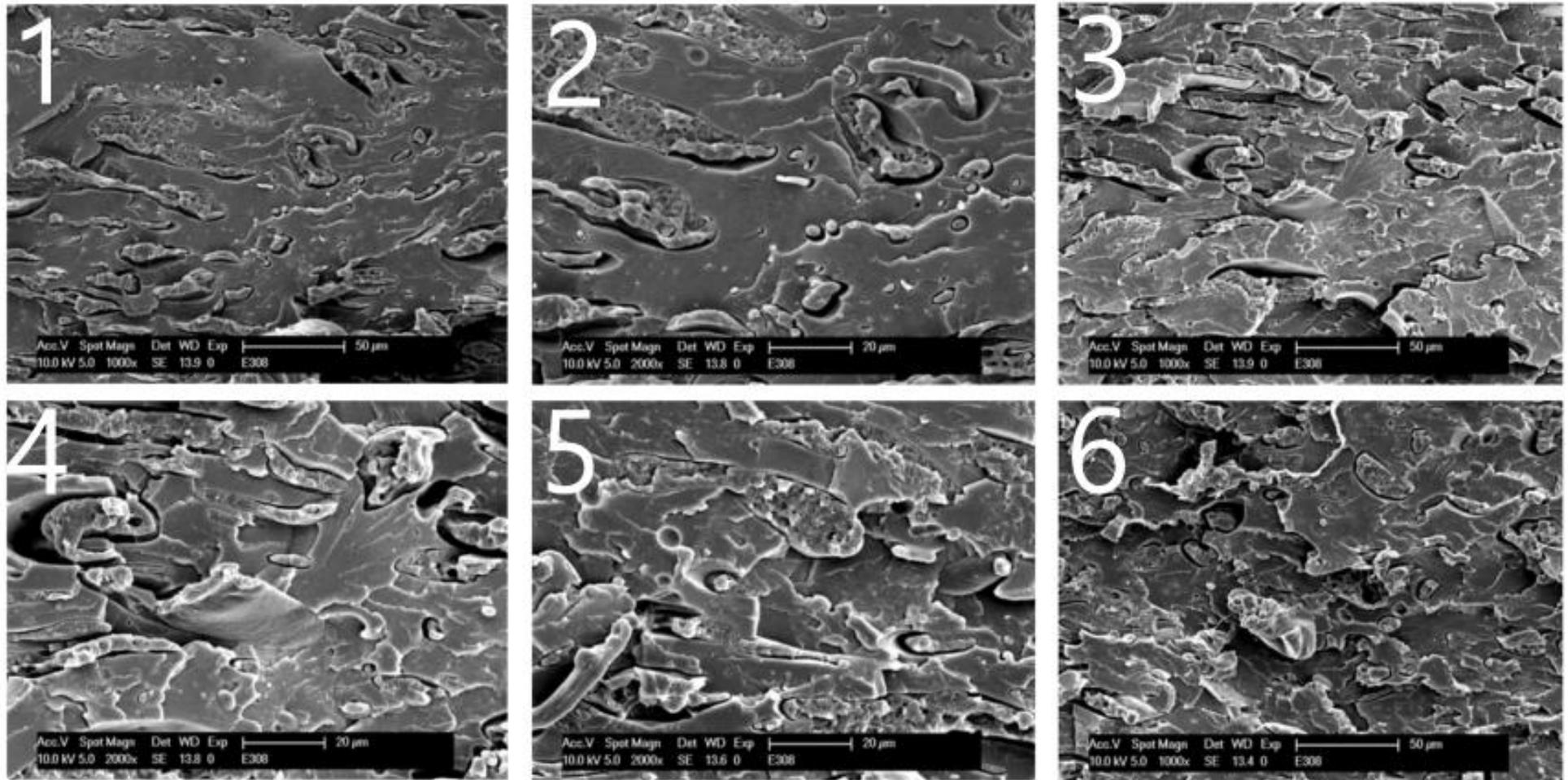


Abbildung 35: Schlagzugprobe Nr. 48_2 Teil 1

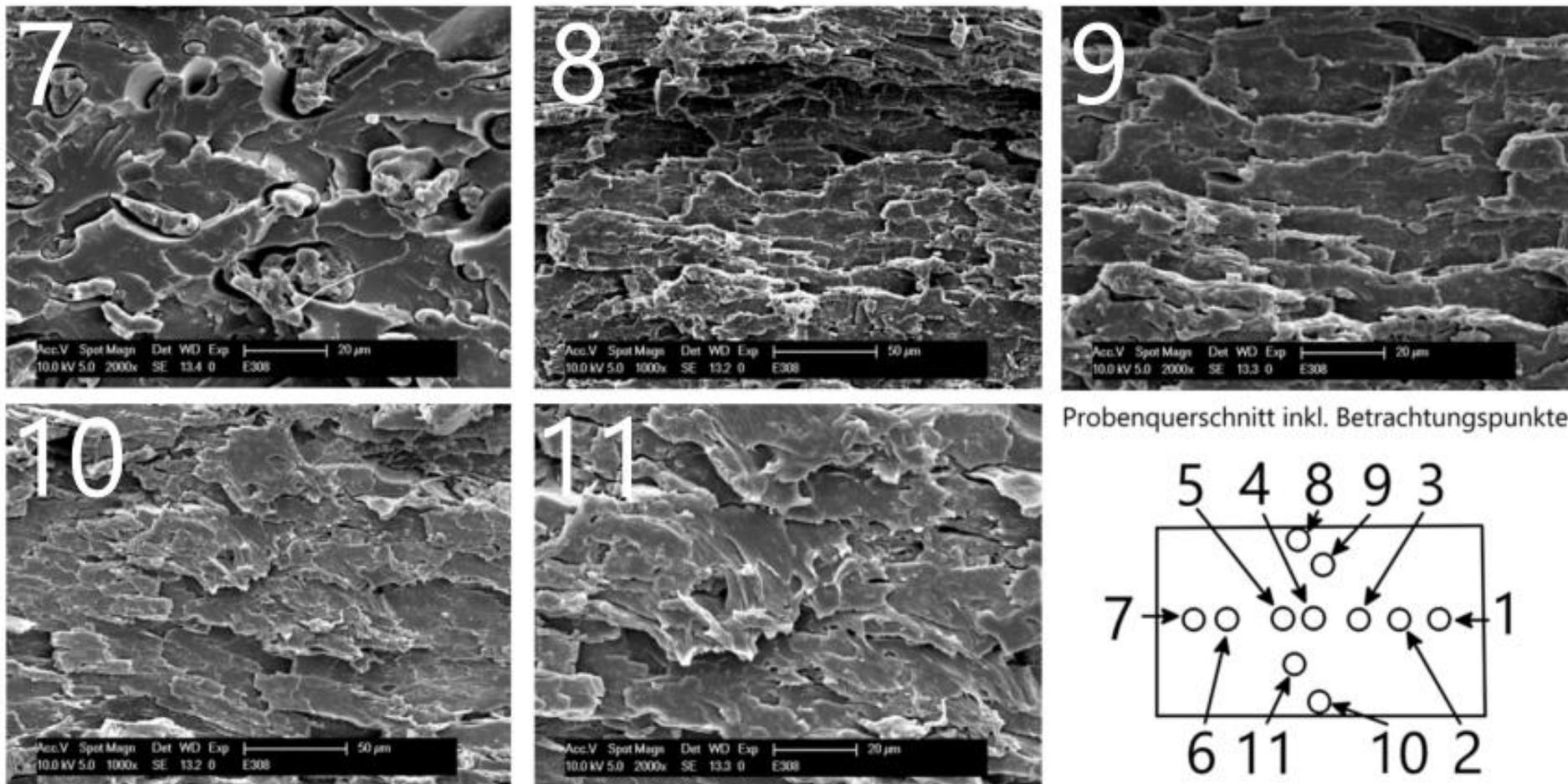
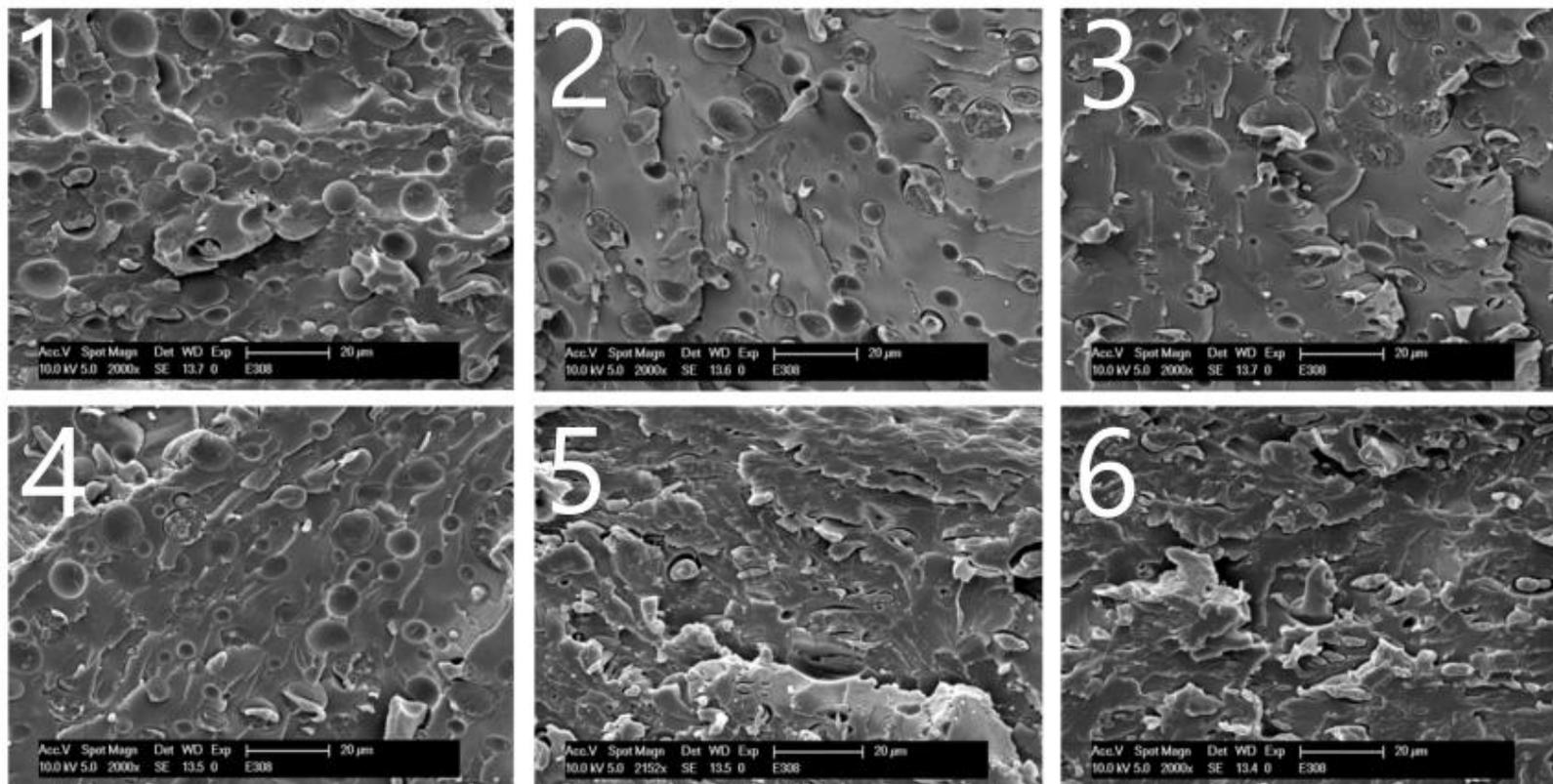


Abbildung 36: Schlagzugprobe Nr. 48_2 Teil 2



Probenquerschnitt inkl. Betrachtungspunkte

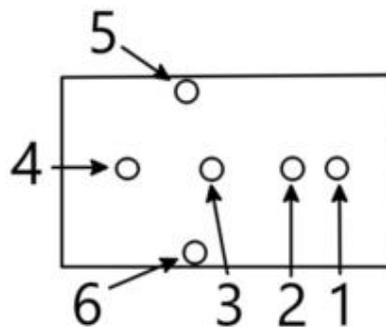


Abbildung 37: Schlagzugprobe Nr. 49_9

Differential Scanning Calorimetry

Im nächsten Abschnitt werden die Ergebnisse der Differential Scanning Calorimetry präsentiert. In Tabelle 10 sind die zugehörigen Schmelzbereiche der einzelnen Komponenten sowie der Mehrschichtfolie aufgelistet. In den Diagrammen – der DSC – wurden die Peaks des Endothermen Prozesses markiert. Dieser Peak zeigt jene Temperatur auf, bei der die meisten Kristalle zu schmelzen beginnen.

Tabelle 10: Schmelzbereiche der einzelnen Komponenten und der Mehrschichtfolie.

Probe	Komponente 1		Komponente 2	
	Material	Schmelzbereich	Material	Schmelzbereich
PET	PET	~ 240°C-255°C	-	-
R-PET	PET	~ 240°C-255°C	-	-
xR-PET	PET	~ 235°C-255°C	-	-
LDPE	LDPE	~ 100°C-120°C	-	-
Mehrschichtfolie	PET	~ 240°C-255°C	LDPE	~ 100°C-120°C

Sample: PET(virgin)_1

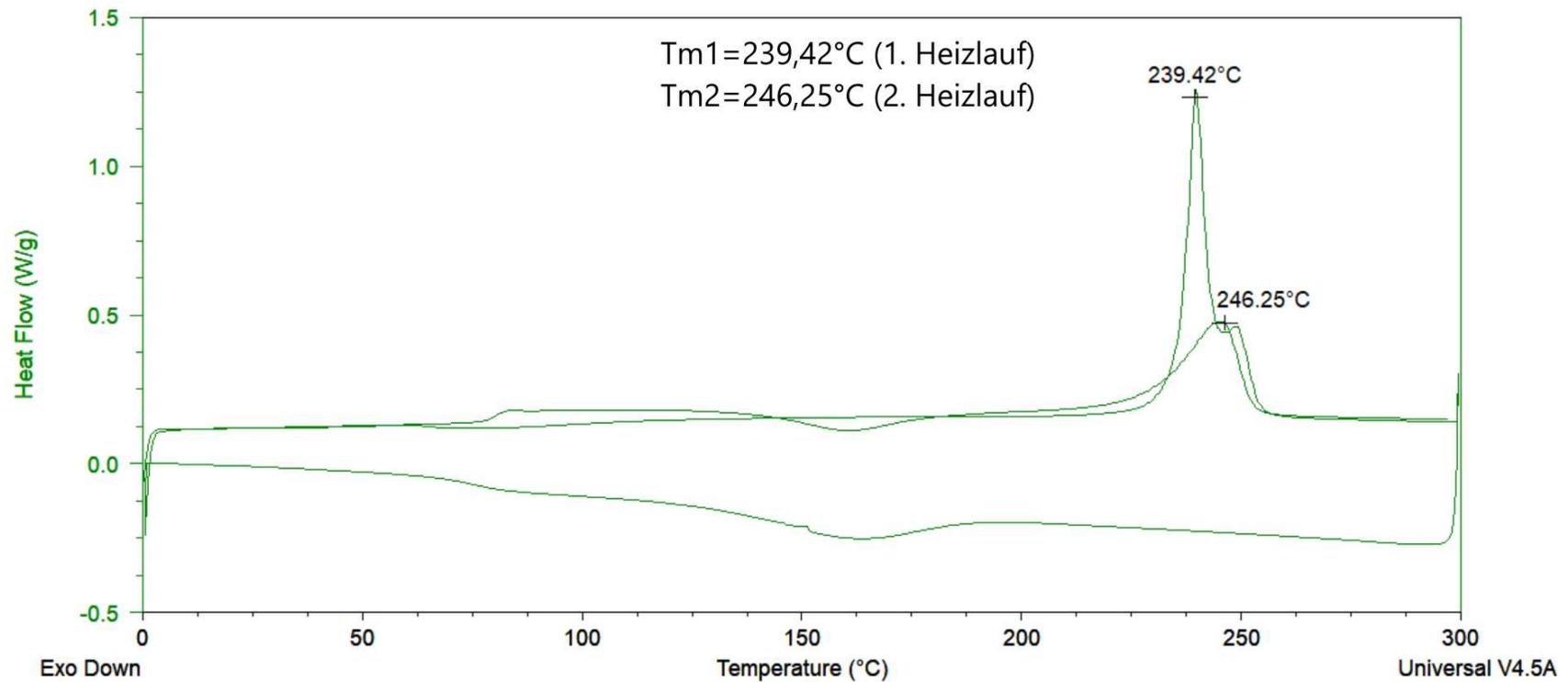


Abbildung 38: Ergebnisse der DSC für reines PET.

In Abbildung 38 ist für das nicht recycelte PET zu erkennen, dass bei der Wärmaufnahme zwei unterschiedliche Peaks entstanden sind. Der erste Heizlauf ist durch den Schmelzpeak bei 239°C zu erkennen. Während bei dem zweiten Heizlauf ein Schmelzpeak von 246°C zu erkennen ist und der Glasübergang bei ca. 80°C [48]. Die unterste Kurve entspricht der Abkühlungskurve. Laut Datenblatt ist eine Schmelztemperatur von 252°C gegeben [45]. Wie im Unterkapitel „DSC“ bereits erläutert, zeigen beide Verläufe verschiedene Eigenschaften des Materials auf.

Sample: PET(R-1time)_1

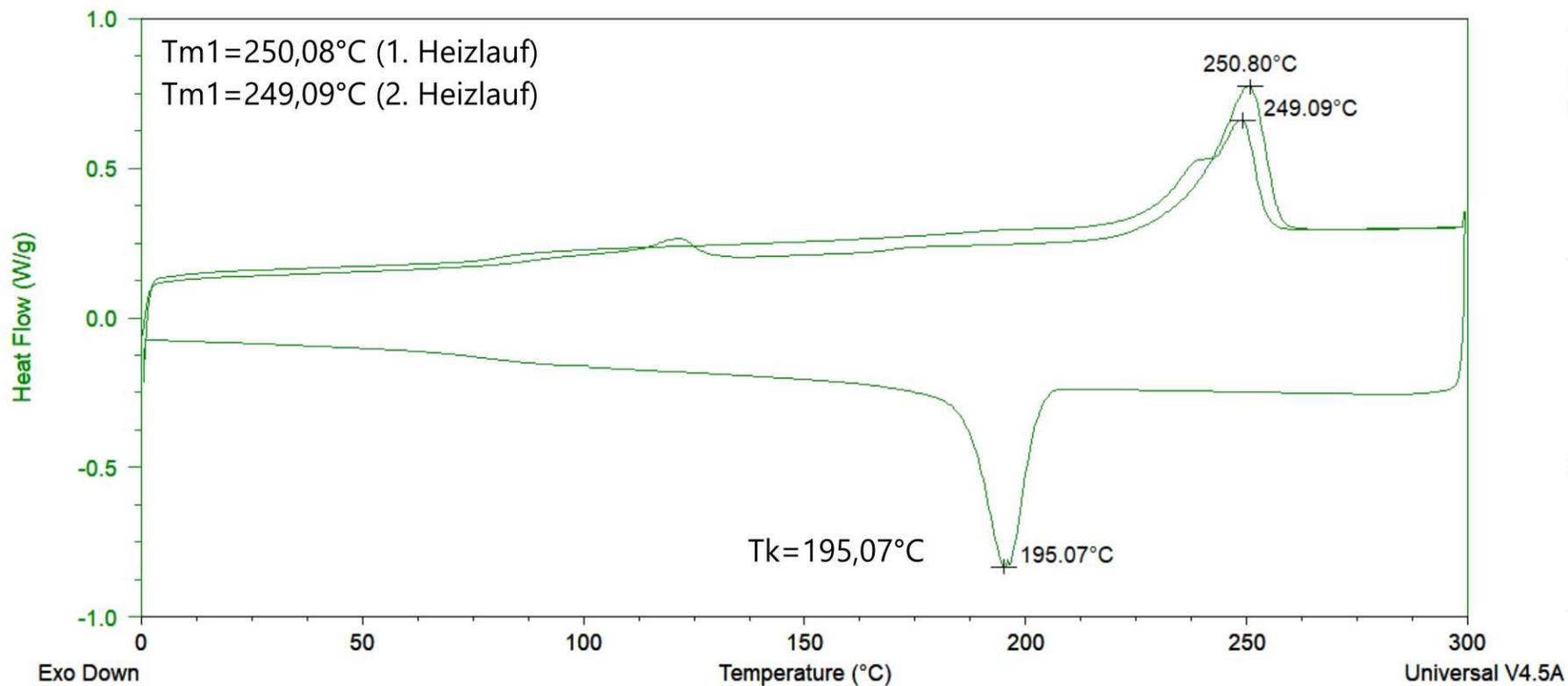


Abbildung 39: Ergebnisse der DSC für einmalig recyceltes PET.

In Abbildung 39, werden die Ergebnisse für jenes PET präsentiert, welches exakt einmal recycelt wurde. Der Schmelzpeak, welche dem ersten Heizlauf zuzuordnen ist, befindet sich bei 250°C. Dies entspricht dem Schmelzpunkt des reinen PET [45], [48]. Im Vergleich zu dem reinen PET in Abbildung 38, liegt der Peak um etwa 5°C höher. Zudem ist hier der Kristallisationspeak bei 195°C, in der Abkühlkurve als exothermer Effekt, deutlich zu erkennen.

Sample: PET(R-moretime)_1

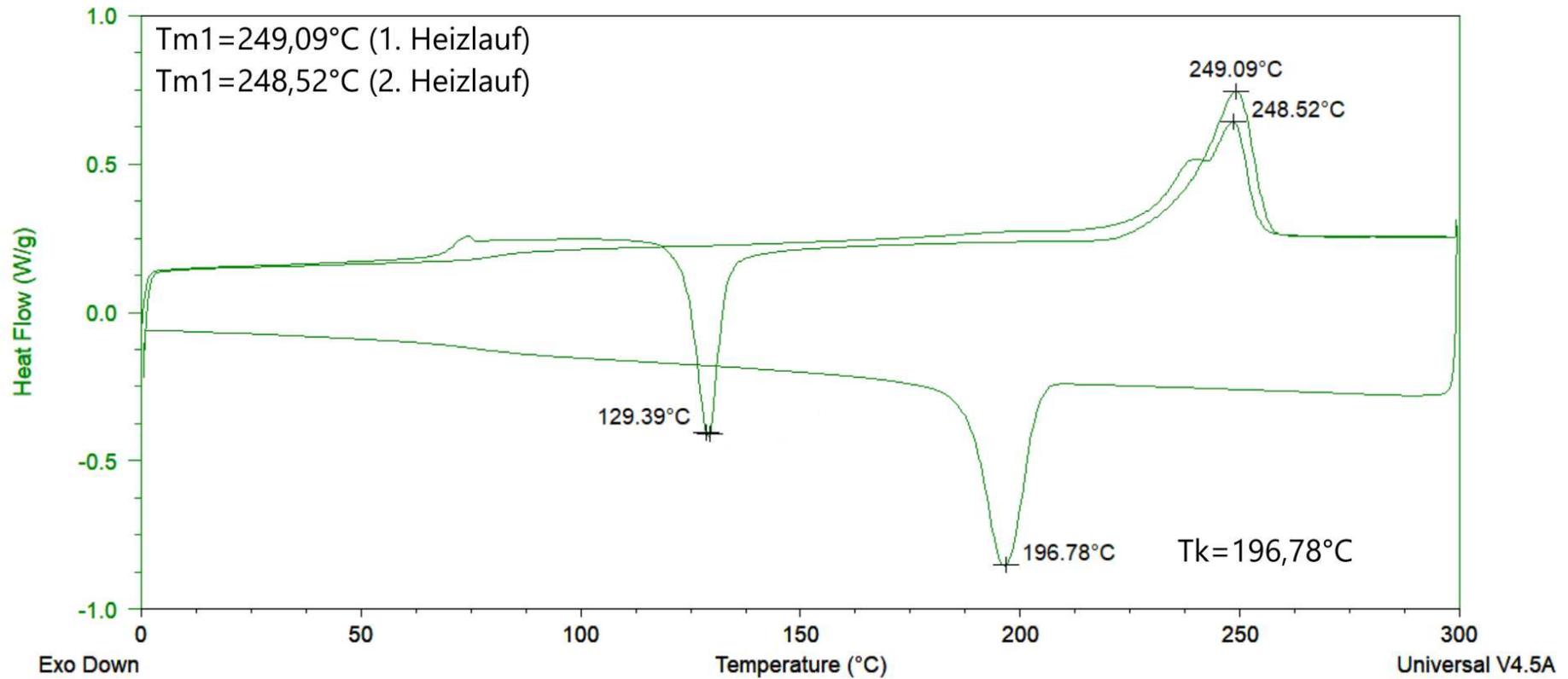


Abbildung 40: Ergebnisse der DSC für mehrfach recyceltes PET.

In Abbildung 40, werden die Ergebnisse bzgl. des mehrfach recycelten PET präsentiert. Hier wurde der Schmelzpeak, bei einer Temperatur von 249°C erreicht (1. Heizlauf). Dies entspricht dem Schmelzpunkt des reinen PET [45]. Zudem ist im ersten Heizlauf auch eine Rekristallisation bei 129°C zu erkennen. Zudem ist der Kristallisationspeak bei 196°C zu erkennen [48].

Sample: LDPE_1

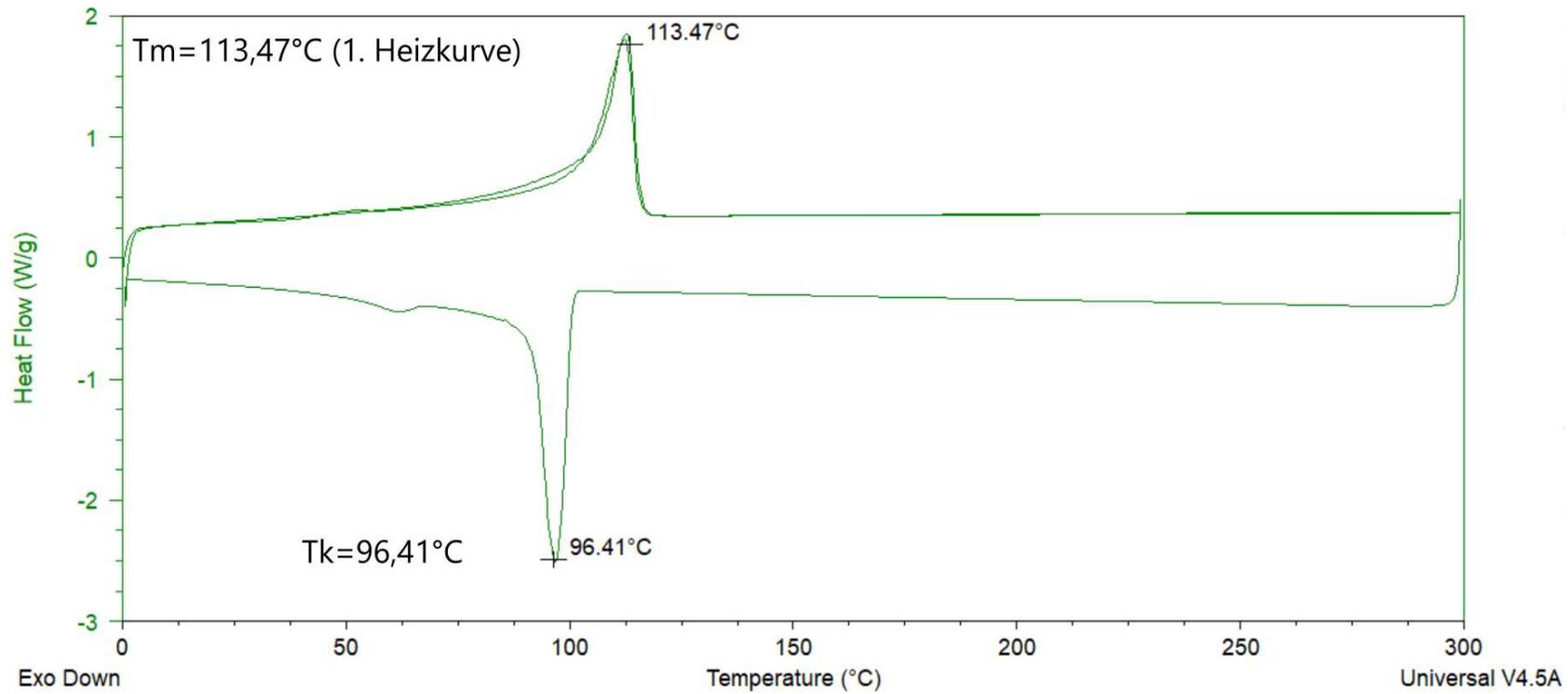


Abbildung 41: Ergebnisse der DSC für PE-LD.

In Abbildung 41 ist die Auswertung der DSC bzgl. PE-LD dargestellt. Der Peak der endothermen Phase tritt hier bereits bei einer Temperatur von 113°C auf (1. Heizkurve). Dieser liegt nahe an dem Wert von 111°C, welcher von der Literatur als Schmelztemperatur angegeben wird [48]. Auch der Peak der exothermen Phase bei 96°C ist klar zu erkennen [48].

Sample: Mehrschicht_1

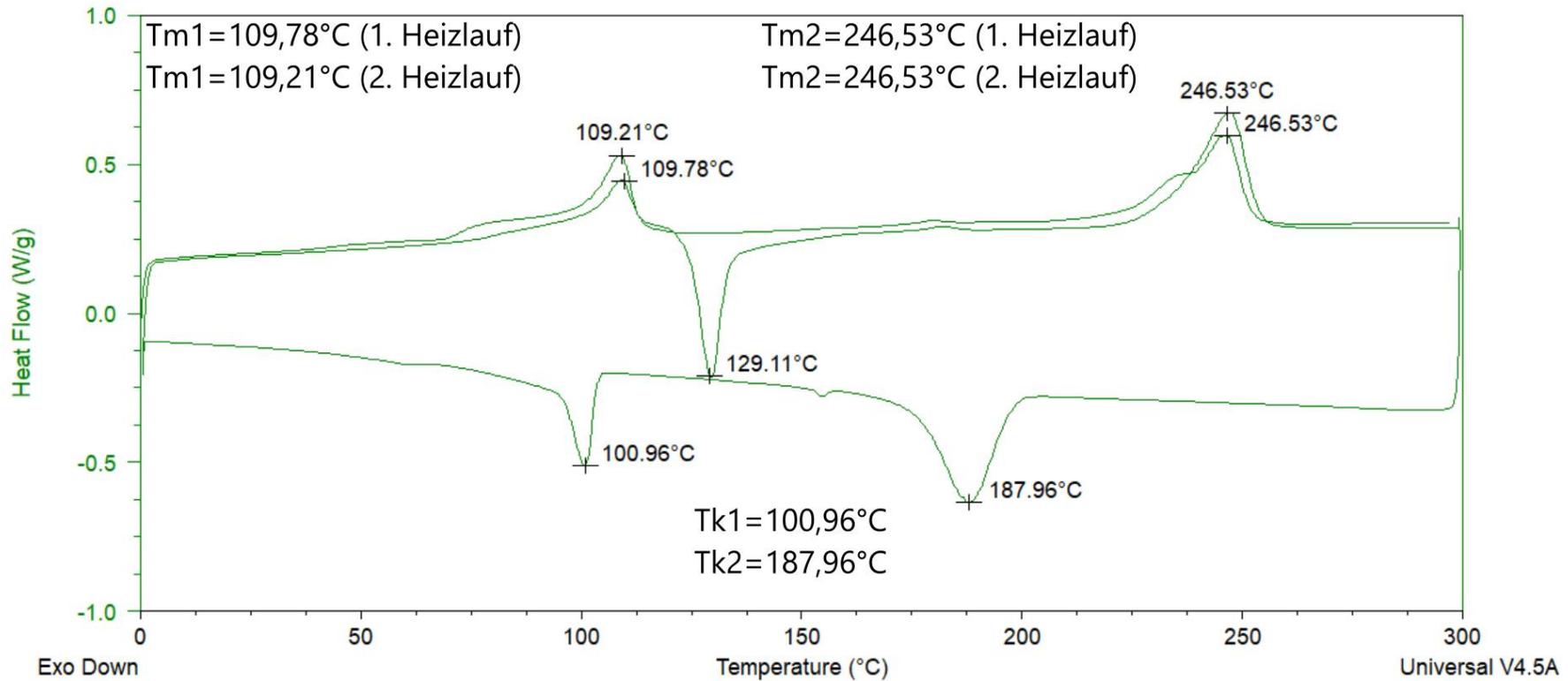


Abbildung 42: Abbildung 41: Ergebnisse der DSC für Mehrschichtfolie.

In Abbildung 42 sind die Ergebnisse des DSC bzgl. der Mehrschichtfolie dargestellt. Für die endotherme Phase, lassen sich die Peaks bei einer Temperatur von 109,21°C und bei einer Temperatur von 247,43°C ablesen (1. Heizlauf). Wenn diese Werte mit den vorhergehenden Ergebnissen verglichen werden, lassen sich die einzelnen Komponenten bestimmen. Zudem ist der Glasübergang von PET bei ca. 80°C durch eine leichte Erhebung in der Heizkurve zu erkennen. Auf der einen Seite das PE-LD mit einem Peak bei 109,21°C und das PET mit einem Peak bei 247,43°C. Weiter lässt sich ab 70°C eine Stufe in dem Verlauf der endothermen Phase erkennen. Diese könnte den Glasübergang von PET andeuten. Auch die Kristallisationspeaks von LD-PE und PET sind in der Abkühlkurve

(unten) zu erkennen [48]. Zudem ist bei 170°C in beiden Heizläufen eine leichte Erhebung zu erkennen, welche vermutlich auf das geringfügig vorhandene EVOH zurückzuführen ist [47].

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen auf, dass durch die eingesetzten Verträglichkeitsvermittler eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften bewerkstelligt werden kann. Besonders der Verträglichkeitsvermittler von Kraton FG1991 G aber auch der Verträglichkeitsvermittler von Lucofin 1492M HG, zeigten einen bemerkenswerten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften, besonders der Bruchdehnung betreffend. Daher ist das Augenmerk in der folgenden Diskussion auf diese zwei Verträglichkeitsvermittler gerichtet.

Ähnliche Versuche wurden bereits von Delva et al. durchgeführt, welche in der Arbeit „Compatibilization of PET-PE Blends for the Recycling of Multilayer Packaging Foils“ veröffentlicht wurde [58]. Eine weitere Studie, welche sich mit entsprechenden Problemstellungen befasst hat, ist von Carté T. L. und Moet A.. Deren Ergebnisse werden in ihrer Arbeit „Morphological Origin of Super Toughness in Poly (ethylene Terephthalate)/ Polyethylene Blends“ präsentiert [57]. Beide Arbeiten wurden als Vergleichsstudie für das mechanische Verhalten herangezogen. Es ist zu berücksichtigen, dass die verwendeten Materialien in der vorliegenden Arbeit und jenen aus der Vergleichsstudie von unterschiedlichen Herstellern bezogen wurden. Daher können die spezifischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten voneinander abweichen. Als Ausgangsmaterial dienten sowohl reine als auch recycelte Polymere. Zudem wurden auch unterschiedliche Verarbeitungsparameter gewählt, welche sich zusätzlich auf die erhobenen Daten auswirken können. Dennoch liefert diese Studie wertvolle Vergleichsdaten.

Teilweise sind bei den Blends, welche R-PET beinhalten, im Vergleich zu jenen Blends, welche reines PET beinhalten, eine deutlich höhere Streuung als auch signifikante Abweichungen bzgl. des arithmetischen Mittelwertes zu erkennen. Dies könnte unter anderem darauf zurückzuführen sein, dass das R-PET Verunreinigungen enthielt wie Tinte, Papier, Klebstoff und weitere organische Rückstände. Denn durch vorherige Reinigung mit reinem Wasser ist es nicht möglich, die Verunreinigungen vollständig zu entfernen. Ein weiterer Punkt ist die Homogenität der recycelten Materialien. Da für einen Probensatz verschiedenste Verpackungen aus PET eingesetzt wurden und es sehr unwahrscheinlich ist, dass dieses PET von den gleichen Lieferanten bezogen wird, können unterschiedliche spezifische Eigenschaften gegeben sein, wie zum Beispiel bei der mittleren Molmasse und deren Verteilungsbreite. Daraus lässt sich ein weiterer wichtiger Aspekt ableiten. Die recycelten Kunststoffverpackungen wurden nicht spritzgegossen sondern tiefgezogen. Während in dieser Arbeit ein PET verwendet wurde, welches vor allem für Anwendungen im Bereich des Streckblasformens geeignet ist [45]. Aufgrund der unterschiedlichen Verarbeitungsmethoden entstehen die verschiedensten Grundanforderungen an das PET. Dies wiederum lässt vermuten, dass sich die spezifischen Eigenschaften deutlich unterscheiden.

Die in den Abbildungen 34 - 40 dargestellten Bruchflächen der Schlagzugversuchsprobekörper zeigen prinzipiell ein ähnliches Erscheinungsbild. In allen Werkstoffen scheint die Phasenhaftung zwischen Matrix und eingelagerter Phase relativ gering zu sein. Gleichzeitig ist eine deutliche Spritzgussmorphologie erkennbar, mit näherungsweise kugelförmigen Teilchen im Kernbereich während die eingelagerte Phase deutlich in Fließrichtung gestreckt ist und "flachgedrückt" erscheint [70], [71]. Die Bruchflächen sehen eher spröde aus, typische Anzeichen für duktile Deformation der Matrix, wie zum Beispiel Fibrillenbildung, kann nicht beobachtet werden. Allerdings wirkt die Bruchfläche in Abbildung 39 etwas "duktiler" als die anderen. Es scheint keine Korrelation zwischen Teilchengrößen und Schlagzugzähigkeit zu geben [72].

Die Gegenüberstellung der Blends, welche den gemahlene Verträglichkeitsvermittler bzw. den ungemahlene Verträglichkeitsvermittler enthalten, wird in den Abbildungen 27-30 aufgezeigt. Der Vergleich der Blends, welche R-PET beinhalten, zeigt eine Verringerung der Schlagzugzähigkeit durch den Einsatz des gemahlene Verträglichkeitsvermittlers. Wie bereits erwähnt, könnten diese unterschiedlichen Ergebnisse auf Verunreinigungen und das heterogene Gemisch aus R-PET zurückzuführen sein. Bei den Mehrschichtfolien ist eine Verringerung der Streuung zu erkennen. Dies könnte andeuten, dass der gemahlene Verträglichkeitsvermittler zumindest bei den Mehrschichtfolien zu einer Verbesserung der Streuung führt und es folglich zumindest zu einer gleichmäßigeren Verteilung des beigefügten Verträglichkeitsvermittlers kommt.

Jedoch deuten die Ergebnisse der Bruchdehnung auf etwas anderes hin. Bei den Blends, welche R-PET beinhalten, konnte eine deutliche Steigerung der Bruchdehnung erreicht werden. Dennoch ist die Streuung der Ergebnisse so breit, dass keine verlässliche Aussage möglich ist. Auch hier könnten Verunreinigungen und das heterogene Gemisch der R-PET Schnipsel eine entscheidende Rolle einnehmen. Bei den Mehrschichtfolien, ist ein entgegengesetzter Effekt zu beobachten. Eine starke Schwankung der Anteile an Verunreinigungen könnte für die Abweichungen eine Erklärung sein. Zudem ist zu berücksichtigen, dass der gemahlene Verträglichkeitsvermittler dazu neigt, an den Wänden der Leitungen und der Gefäße hängen zu bleiben und sich nur schwer lösen lässt. Bei der Zugabe von 0,1 g des Verträglichkeitsvermittlers könnte dies zu einer starken Verringerung der zugeführten Menge führen, welche schlussendlich im Extruder ankommt.

In dem folgenden Abschnitt, werden die mechanischen Ergebnisse der Blends interpretiert. Dabei wird zuerst die Auswertung der E-Module und Zugfestigkeit besprochen. Anschließend werden die Ergebnisse der Bruchdehnung und der Schlagzugzähigkeit diskutiert.

Die E-Module zeigen bei den Blends ohne Verträglichkeitsvermittler ein sehr ähnliches Ergebnis. Auch die reinen PET und R-PET Proben zeigen vergleichsweise einheitliche Werte. Dies trifft bei den Ergebnissen bzgl. der Zugfestigkeit ebenso zu. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die erstellten

Blends einen sinnvollen Vergleich ermöglichen sollten und keine zu großen Abweichungen zu erwarten sind.

Bei der Betrachtung der E-Module und der Zugfestigkeit der Blends, welche einen Verträglichkeitsvermittler enthalten, fallen beim Vergleich mit den Blends, welche keinen Verträglichkeitsvermittler enthalten, keine nennenswerten Unterschiede auf. Daher konnte durch den Verträglichkeitsvermittler keine wesentliche Veränderung herbeigeführt werden. Dies konnte auch in der Vergleichsstudie von Delva et al. festgestellt werden (vgl. [58]). Während bei den Mehrschichtfolien eine signifikante Senkung der Zugfestigkeit durch den Einsatz der Verträglichkeitsvermittler FG1901 G und G1643 M, festzustellen ist. Auch hier könnten diese Unterschiede auf einen erhöhten Grad an Verunreinigungen zurückzuführen sein. Eine weitere Ursache könnte sein, dass diese Verträglichkeitsvermittler zu einer wesentlichen Verringerung der Haftung beitragen. Dadurch würden diese Verträglichkeitsvermittler, zumindest für die Steigerung der Zugfestigkeit, bei den Mehrschichtfolien nicht in Frage kommen.

Bei der Bruchdehnung konnten bemerkenswerte Ergebnisse gemessen werden. Bei den Mehrschichtfolien konnte eine fünfzigfache Steigerung der gemittelten Bruchdehnung ermittelt werden. Trotz der breiten Streuung ist dies eine enorme Steigerung. Auch bei den anderen Verträglichkeitsvermittlern konnte teilweise eine erhebliche Steigerung festgestellt werden. Auffällig ist, dass bei einer Zugabe von 5% die ermittelten Werte deutlich geringer sind. Dies könnte daran liegen, dass der Anteil des Verträglichkeitsvermittlers zu groß ist, womit dieser sich an gewissen Stellen anreichert und keine weitere Verbindung eingeht. Diese angereicherten Stellen, könnten in Folge eine Schwachstelle im Gefüge aufweisen. Die am weitreichendsten Ergebnisse wurden mit den Blends, welche reines PET beinhalten, erzielt. Dies könnte mit großer Wahrscheinlichkeit auf das nicht Vorhandensein von Verunreinigung und deren Homogenität, bzgl. deren spezifischer Eigenschaften, zurückzuführen sein. Auch wenn die ermittelte Bruchdehnung bei den Blends, welche das recycelte PET beinhalten, deutlich geringer ausgefallen ist, kann auch hier ein erheblicher Einfluss durch den Einsatz der Verträglichkeitsvermittler beobachtet werden. Der geringere Einfluss könnte durch die Anwesenheit von Verunreinigungen erklärt werden.

Besonders bei der Bruchdehnung haben sich große Unterschiede in den Ergebnissen der einzelnen Verträglichkeitsvermittler und deren Dosierung gezeigt. Bei der Betrachtung der Gesamtheit der Ergebnisse, hat der Verträglichkeitsvermittler FG1901 G am erfolgreichsten abgeschnitten und wird daher, für den Einsatz bei den Mehrschichtfolien bzw. für weitere Untersuchung, weiter empfohlen. Der Verträglichkeitsvermittler 1492M HG hatte ebenso positive Auswirkungen bezogen auf die Bruchdehnung und sollte daher auch weiter erforscht werden. Auf der anderen Seite konnte der Verträglichkeitsvermittler G1643 M keine überzeugenden Ergebnisse liefern und kann somit für den weiteren Einsatz in diesem Bereich vorerst ausgeschlossen werden.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse bzgl. der Schlagzugzähigkeit fällt auf, dass der Einsatz der Verträglichkeitsvermittler zu einer Verringerung führte. Dies könnte unter anderem an dem vorhandenen EVOH bzw. Klebstoff liegen. Da die Extrusion von EVOH und PE zur Bildung von Blasen und anderen unerwünschten Effekten führen kann [50]. Während bei den Blends, welche R-PET beinhalten, eine leichte Steigerung der Schlagzugzähigkeit zu beobachten ist. Dies würde zumindest eine geringe Zunahme der Zähigkeit andeuten. Wodurch sich die Steigerung der Bruchdehnung durch den Einsatz des Verträglichkeitsvermittlers bestätigen lassen würde. Die deutlichste Steigerung der Schlagzugzähigkeit ließ sich bei den Blends, welche das reine PET beinhalten, feststellen. Bei der Analyse der Gesamtergebnisse könnten die großen Unterschiede zwischen den verschiedenen Blends, erneut darauf hindeuten, dass die Unreinheiten, wie zum Beispiel Klebstoff, EVOH, Etiketten und Prints, einen starken Einfluss auf die Wirksamkeit der Verträglichkeitsvermittler haben könnten.

Ein weiterer Aspekt ist, dass der Anteil von PE-LD mit 20% nicht gerade groß ist. Für die mechanischen Eigenschaften ist nicht nur die Haftung zwischen den Partikeln und der Matrix von Bedeutung sondern auch der Abstand der Partikel voneinander. Somit könnte es durch den Verträglichkeitsvermittler zu einer verbesserten Haftung kommen, ohne wesentliche Veränderung der mechanischen Eigenschaften, da der Abstand der Partikel voneinander so groß ist, dass dieser Einfluss nicht vernachlässigt werden kann [72]. Ein weiterer Punkt wäre die Optimierung der Verarbeitungsparameter um feinere Partikel zu bekommen.

Die Analyse der DSC-Daten liefern keine ungewöhnlichen Ergebnisse. Bei der Betrachtung des Verlaufes, welche der Mehrschichtfolie zuzuordnen ist, ist eine leichte Erhebung ab ca. 70°C zu erkennen. Dabei dürfte es sich um den Glasübergang von PET handeln. Ansonsten sind keine ungewöhnlichen Muster festzustellen.

Zusammenfassung

Durch den Einsatz geeigneter Verträglichkeitsvermittler sollen Mehrschichtfolien, welche als Verpackungsmaterial in der Lebensmittelindustrie dienen, recycelt und aufgewertet werden. Dadurch sollen diese, erneut im Nahrungsmittelbereich als Verpackungsmaterial eingesetzt werden können. In einer vorhergehenden Arbeit, auf welcher diese aufbaut, wurde bereits ermittelt, dass die untersuchte Mehrschichtfolie, zu etwa 80% aus PET und 20% PE besteht. Zudem ist ein geringer Anteil von ungefähr 2% EVOH enthalten.

Der Verträglichkeitsvermittler hat mehrere Herausforderungen zu bewältigen. Auf der einen Seite soll dieser eine zufriedenstellende Mischbarkeit der zwei unverträglichen Komponenten PET und PE gewährleisten. Auf der anderen Seite sollen die mechanischen Eigenschaften, besonders die Bruchdehnung, soweit verbessert bzw. wiederhergestellt werden, das ein Einsatz in der Lebensmittelindustrie als Verpackungsmaterial möglich ist.

Um einen aussagekräftigen Vergleich darstellen zu können, wurden drei verschiedenen Blends erzeugt. Das erste Blend besteht aus reinem PET und reinem PE-LD. Während das zweite Blend aus R-PET und reinem PE-LD besteht. Diese werden mit dem dritten Blend verglichen, welches die Mehrschichtfolie bildet. Das R-PET wurde aus diversen Kunststoffschalen der Lebensmittelindustrie bezogen. Beim Vergleich der mechanischen Eigenschaften der reinen Blends wurden keine nennenswerten Abweichungen ermittelt. Daher sollte ein sinnvoller bzw. realistischer Vergleich der Blends, welche einen Verträglichkeitsvermittler beinhalten, möglich sein. Für die beigefügte Menge wurde eine Dosierung von 2,5% und 5% gewählt. Für diese Arbeit wurden drei verschiedene Verträglichkeitsvermittler herangezogen. Diese sind:

- Kraton G1643 M
- Kraton FG1901 G
- Lucofin 1492M HG

Dabei haben sich der Verträglichkeitsvermittler Kraton FG1901 G und Lucofin 1492M HG als geeignet erwiesen. Besonders Kraton FG1901 G, lieferte bemerkenswerte Ergebnisse. Durch dessen Einsatz konnte, durch Zugabe von 2,5% Masseanteil, die Bruchdehnung vervielfacht werden.

Obwohl die reinen Blends, welche keinen Verträglichkeitsvermittler beinhalten, sehr ähnliche mechanische Eigenschaften aufwiesen, wichen die Ergebnisse beim Einsatz des Verträglichkeitsvermittlers teilweise stark voneinander ab. Die Blends, welche reines PET beinhalten, haben mehrheitlich die exzellentesten Ergebnisse erreicht. Während bei den Blends, welche das R-PET beinhielten, eine teilweise deutlich geringere Verbesserung festzustellen war. Dies war auch bei den Mehrschichtfolien zu beobachten, wo es größtenteils zu einer weiteren Verschlechterung der Ergebnisse kam.

Dies könnte auf mehrere Ursachen zurückzuführen sein. Unter anderem auf die Verunreinigungen, wie zum Beispiel Klebstoff, Papier Überreste und Prints. Auch die Inhomogenität der einzelnen Zusammensetzungen könnten die größeren Abweichungen bzw. Streuungen begründen. Bei den Mehrschichtfolien ist noch ein weiterer Aspekt zu berücksichtigen. Wie bereits in vorliegenden Studien festgestellt wurde, kann das Vorhandensein von EVOH in einer PE Matrix zu mehreren unerwünschten Effekten führen. Dies könnte einen wesentlichen Faktor bei den Mehrschichtfolien darstellen, welcher für deren größere Abweichungen beim Einsatz der Verträglichkeitsvermittler verantwortlich ist.

Die Analyse der Morphologie der Bruchflächen zeigte ein weiteres Kriterium auf. Durch das Spritzgussverfahren hat sich eine Haut-Kern-Struktur gebildet. Die Geometrie der PE-Phase, könnte darauf hinweisen, dass die Ketten der Matrix stark orientiert sind. Dies würde die Ergebnisse ebenfalls beeinflussen.

Anhand dieser Arbeit und dessen Ergebnisse, können weitere Forschungen zum Recycling von Mehrschichtfolien unternommen werden. Zudem sollte, durch die Analyse dieser wissenschaftlichen Arbeit, ein Ansatzpunkt für weitere strategische Schritte - im Bereich Recycling - gegeben werden.

Literaturverzeichnis

- [1] E. Van Eygen, D. Laner and J. Fellner, "Circular economy of plastic packaging: Current practice and perspectives in Austria," *Waste Management*, vol. 72, pp. 55-64, 2018.
- [2] K. Ragaert, L. Delva and K. Van Geem, "Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste," *Waste Management*, vol. 69, pp. 24-58, 2017.
- [3] U. Förstner, *Umweltschutztechnik*, 8 ed., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [4] S. M. Al-Salem, P. Lettieri and J. Baeyens, "The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, no. 1, pp. 103-129, 2010.
- [5] J. Maris, J. Bourdon, L. Cauret, L. Fontaine and V. Montembault, "Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 147, pp. 245-266, 2018.
- [6] j. M. Soto, G. Blázquez, M. Calero, L. Quesada, V. Godoy and M.-L. Maria Ángeles, "A real case study of mechanical recycling as an alternative for managing of polyethylene plastic film presented in mixed municipal solid waste," *Journal of Cleaner Production*, vol. 203, pp. 777-787, 2018.
- [7] S. D. Mancini, J. A. S. Schwartzman, A. R. Nogueira, D. A. Kagohara and M. Zanin, "Additional steps in mechanical recycling of PET," *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, no. 1, pp. 92-100, 2010.
- [8] A. Ravve, *Principles of polymer chemistry*, New York: Springer, 2012.
- [9] C. L. Beyler and M. M. Hirschler, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3 ed., Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002, pp. 110-131.
- [10] F. Lamantia and M. Vinci, "RECYCLING POLY(ETHYLENETEREPHTHALATE)," *Polymer Degradation And Stability*, vol. 45, no. 1, pp. 121-125, 1994.
- [11] A. M. Al-Sabagh, F. Z. Yehia, G. Eshaq, A. M. Rabie and A. E. ELMetwally, "Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 25, pp. 53-64, 2016.
- [12] S. M. Al-Salem, P. Lettieri and J. Baeyens, "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review," *Waste Management*, vol. 29, no. 10, pp. 2625-2643, 2009.
- [13] I. Vermeulen, J. Van Caneghem, C. Block, J. Bawyens and C. Vandecasteele, "Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals valorization," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 190, no. 1, pp. 8-27, 2011.
- [14] A. A. Garforth, S. Ali, J. Hernández-Martínez and A. Akah, "Feedstock recycling of polymer

- wastes," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 8, no. 6, pp. 419-425, 2004.
- [15] D. Achilias, A. Giannoulis and G. Papageorgiou, "Recycling of polymers from plastic packaging materials using the dissolution–reprecipitation technique," *Polymer Bulletin*, vol. 63, no. 3, pp. 449-465, 2009.
- [16] F. Paolo and F. La Mantia, "Basic Concepts on the Recycling of Homogeneous and Heterogeneous Plastics," *Recycling of PVC and Mixed Plastic Waste*, 1996.
- [17] F. Awaja and D. Pavel, "Recycling of PET," *European Polymer Journal*, vol. 41, no. 7, pp. 1453-1477, 2005.
- [18] N. Cardi, R. Po, G. Giannotta, E. Occhiello, F. Garbassi and M. Giuseppe, "Chain extension of recycled poly(ethylene terephthalate) with 2,2'-Bis(2-oxazoline)," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 50, no. 9, pp. 1501-1509, 1993.
- [19] G. Giannotta, R. Po', N. Cardi, E. Tampellini, E. Occhiello, F. Garbassi and L. Nicolais, "Processing effects on poly(ethylene terephthalate) from bottle scraps," *Polymer Engineering & Science*, vol. 34, no. 15, pp. 1219-1223, 1994.
- [20] J. Scheirs, *Polymerrecycling: Wissenschaft, Technologie und Anwendungen*, Chichester, New York, Weinheim, : John Wiley and Sons, LTD, 1998.
- [21] W. Romano, M. Spinace and M. De Paoli, "Poly(Ethylene Terephthalate), PET. A Review on the Synthesis Processes, Degradation Mechanisms and its Recycling," *Polimeros-Ciencia E Tecnologia*, vol. 19, no. 2, pp. 121-132, 2009.
- [22] H. A. Lecomte and J. J. Liggat, "Degradation mechanism of diethylene glycol units in a terephthalate polymer," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 91, no. 4, pp. 681-689, 2006.
- [23] F. Villain, J. Coudane and M. Vert, "Thermal degradation of polyethylene terephthalate: study of polymer stabilization," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 49, no. 3, pp. 393-397, 1995.
- [24] M. K. Eriksen, K. Pivnenko, M. E. Olsson and T. F. Astrup, "Contamination in plastic recycling: Influence of metals on the quality of reprocessed plastic," *Waste Management*, vol. 79, pp. 595-606, 2018.
- [25] F. D. Alsewailem and J. K. Alrefaie, "Effect of contaminants and processing regime on the mechanical properties and moldability of postconsumer polyethylene terephthalate bottles," *Waste Management*, vol. 81, pp. 88-93, 2018.
- [26] F. Welle, "Decontamination efficiency of a new post-consumer poly(ethylene terephthalate) (PET) recycling concept," *Food Additives & Contaminants: Part A*, vol. 25, no. 1, pp. 123-131, 2008.
- [27] N. Torres, J. J. Robin and B. Boutevin, "Study of thermal and mechanical properties of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) before and after injection molding," *European Polymer Journal*, vol. 36, no. 10, pp. 2075-2080, 2000.

- [28] H. Jin, J. Gonzalez-Gutierrez, P. Oblak, B. Zupancic and I. Emri, "The effect of extensive mechanical recycling on the properties of low density polyethylene," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 97, no. 11, pp. 2262-2272, 2012.
- [29] M. D. M. C. López, A. I. Ares Pernas, M. J. Abad López, A. L. Latorre, J. M. López Vilarino and M. V. González Rodriguez, "Assessing changes on poly(ethylene terephthalate) properties after recycling: Mechanical recycling in laboratory versus postconsumer recycled material," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 147, no. 3, pp. 884-894, 2014.
- [30] G. Menges, E. Haberstroh, W. Michaeli and E. Schmachtenberg, *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe*, 6 ed., München: Hanser, 2011.
- [31] i. S. Duarte, A. A. Tavares, P. S. Lima, D. L. Andrade, L. H. Carvalho, E. L. Canedo and S. M. Silva, "Chain extension of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate): Effect of processing conditions and reprocessing," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 124, pp. 26-34, 2016.
- [32] W. Kaiser, *Kunststoffchemie für Ingenieure : von der Synthese bis zur Anwendung*, München: Hanser, 2016.
- [33] P. Eyerer, P. Elsner and T. Hirth, *Polymer Engineering : Technologien und Praxis*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [34] T. I. Butler and B. A. Morris, "Multilayer flexible packaging," in *PE based multilayer film structures*, 2010, pp. 205-230.
- [35] P. Delassus, "Transport of unusual molecules in polymer films," *TAPPI J.*, vol. 68, pp. A21-A21, 1985.
- [36] P. J. Fellows, *Food processing technology : principles and practice*, 3 ed., Cambridge [u.a.] Boca Raton, Fla. [u.a.]: Woodhead Publ. CRC Press, 2009.
- [37] L. K. Massey, *Permeability Properties of Plastics and Elastomers: A Guide to Packaging and Barrier Materials*, 2 ed., ScienceDirect (Elsevier B.V.): Elsevier Science, 2002.
- [38] K. Oberbach, E. Bauer, S. Brinkmann and E. Schmachtenberg, *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*, 30 ed., München: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [39] G. H. Michler, *Atlas of polymer structures : morphology, deformation and fracture structures*, Munich: Hanser Verlag, 2016.
- [40] M. Kaßmann, *Grundlagen der Verpackung : Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung*, 2 ed., Berlin, Wien: Beuth, 2014.
- [41] L. A. Pasler, *Charakterisierung von Mehrschicht-Verpackungen in Hinblick auf den weiterführenden Recycling-Prozess*, Wien: Wien, 2019.
- [42] J. Miltz, A. Ram and M. M. Nir, "Prospects for application of post-consumer used plastics in food packaging," *Food Additives & Contaminants*, vol. 14, no. 6-7, pp. 649-659, 1997.

- [43] S. Koltzenburg, *Polymer chemistry*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2017.
- [44] C. Bonten, *Kunststofftechnik : Einführung und Grundlagen*, 2 ed., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016.
- [45] Invista, "Polyclear® Refresh PET 1101," Invista, Datenblatt, 2010.
- [46] O. Schwarz, F. Ebeling, F. Richter, H. Huberth, H. Schirber and N. Schlör, *Kunststoffkunde: Aufbau, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungen der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere*, 10 ed., Würzburg: Vogel Business Media, 2016.
- [47] C. Maes, W. Luyten, G. Herremans, R. Peeters, R. Carleer and M. Buntinx, "Recent Updates on the Barrier Properties of Ethylene Vinyl Alcohol Copolymer (EVOH): A Review," *Polymer Reviews*, vol. 58, no. 2, pp. 209-246, 2018.
- [48] H. Domininghaus, P. Elsner, P. Eyerer und T. Hirth, *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [49] A. Nakano, "Ethylene vinyl alcohol co-polymer as a high-performance membrane: An EVOH membrane with excellent biocompatibility," *High-Performance Membr. Dialyzers*, vol. 173, pp. 164-171, 2011.
- [50] "RecyClass," 5 November 2019. [Online]. Available: <https://recyclclass.eu/pe-flexible-films-recycling-new-findings-for-functional-barriers-evoh-properties-tested/>. [Accessed 20 Jänner 2020].
- [51] K. Dobrowszky and F. Ronkay, "Effects of Phase Inversion on Molding Shrinkage, Mechanical, and Burning Properties of Injection-molded PET/HDPE and PS/HDPE Polymer Blends," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 56, no. 11, pp. 1147-1157, 2017.
- [52] P. F. W. Simon and A. Fahmi, *Polymere - Chemie und Strukturen : Herstellung, Charakterisierung und Werkstoffe*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, 2020.
- [53] Kraton, "KRATON FG1901 G Polymer," Kraton, Datenblatt, 2018.
- [54] D. J. Ihm and J. L. White, "Interfacial Tension of Polyethylene/Polyethylene Terephthalate with Various Compatibilizing Agents," *Journal of applied Polymer Science*, vol. 60, no. 1, pp. 1-7, 1996.
- [55] Kraton, "KRATON G1643 M Polymer," Kraton, Datenblatt, 2018.
- [56] M. Pluta, Z. Bartczak, A. Pawlak and A. Galeski, "Phase structure and viscoelastic properties of compatibilized blends of PET and HDPE recyclates," *Journal Of Applied Polymer Science*, vol. 82, no. 6, pp. 1423-1436, 2001.
- [57] T. L. Carté and A. Moet, "Morphological Origin of Super Toughness in Poly(ethylene Terephthalate)/Polyethylene Blends," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 48, no. 4, pp. 611-624, 1993.

- [58] L. Delva, C. Deceur, N. Van Damme and K. Ragaert, "Compatibilization of PET-PE blends for the recycling of multilayer packaging foils," in *AIP Conference Proceedings 2055*, 030005, <https://doi.org/10.1063/1.5084815>, 2019.
- [59] S. Sancho-Quero, A. J. Yáñez-Pacios and J. M. Martín-Ma, "New binary blends of ethylene-co-n-butyl acrylate (EBA) copolymer and low molecular weight rosin ester resin with potential as pressure sensitive adhesives," *Materials*, vol. 11, no. 10, 2018.
- [60] Lucobit, "Lucofin 1492M HG," Lucobit, Datenblatt, 2017.
- [61] P. Stoughton, "Guidelines for Drying PET," *Plastics Technology*, vol. 60, no. 12, pp. 50-55, 2014.
- [62] W. Weißbach, M. Dahms und C. Jaroschek, *Werkstoffkunde : Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [63] G. Kämpf, *Industrielle Methoden in der Kunststoffcharakterisierung*, München Wien: Carl Hanser Verlag, 1996.
- [64] G. W. Ehrenstein, G. Riedel und P. Trawiel, *Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen*, München: Hanser, 2003.
- [65] E. Bürkle, D. Ammer und M. Würtele, *Spritzgießen*, Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [66] D. I. f. N. e. V., "DIN EN ISO 527-2, Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen," 2012.
- [67] D. I. f. N. e. V., "DIN EN ISO 8256, Kunststoffe – Bestimmung der Schlagzugzähigkeit," 2004.
- [68] „Instron,“ [Online]. Available: <https://www.instron.ch/-/media/literature-library/products/2013/09/ceast-9000-series-pendulum-impact-testers.pdf?la=de-CH>. [Zugriff am 17 September 2019].
- [69] F. R. Schwarzl, *Polymermechanik : Struktur und mechanisches Verhalten von Polymeren*, Berlin: Springer, 1990.
- [70] S. Bärwinkel, A. Seidel, S. Hobeike, R. Hufen, M. Mörl and V. Altstädt, "Morphology Formation in PC/ABS Blends during Thermal Processing and the Effect of the Viscosity Ratio of Blend Partners," *Materials*, vol. 9, no. 8, p. 659, 2016.
- [71] R. Krache and I. Debah, "Some mechanical and thermal properties of PC/ABS blends," *Mater. Sci. Appl.*, vol. 2, no. 5, pp. 404-410, 2011.
- [72] I. Kotter, „Morphologie-Zähigkeits-Korrelationen von EPR-modifizierten Polypropylenwerkstoffen,“ Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Universitäts- und Landesbibliothek Sachsen-Anhalt (ULB), 2003.

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



Identifier : K460DDo17U

Description

Kraton G1643 M is a clear, linear triblock copolymer based on styrene and ethylene/butylene with a polystyrene content of 20%. It is supplied from North America in the physical form identified below.

- Kraton G1643 MS - is supplied as a dusted, dense pellet.

Kraton G1643 M is used in compound formulations and as a modifier of thermoplastics. It may also find use in formulating adhesives, sealants, coatings and modified bitumens.

Sales Specifications

Property	Test Method	Units	Sales Specification Range	Notes
Melt Flow, 230C/2160g	ASTM D1238	g/10 min	14.0 TO 25.0	
Antioxidant	KM 08	%m	0.06 TO 0.14	b
Total Extractables	KM 05	%m	<= 1.0	
Polystyrene Content	KM 03	%m	16.6 TO 20.6	c
Ash, S	BAM 908	%w	0.02 TO 0.12	a
Volatile Matter	KM 04	%m	<= 1.0	

- a** Silica
- b** Non-staining phenolic antioxidant
- c** Measured on the polymer before hydrogenation.

Typical Properties (These are typical values and may not routinely be measured on finished product)

Property	Test Method	Units	Typical Value	Notes
Melt Index 230Â°C, 2.16 kg	ASTM D 1238	gms/10 min.	19	
Tensile Strength	ASTM D 412	psi	> 1500	
Solution Viscosity	BAM 922	cps	210	c
Elongation at Break	ASTM D 412	%	> 600	
Styrene / Rubber ratio	n/a		20/80	
Hardness, Shore A (30 sec)	ASTM D 2240	Hardness, Shore A (30 sec)	52	
Specific Gravity	ASTM D 792	g/cc	0.90	

- c** 25%w toluene solution at 25 C

Packaging

Kraton Polymers are available in a number of different package types. For information specific to this grade, please contact your local Kraton Polymers representative.

KRATON™ and the Kraton logo are either trademarks or registered trademarks of Kraton Corporation, or its subsidiaries or affiliates, in one or more, but not all countries.

©2018 Kraton Corporation



K0127
North America
1/15/2018

KRATON™ FG1901 G Polymer

Data Document

Identifier : K127DDI17U

Description

Kraton FG1901 G is a clear, linear triblock copolymer based on styrene and ethylene/butylene with a polystyrene content of 30%. It is supplied from North America in the physical form identified below.

- FG1901 GT - supplied as a dusted pellet

Kraton FG1901 G is used as a modifier of bitumen and polymers. It is also suitable as an ingredient in formulating compounds for footwear applications and may be used in formulating adhesives, sealants, and coatings.

Sales Specifications

Property	Test Method	Units	Sales Specification Range	Notes
Melt Flow, 230C/5000g	ASTM D1238	g/10 min	14 TO 28	
Maleic anhydride, Bound	BAM 1026	%w	1.4 TO 2.0	
Water	BAM 1024	ppmw	<= 500	a
a At time of packaging				

Typical Properties (These are typical values and may not routinely be measured on finished product)

Property	Test Method	Units	Typical Value	Notes
Melt Index 230C, 5 kg	ASTM D 1238	gms/10 min.	22	
Tensile Strength	ASTM D 412	psi	5000	a
Specific Gravity	ASTM D 792	g/cc	0.91	
Styrene / Rubber ratio	n/a		30/70	
Hardness, Shore A	ASTM D 2240	Shore A (10 sec)	71	b
Elongation at Break	ASTM D 412	%	500	a
Solution Viscosity	BAM 922	cps	1000	c
a Typical properties determined on film cast from toluene solution.				
b Typical values on polymer compression molded at 300Å°F.				
c 25%w toluene solution at 25Å°C, measured at time of packaging.				

Packaging

Kraton FG1901 G is packaged in sealed, foil-lined bags and typically does not require drying before melt process. However, if the bag is left open for an extended period of time, the product may absorb moisture and should be dried under vacuum at 80 degree C for a minimum of six hours before processing.

KRATON™ and the Kraton logo are either trademarks or registered trademarks of Kraton Corporation, or its subsidiaries or affiliates, in one or more, but not all countries.

©2018 Kraton Corporation

Produktdatenblatt

Lucofin®1492M HG

Produktbeschreibung

Lucofin®1492M HG ist ein chemisch modifiziertes mit Maleinsäureanhydrid (E24AF) gepfropftes PE, APEO17eth7len- und 7lac7latf *opol7merisat, wobei das zugrundeliegende PE ein randomisiertes *opol7mer aus einem kontinuierlichen Extraktionsprozess ist.

Produkteigenschaften

Lucofin®1492M HG weist aufgrund der 24A-Pfropfung eine hohe Polarisierung auf. Dadurch eignet es sich hervorragend für Anwendungen, bei denen eine entsprechende Polarisierung gefordert wird.

Produktvorteile

- Einfache Verarbeitung auf konventionellen Kunststoffverarbeitungsanlagen
- Hohe Polarität und verbesserte Haftungseigenschaften
- Gute Additivkompatibilität
- Gute Füllstoffaufnahme

Anwendungen

Aufgrund des geringen Maleinsäureanhydrids Gehalts (Lucofin®1492M HG) eine hohe Haftung zu polaren Materialien und wird allein oder in Kombination mit Lucofin®66HK oder Lucofin®662K J verwendet

- für hohe Füllstoffladungen wie Aluminiumtrihydroxid oder 2DH Magnesiumdihydroxid in HII' Halogenfreie Flammschutzmittel
- zur Verbesserung und Schlagzähigkeitsverbesserung von ansich spritzbaren Kunststoffen (PA5, PA5.5, P, PE, PP, P/PE inkl. PEClaten)
- zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit von PA5 über die Einstellung der Schmelzviskosität
- als Verträglichkeitsvermittler an sich unverträglicher Polymermischungen wie PA5/PP oder PP/PE

zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit in

- Holz-Kunststoff-Verleimstoffen (PE/PF)
- Polymerlaserschichten z. B. Laser

Verarbeitung

Lucofin®1492M HG kann auf allen für Thermoplaste geeigneten Maschinen verarbeitet werden. Für die Extrusion werden folgende Richtwerte empfohlen: ca. 856L/min - 796L/min

Chemische Beständigkeit

Lucofin®1492M HG ist beständig gegen Wasser und wässrige Lösungen, gegen Salze sowie gegen verdünnte Säuren und Basen. Durch aliphatische, aromatische und Halogen-substituierte Kohlenwasserstoffe kann Lucofin®1492M HG teilweise angegriffen und teilweise gelöst werden.

Im Hinblick auf die organoleptische Sensorik (Geruch) muss der Endverbraucher entsprechende Vorkehrungen durchführen, da Lucofin®1492M HG organoleptisch nicht unbedenklich ist.

Verpackung und Lagerung

• Granulat in 25 kg Netto, 4 Standard-Paletten Netto: 89 kg.

Lucofin®1492M HG ist trocken, unterhalb 60°C und geschützt vor direkter UV-Strahlung zu lagern, da es sonst zu Verpackungsschäden oder Materialverfärbung kommen kann. Die Lagerdauer von max. 52 Monaten nach (Lieferung sollte nicht überschritten werden). Es ist darauf zu achten, dass angebrochene Packware schnellstmöglich verarbeitet wird. Auch sollte ein Stapeln von Paletten vermieden werden. Eine Verewendung nach Ablauf der 52 Monate sollte durch Qualitätskontrollen zur Sicherstellung der Produkteigenschaften begleitet werden.

Richtwert	Form	Einheit	Lucofin®1492M HG
21 l/6 L * 0,85 kgf	4 + 88 : :	g/6 min	7,6-9,6
Pfropfungsgrad Maleinsäureanhydrid Gehalt	% -4pektroskopie	m.Q	6,8-8,6

Die angegebenen Richtwerte sind Richtwerte und nicht als Spezifikationen anzusehen.

Disclaimer: Das hier genannte Produkt ist nicht für medizinische, pharmazeutische und Healthcare-Anwendungen vorgesehen, auch werden solche Anwendungen von uns nicht unterstützt. Die hierin enthaltenen Informationen sind nach unserem Wissen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung korrekt und zuverlässig, doch übernehmen wir keine Haftung für die Richtigkeit und Vollständigkeit dieser Informationen. O+, -A, übernimmt keine Garantie über die Anwendbarkeit oder Eignung für einen bestimmten Zweck. Es ist die Verantwortung des Kunden unsere Produkte zu prüfen und zu testen und sich selbst von der Eignung der Produkte für einen bestimmten Zweck zu überzeugen. Es ist für die sichere und legale Verwendung, Verarbeitung und Handhabung unserer Produkte verantwortlich. Die hierin enthaltenen Informationen beziehen sich ausschließlich auf unsere Produkte, wenn sie nicht in Verbindung mit den anderen Materialien eingesetzt werden. Eine Haftung in Bezug auf die Verwendung unserer Produkte zusammen mit anderen Materialien wird ausgeschlossen.

Polyester Resin from **INVISTA**

Polyclear® Refresh PET 1101

Typical Property Data Sheet

Product Description

Polyclear® Refresh PET 1101 is a copolymer packaging resin with a nominal intrinsic viscosity of 0.83 dl/g. Packaging made from Polyclear® Refresh PET 1101 has excellent clarity and is noted for its dimensional stability, which prevents shrinkage and expansion of the container. Polyclear® Refresh PET 1101 is used successfully in carbonated soft drink bottles and other applications such as water bottles, food containers, and packaging for household goods.

This polymer complies with the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act for certain food contact applications. Please contact INVISTA for specific FDA clearances.

Polyclear® Refresh PET 1101 offers excellent performance in maximum throughput, stretch-blow molding applications. Preforms made from Polyclear® Refresh PET 1101 allow maximum blowing throughputs by quickly heating in the infrared (IR) ovens. In addition, bottles made from Polyclear® Refresh PET 1101 are low-stick, which eases handling issues.

Containers made from INVISTA PET are lightweight, have excellent clarity, and are shatterproof. With the important advantage of being totally recyclable, PET is the packaging material of choice.

Property	Value	Test Method
General		
Intrinsic Viscosity*	0.83 ± 0.02	1% Solution in Dichloroacetic Acid*
Melting Point (°C)	252 Maximum	DSC**
Carboxyl End Groups (meq/kg)	45 Maximum	Titration**
Diethylene Glycol Content (wt%)	1.8 Maximum	Gas Chromatography**
Acetaldehyde Content (ppm)	2.0 Maximum	Gas Chromatography**
Density (g/ cm ³)	1.39 Minimum	Pycnometer
Fines (%)	0.05 (through 28 mesh)	Gravimetric determination as manufactured
Moisture Content (%)	0.1 Maximum	Karl Fisher Titration as manufactured
Crystallinity (%)	50 Minimum	Pycnometer
Bulk Density (packed) lb/ ft ³	52 Minimum	***
Chip Size (grams / 100 chips)	2.0 Maximum	

* Determined by conversion of solution viscosity to intrinsic viscosity using an empirical correlation developed by INVISTA equivalent to ASTM method D-4603.

** Internal method

*** Not equivalent to bulk density found with fully packed, larger quantities.

INVISTA S.à r.l.
Polymer and PET Resins Business
4235 S. Stream Blvd
One Lake Pointe Plaza
Charlotte, NC 28217

Issue Date: April 30, 2010

Additional Information:
<http://polymers.INVISTA.com/contact>

Revision # 8