

DIPLOMARBEIT

Evaluierung des mechanischen Recyclingpotentials von Kunststoffverpackungen für Tiefgekühlte Lebensmittel

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieur/in

eingereicht an der Technischen Universität Wien von

Sascha FACOL

Matrikelnummer 01126836

ausgeführt am Institut E308-02-1 - Forschungsgruppe Strukturpolymere

unter der Leitung von

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

Mitbetreuung: Seier, Martina; Dipl.-Ing.in Dr.in

Ort und Datum

Unterschrift

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

Eidesstattliche Erklärung

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

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einem_r Beurteiler_in zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachter_innen beurteilten Arbeit überein.

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

Ort und Datum

Unterschrift

Vorwort

Ich bedanke mich sehr herzlich bei meinen Betreuerinnen Dipl.-Ing.in Dr.in Martina Seier und Ao.Univ.Prof.in Dipl.-Ing.in Dr.in mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki für die Unterstützung und engagierte Betreuung während der Erstellung meiner Arbeit. Vor allem möchte ich mich dafür bedanken, dass ich jederzeit sehr rasches Feedback zu meinen offenen Fragen und eingereichten Ergebnissen bekommen habe, wodurch mein Arbeitsfluss sehr erleichtert wurde.

Des Weiteren möchte ich meiner Familie und meinen Freunden für die Motivation und Unterstützung danken.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für beiderlei Geschlecht.

Abkürzungsverzeichnis

<i>LIMI</i>	Lichtmikroskop
<i>DSC</i>	Dynamische Differenzkalorimetrie
<i>FTIR</i>	Fourier-Transform-Infrarotspektrometer
<i>MFI</i>	Schmelzflussindex (Melt Flow Index)
<i>PE</i>	Polyethylen
<i>LD-PE</i>	Low Density Polyethylen
<i>HD-PE</i>	High Density Polyethylene
<i>PP</i>	Polypropylen
<i>PA</i>	Polyamid
<i>PET</i>	Polyethylenterephthalat
<i>PVC</i>	Polyvinylchlorid
<i>PS</i>	Polystyrol
<i>SiC</i>	Siliziumcarbid
<i>Min</i>	Minute
<i>Sek</i>	Sekunde
<i>D</i>	Federkonstante
<i>F</i>	Kraft
ΔL	Längenänderung
<i>L₀</i>	Stablänge im unbelasteten Zustand
<i>A</i>	Fläche
ε	Dehnung
σ	Mechanische Spannung
<i>E</i>	E-Modul

R_m	Zugfestigkeit
$R_{e,H}$	Obere Streckgrenze
$R_{e,L}$	Untere Streckgrenze
A_L	Lüdersdehnung
A_G	Gleichmaßdehnung
A	Bruchdehnung
η	Dehnaviskosität
L	Länge
B	Breite
H	Höhe
σ	Standardabweichung
MW	Arithmetisches Mittel

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	ii
Abkürzungsverzeichnis	iii
Inhaltsverzeichnis.....	v
Kurzfassung	viii
Abstract.....	ix
1. Einleitung.....	1
1.1. Mehrschichtverpackungen	2
1.2. Aufbau von Mehrschichtverpackungen	2
1.2.1. Monolayer.....	2
1.2.2. Multilayer Verpackungen	3
1.3. Herstellung von Tiefkühlverpackungen	7
1.4. Materialien	7
1.4.1. Polyethylen - PE	7
1.4.2. Polypropylen - PP	8
1.4.3. Polyethylenterephthalat – PET	9
1.4.4. Polyamid – PA.....	10
1.5. Herstellungsverfahren	11
1.5.1. Extrusion.....	11
1.5.2. Castextrusionsverfahren.....	12
1.5.3. Blasextrusionsverfahren	12
1.5.4. Laminieren.....	13
1.6. Recycling von Kunststofffolienabfällen.....	14
1.6.1. Mechanisches Recycling	14
1.6.2. Chemisches Recycling	15
1.6.3. Thermische Verwertung.....	15
1.6.4. Deponierung	15
2. Analysenmethoden und Durchführung	17
2.1. Lichtmikroskop - LIMl	18

2.2. Fourier-Transform-Infrarotspektrometer - FTIR.....	21
2.3. Dynamische Differenzkalorimetrie - DSC	23
2.3.1. Probenvorbereitung	23
2.4. Blends	25
2.5. Herstellung Prüfkörper	26
2.6. Rheologie	28
2.7. MFI.....	28
2.7.1. Parameter:.....	29
2.8. Rheometer	29
2.9. Zugversuch	30
2.10. Kerbschlagzugversuch	33
2.11. Blasextrusion.....	34
2.12. Dehnrheologie.....	35
3. Auswertung und Ergebnisse.....	37
3.1. Verpackungskennzeichnung	38
3.2. FTIR-Ergebnisse	41
3.3. LIM-ERgebnisse	46
3.4. DSC-Ergebnisse	50
3.5. MFI-Ergebnisse.....	54
3.6. Rheometer-Ergebnisse	56
3.7. Dehnrheologie Ergebnisse.....	57
3.8. Zugversuch-Ergebnisse	59
3.9. Kerbschlagzugversuch-Ergebnisse.....	61
3.10. Folienblasversuch Ergebnisse	62
4. Zusammenfassung und Ausblick.....	63
5. Anhang	66
5.1. Literaturverzeichnis	66
5.2. Abbildungsverzeichnis	70
5.3. Tabellenverzeichnis	75
5.4. Formelverzeichnis	76
5.5. FTIR-Spektren.....	77

5.6. LIM1-Aufnahmen.....	82
5.7. DSC-Kurven	92
5.8. Messdaten Blends.....	95

Kurzfassung

Mit der zunehmenden Verbreitung von Kunststoffen wächst auch die Menge an Abfall kontinuierlich an. Insbesondere die Verwendung von Einwegprodukten wie Verpackungen trägt zu diesem Problem bei. Um natürliche Ressourcen und die Umwelt zu schonen, sollte das verwendete Material so lange wie möglich im sogenannten Werkstoffkreislauf durch Recycling gehalten werden. Dies ermöglicht eine nachhaltige Nutzung und Wiederverwendung der Materialien, um deren Lebensdauer zu verlängern und den Bedarf an neu produzierten Kunststoffen zu reduzieren.

Die Arbeit befasst sich mit der Analyse und dem Recycling von Tiefkühlverpackungen in der Lebensmittelindustrie. Diese Packungen sind Großteils mehrschichtig und aus unterschiedlichen Materialien aufgebaut, was die Wiederverwertung erschwert da verschiedene Kunststoffe üblicherweise nicht miteinander verträglich sind (Veränderung der Materialeigenschaften). Im ersten Teil werden diese Verpackungen analysiert und charakterisiert. Im Zweiten Teil werden die Verpackungen in Gruppen, anhand der eingesetzten Polymere, aufgeteilt und aufbereitet, um neue Folien und Prüfkörper herzustellen. Mittels der hergestellten Folien und Prüfkörper soll die Recyclingfähigkeit der Tiefkühlverpackungen beurteilt werden.

Während der Versuche und beim Auswerten der gewonnenen Daten wurde ersichtlich, dass sortenreine Rezyklate sowie Blends aus PE und PP die besten Eigenschaften aufweisen. Vor allem bei der Verwendung von PET mit PE oder PP entsteht kein homogenes Gemisch und das Rezyklat weist nicht die gewünschten mechanischen Eigenschaften auf.

Abstract

As plastics become more widespread, the amount of waste is also continually increasing. In particular, the use of disposable products such as packaging contributes to this problem. In order to protect natural resources and the environment, the material used should be kept in the so-called material cycle for as long as possible through recycling. This enables sustainable use and reuse of materials to extend their lifespan and reduce the need for newly produced plastics.

This thesis deals with the analysis and recycling of frozen packaging in the food industry. These packages are mostly multi-layered and made of different materials, which makes recycling difficult because different plastics are usually not compatible with each other (change in material properties). In the first part, the packaging is analyzed and characterized. In the second part, the packaging is divided into groups based on the polymers used and processed in order to produce new films and test specimens. The recyclability of the frozen packaging is to be assessed using the films and test specimens produced.

During the tests and when evaluating the data obtained, it became clear that pure recyclates and blends made of PE and PP have the best mechanical properties. Especially when using PET with PE or PP, a homogeneous mixture is not created and the recyclate does not have the desired mechanical properties.

1. Einleitung

Nachdem das Thema Umweltschutz und Recycling eine zunehmend wichtigere Rolle im Alltag spielt, befasst sich diese Arbeit mit dem Aufbau von Tiefkühlverpackungen und der quantitativen Charakterisierung der bei der Herstellung eingesetzten Materialien. Diese Informationen sollen mit dem Einsatz unterschiedlicher Messmethoden gewonnen werden. Dazu zählen:

- Lichtmikroskopie (LIMI)
- Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)
- Fourier-Transform-Infrarotspektrometrie (FTIR)

Mit diesen Methoden sollen insgesamt 60 Verpackungen analysiert und anschließend anhand der gewonnenen Daten in Gruppen eingeteilt werden.

Die Gruppierungen richten sich nach enthaltenen Kunststoffarten im Verpackungsmaterial.

Die Verpackungen werden im Anschluss zerkleinert und neu extrudiert. Mit dem gewonnenen Material werden Prüfkörper hergestellt und mit folgenden Verfahren untersucht:

- Schmelzflussindex Messung (MFI)
- Rheologische Prüfung
- Zugversuch
- Kerbschlagzugversuch

Mit den gewonnenen Daten sollen Aussagen zur Recyclingfähigkeit der Tiefkühlverpackungen getroffen werden.

Insofern möglich, wurden außerdem Folien mit den Rezyklaten auf einer Mikro Blasanlage hergestellt, um die Verwertbarkeit in ähnliche Produkte zu demonstrieren.

1.1. Mehrschichtverpackungen

Etwa 20% aller Verpackungsfolien bestehen aus sogenannten Mehrschicht-Verpackungsfolien, auch Multilayer-Folien genannt. [1] Diese stellen beim Thema Recycling eine Herausforderung dar, weil sie meistens aus unterschiedlichen Kunststoffarten bestehen, welche nur schwer mechanisch getrennt werden können. Die einzelnen Schichten sind in der Regel 10-100µm breit und mit dem freien Auge kaum erkennbar.

Der große Vorteil von Mehrschichtverpackungen besteht in ihrer flexiblen Einsatzweise. Die unterschiedlichen Kunststoffe können kombiniert werden um die richtigen Eigenschaften für den gewünschten Anwendungsbereich zu erzielen. Zu den wichtigsten Eigenschaften zählen [2, 3]:

- Schutz des Inhalts (Barrierewirkung gegen Licht, Gase, Aromen etc.)
- Geringes Gewicht
- Designmöglichkeiten
- Flexible Einsatzweise
- Verbesserte Stabilität

1.2. Aufbau von Mehrschichtverpackungen

1.2.1. Monolayer

Ein Monolayer bezeichnet eine Folienverpackung die nur aus einer Schicht besteht. Diese Verpackungen sind einfach herzustellen und bestehen aus einem einzigen Material, weshalb sie auch leichter zu recyceln sind.

Die Herstellung von Monolayer Verpackungsfolien ist kostengünstig, weshalb sie gerne verwendet werden, wenn keine außergewöhnlichen Anforderungen bei der Betrachtung des Schutzes für das Produkt auftreten.

Eine Monolayer Verpackung ist homogen und bietet ein geringes Risiko des Versagens essentieller Schichten (z.B.: Barriere- oder Siegelschicht). [4]

1.2.2. Multilayer Verpackungen

Multilayer Verpackungen können aus zwei oder mehr Schichten bestehen. Bei den untersuchten Proben, waren Verpackungen mit bis zu 5 Schichten erkennbar. Die wichtigsten Eigenschaften wurden bereits genannt.

Jedoch bieten Multilayer Verpackungen auch Nachteile:

- Schichtversagen
- Teuer und komplex in der Herstellung
- Schwierig zu Recyclen

Die Wahl der Verpackung hängt vom Budget und den spezifischen Anforderungen des Inhalts ab. [5]

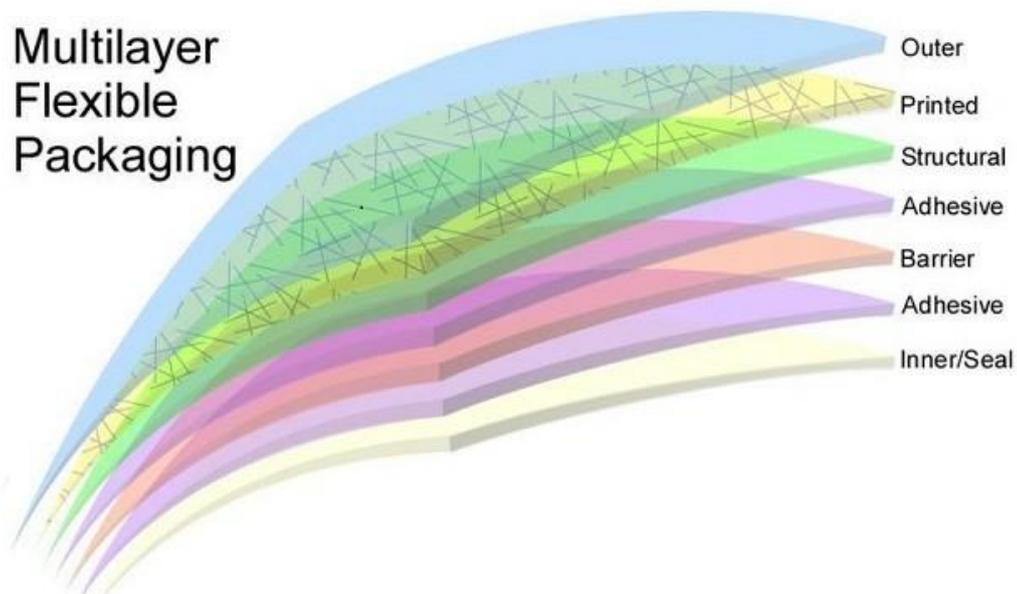


Abbildung 1: Schichten einer Multilayer Verpackung [6]

In Abbildung 1 sieht man den Aufbau von Multilayer Verpackungen. Die einzelnen Schichten haben unterschiedliche Funktionen.

- Outer (Aussenschicht): Beschichtung um den Druck zu schützen.
- Printed (Druckschicht): Oberfläche für den Druck, üblicherweise aus PE oder PET.
- Structural (Strukturschicht): Verantwortlich für die Form der Verpackung sowie für die Stabilität.
- Adhesive (Adhäsionsschicht): Verbindet zwei unterschiedliche Polymere.
- Barrier (Barrierschicht): Verhindert das Eindringen von Sauerstoff in die Verpackung.
- Inner/Seal (Innenschicht / Siegelschicht): Besitzt einen niedrigen Schmelzpunkt und wird in der Regel heißversiegelt. Schützt die Lebensmittel. [7]

Die Bewertung der Barriereigenschaften erfolgt anhand verschiedener Kriterien wie der Gasdurchlässigkeit, Feuchtigkeitsbarriere und Schutz vor UV-Strahlen.

Der Gasdurchgang hängt hierbei von der Art des Gases, dem Partialdruck zwischen Innen- und Außenseite, sowie der Struktur und Dicke der Kunststoffolie ab. [8]

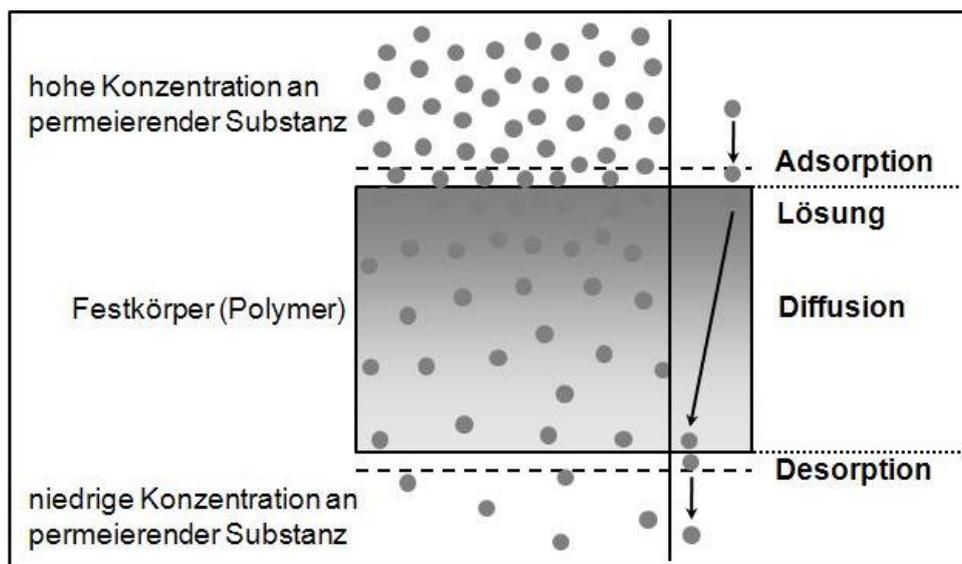


Abbildung 2: Permeationsverlauf durch Polymer [9]

In Abbildung 2 ist der Permeationsverlauf durch ein Polymer schematisch dargestellt.

- Adsorption an der Materialoberfläche
- Diffusion durch die Schicht
- Desorption an der Innenseite

In Abbildung 3 ist die Sauerstoffdurchlässigkeit in Abhängigkeit von der Wasserdampfdurchlässigkeit für verschiedene Kunststoffverpackungen dargestellt.

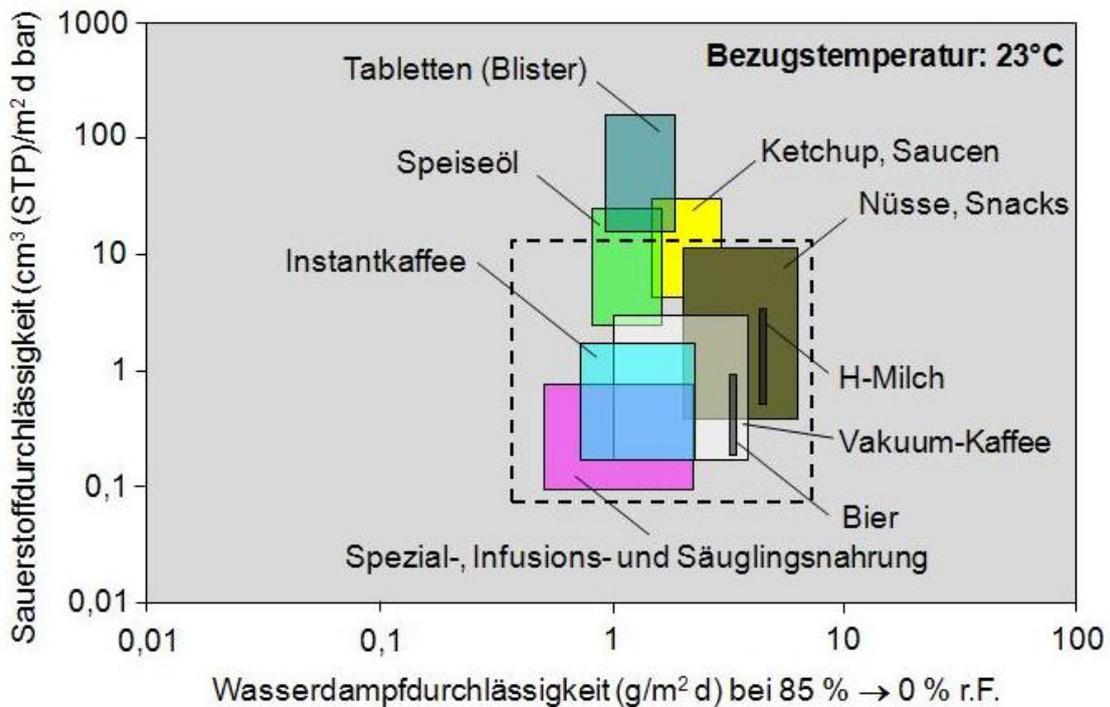


Abbildung 3: Verpackungsfunctionalitäten für Lebensmittel und pharmazeutische Produkte [10, 11]

Die wichtigsten Stoffe, die in der Verpackungsindustrie eingesetzt werden sind in Abbildung 4 dargestellt, sowie die äußeren Einflüsse, gegen die sie eine Barrierefunktion aufweisen.

Barriere gegen	Kunststoff	Bemerkung
Wasserdampf	PE-HD, PP	1
	PE-LLD, EVAC, EMMA, PVDC, LCP (Polyester), (weniger gut: PVC, PET, PEN)	4
	PTFE, PVDF, PCTFE, ETFE	2
O ₂	TPE-U, EVAL+PA 6I/PA 6T, PA 6/66, PA 11/12, PVF, LCP (Polyester), (weniger gut: PA 6, PA 66, PVC)	
	EVAL, Abmischungen mit EIM oder amorphes PA	3
	PVDC	4
	PAN	5
	PET, PEN, PET/PEN	6
CO ₂	EVAL	3
	PET, PEN, PET/PEN	6
	PA 11/12	
N ₂	EVAL	3
Kraft-u. Aromastoffe	EVAL	3
	PET, PEN, PET/PEN, (PEN besser als PET)	6
Fette, Öle, Kohlenwasserstoffe u. andere Lösemittel	PA 6, TPE-U, EVOH+PA 6I/PA 6T	

Bemerkung: 1. nicht gegen N₂, O₂, CO₂; 2. schlechte Haftung, teilweise nur Beschichtung möglich; 3. reines EVAL: hohe Wasserdampfdurchlässigkeit und Feuchteabhängigkeit der Durchlässigkeit; 4. PVDC: geringe Verarbeitungsstabilität, Bedeutung sinkt; 5. keine Lebensmittelzulassung, kein Haftvermittler; 6. Durchlässigkeiten abhängig von Verarbeitung und Verstreckung (Orientierung und Kristallinität)

Abbildung 4 : Barriereigenschaften einiger Kunststoffe [12]

1.3. Herstellung von Tiefkühlverpackungen

Die Herstellung von Tiefkühlverpackungen geschieht unter dem Gesichtspunkt, dass die Verpackungen niedrige Temperaturen aushalten können müssen und die Qualität der Lebensmittel erhalten bleibt.

1.4. Materialien

1.4.1. Polyethylen - PE

Polyethylen (Abbildung 5) ist ein Kunststoff der aus Ethylen und einem Katalysator über Kettenpolymerisation gewonnen wird. Das dabei entstandene Pulver wird getrocknet und anschließend extrudiert und PE-Pellets zu gewinnen. Polyethylen ist sehr flexibel und hat eine hohe Beständigkeit gegen Kälte und Feuchtigkeit. Außerdem bietet es eine ausgezeichnete Barrierefunktion.

Man unterscheidet zwischen Low Density Polyethylen und High Density Polyethylen. [13]

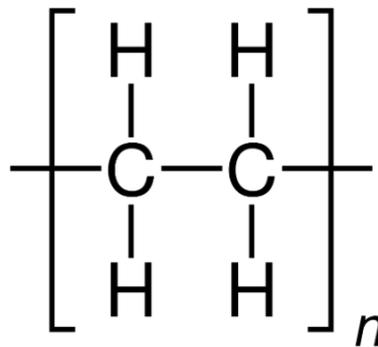


Abbildung 5: Strukturformel PE [14]

LD-PE hat wie der Name schon sagt eine niedrige Dichte und wird durch anlegen sehr hoher Drücke (1000-3500bar) im Rohrschleifenreaktor hergestellt. Durch den geringen Durchmesser des Reaktors, ist der Durchsatz in der Regel geringer, als bei HD-PE Herstellungsverfahren.

LD-PE ist aufgrund der geringen Dichte sehr flexibel und Dehnbar, weshalb es sehr gut geeignet ist, um Folien herzustellen. [13]

LLD-PE wird ebenfalls in einem Rohrschleifenreaktor bei hohen Drücken hergestellt. LLDPE steht für linear low density polyethylen und es weist ähnliche Eigenschaften wie LD-PE auf (sehr flexibel, dehnbar) jedoch hat es eine höhere Zugfestigkeit und Schlagfestigkeit als LDPE. [40]

HD-PE zeichnet sich durch eine höhere Dichte aus. Es wird in einem sogenannten LOOP-Reaktor (50-70bar) hergestellt und anschließend in einen Gasphasenreaktor geleitet um die gewünschten Eigenschaften besser einstellen zu können.

HD-PE besitzt eine hohe Zugfestigkeit und Steifigkeit, sowie einen hohen Schmelzpunkt von 135°C. Es wird unter anderem für Kunststoffrohre und Lebensmittelverpackungen eingesetzt. [13]

1.4.2. Polypropylen - PP

Polypropylen (Abbildung 6) wird ähnlich wie Polyethylen über eine Kettenpolymerisation hergestellt. Als Rohstoff wird Propylen verwendet, welcher mit einem Katalysator im LOOP-Reaktor gemischt wird. Das entstehende Pulver wird anschließend trocken geblasen und in einem Extruder aufgeschmolzen und extrudiert. Die Zugabe von Additiven erfolgt vor dem Aufschmelzen im Extruder, um die Eigenschaften des Produkts zu verbessern. [15]

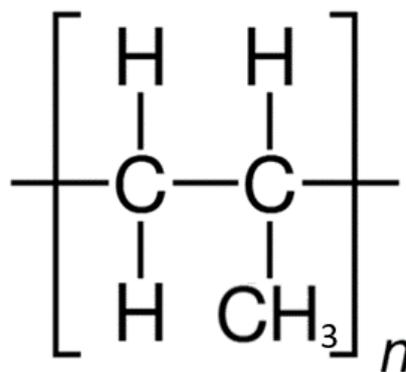


Abbildung 6: Strukturformel PP [14]

Zu den wichtigsten Eigenschaften von Polypropylen zählen:

- Hohe Festigkeit und Steifigkeit
- Gute Chemikalienbeständigkeit
- Gute Wärmebeständigkeit
- Geringe Wasseraufnahme
- Gute elektrische Isolierung
- Leicht und flexibel
- Gute Recyclingfähigkeit
- Lebensmittelechtheit

Deshalb findet Propylen bei einer Vielzahl von Anwendungen Einsatz, unter anderem in der Lebensmittelindustrie oder als Isoliermaterial für Kabel. [15]

1.4.3. Polyethylenterephthalat – PET

Polyethylenterephthalat (Abbildung 7) wird aus Ethylenglykol und Terephthalsäure unter Hitzeeinwirkung hergestellt. Es besitzt ähnliche Eigenschaften wie Polypropylen und kann zudem eine hohe Transparenz aufweisen. Es wird vor allem in der Lebensmittelindustrie eingesetzt (PET-Trinkflaschen, Tiefkühlverpackungen, etc.). Außerdem findet es im medizinischen Bereich Anwendung. [5, 14]

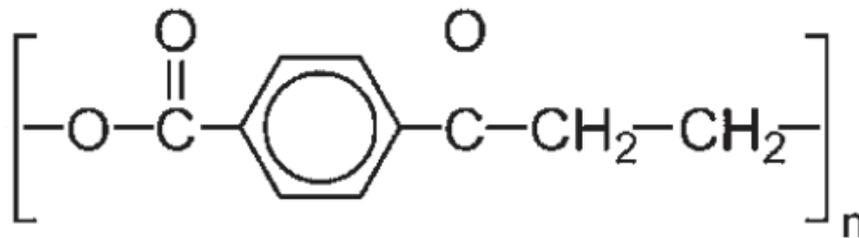


Abbildung 7: Strukturformel PET [14]

1.4.4. Polyamid – PA

Es gibt eine Vielzahl von Polyamid Verbindungen (Abbildung 8), wobei bei Tiefkühlverpackungen hauptsächlich PA6 verwendet wird. Die Zahl 6 steht für die Anzahl der Kohlenstoffatome im Monomer. PA6 wird durch eine ringöffnende Polymerisation aus Lactamen hergestellt. PA-Folien zeichnen sich vor allem durch ihre hohe Festigkeit und Pasteurisiertbarkeit aus. [5, 14]

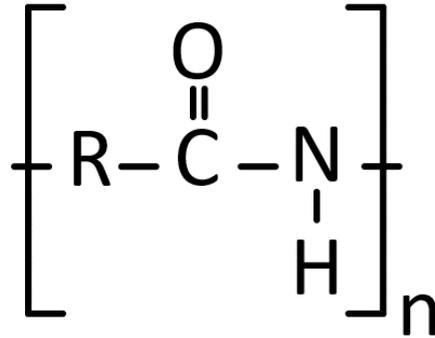


Abbildung 8: Strukturformel PA [14]

1.5. Herstellungsverfahren

1.5.1. Extrusion

Bei der Extrusion (Abbildung 9) werden Kunststoffpellets oder Pulver aufgeschmolzen und vermischt. Dies geschieht durch den Einsatz von sogenannten Schnecken, die das Material fördern und dabei durchmischen. Der Mantel des Extruders ist beheizt, wodurch das Material aufgeschmolzen wird. Das Extrudat kann durch eine Lochplatte gepresst werden, wo ein Messerring für die Erzeugung von Pellets sorgt. Man kann aber auch direkt Folien herstellen mit dem sogenannten Castextrusionsverfahren oder dem Blasextrusionsverfahren.

[16]

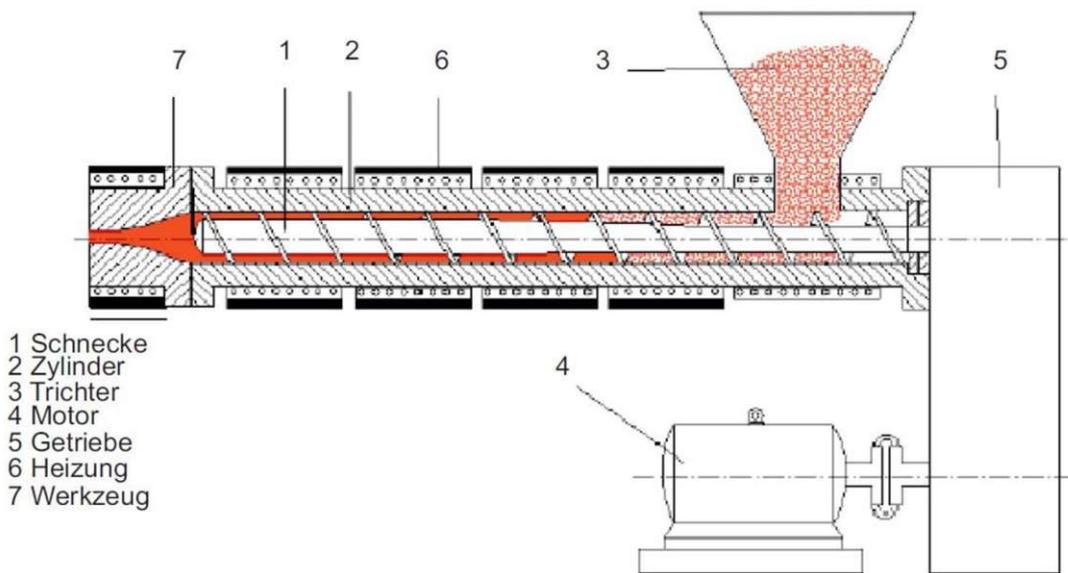


Abbildung 9: Einschneckenextruder [17]

1.5.2. Castextrusionsverfahren

Bei der Castextrusion (Abbildung 10) wird das aufgeschmolzene Material durch eine Flachdüse oder Schlitzdüse gepresst. Die Form und Dicke der entstehenden Schicht wird durch die Geometrie der Düsen bestimmt. Am Austritt wird das Material abgekühlt. Dies kann durch eine gekühlte Walze oder durch ein Wasserbad erfolgen. Mit der Castextrusion kann man auch mehrschichtige Folien herstellen. Dabei benutzt man mehrere Extruder, welche die Ausgangsstoffe aufschmelzen und zu einer Schichtformungseinheit leiten. Diese besteht aus mehreren Düsen, die die Dicke und Form der jeweiligen Schicht bestimmen. Anschließend wird die Folie wieder gekühlt. [18]

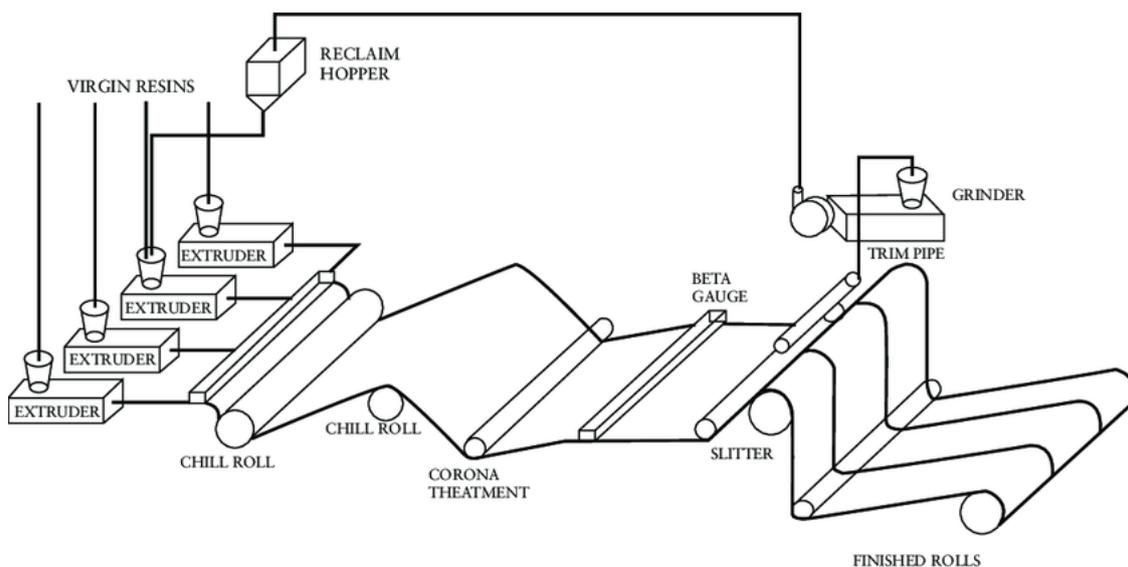


Abbildung 10: Castextrusion [19]

1.5.3. Blasextrusionsverfahren

Mit dem Blasextrusionsverfahren (Abbildung 11) können Hohlkörper wie Schlauchfolien hergestellt werden.

Zu Beginn wird das Ausgangsmaterial in einem Extruder aufgeschmolzen und anschließend über eine Ringdüse ausgeführt. Durch einen Luftstrom in der Mitte

der Düse wird das Material nach oben geblasen und dabei in Form gebracht. Währenddessen wird die Folie durch den Luftstrom kontinuierlich gekühlt. Die Eigenschaften wie Größe und Form des Hohlkörpers können durch die Wahl der Düse und die Anpassung des Luftstroms beeinflusst werden. Die Extrudierte Folie wird im Anschluss über Walzen geführt und kann dann aufgewickelt werden. [18]

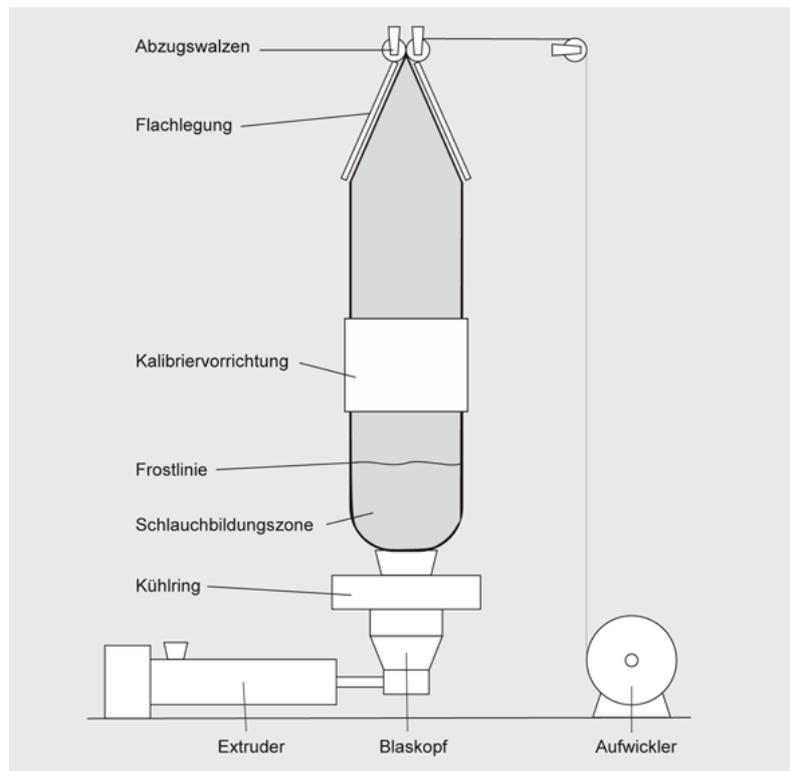


Abbildung 11: Blasextrusion [20]

1.5.4. Laminieren

Das Ziel des Laminierens ist es, zwei oder mehrere Folien zu verbinden, die nicht durch reine Castextrusion oder Blasextrusion hergestellt werden können. Dies ist vor allem bei der Herstellung von Mehrschichtverbundfolien die PE, PET und / oder PA enthalten der Fall. Die einzelnen Schichten werden durch Extrusion hergestellt und anschließend mit einer Klebeschicht, unter Einsatz von Hitze und Druck verbunden um die Eigenschaften der einzelnen Folien zu kombinieren.

Es gibt auch die Möglichkeit die Folien ohne Hitze zu verbinden, mit dem sogenannten Kaltschmelzlaminierverfahren. Dabei erfolgt die Verbindung von Folien und Klebeschicht ausschließlich mit Druck. [21]

1.6. Recycling von Kunststofffolienabfällen

Voraussetzung für das Kunststoffrecycling ist das Sammeln der post-consumer Abfälle. Hierzu ist vor allem die Mitarbeit der Bevölkerung gefragt, um den Kunststoffabfall vom restlichen Abfall zu trennen und separat zu entsorgen. In Wien gibt es dafür die „Gelbe Tonne“ in der Leichtverpackungen wie Kunststofffolien und Aluminiumdosen gesammelt werden. [22]

Für die gesammelten Kunststoffverpackungen gibt es unterschiedliche Recyclingmöglichkeiten. In einer Studie von 2017 wurde ermittelt, dass etwa 28% der Abfälle stofflich verwertet werden, 71% der Abfälle thermisch und 1% werden deponiert. Nachdem der prozentuelle Anteil der stofflich verwerteten Abfälle nur etwa ein Viertel des Gesamtabfalls abdeckt hat die Europäische Kommission höhere Recyclingquoten definiert. Bis zum Jahr 2030 sollen mind. 50% der Kunststoffabfälle stofflich verwertet werden. [23, 24]

1.6.1. Mechanisches Recycling

Beim mechanischen Recycling werden die Kunststoffverpackungen geschreddert, gereinigt und anschließend extrudiert. Nachdem das Ausgangsmaterial während dem Prozess nicht chemisch verändert wird, ist eine gute Sortierung vor dem Schreddern wichtig. Der Kunststoffabfall wird deshalb vor dem Schreddern nach Material und Farbe sortiert.

Dieser Schritt ist besonders wichtig, da nur mit einem möglichst homogenen Ausgangsmaterial, gute Endergebnisse erzielt werden können.

Besonders mehrschichtige Kunststoffverpackungen aus unterschiedlichen Materialien stellen eine große Herausforderung beim mechanischen Recycling dar, denn bis dato ist es nicht möglich die einzelnen Schichten wirtschaftlich mechanisch voneinander zu trennen. [25, 26]

1.6.2. Chemisches Recycling

Das chemische Recycling unterscheidet sich stark vom mechanischen Recycling. Die Kunststoffabfälle werden unter hohem Energieaufwand in die einzelnen Oligomere und Monomere zerlegt und diese können anschließend voneinander getrennt werden.

Die gewonnenen Kohlenwasserstoffe können anschließend wieder durch Kettenpolymerisation zu Kunststoffen verarbeitet werden.

Der große Vorteil von chemischem Recycling besteht darin, dass aus den gewonnenen Kohlenwasserstoffen wieder „virgin“ Material hergestellt werden kann. Also Kunststoffe die, die gleichen Eigenschaften besitzen wie das Ausgangsmaterial. Ein weiterer Vorteil ist, dass auch mehrschichtige Verpackungen chemisch recycelt werden können, ohne Abstriche in der Qualität des Endprodukts.

Jedoch wird sehr viel Energie für das chemische Recycling von Kunststoffen benötigt, weshalb im Moment vorwiegend mechanisches Recycling eingesetzt wird. [26]

1.6.3. Thermische Verwertung

Bei der thermischen Verwertung werden die Abfälle als Energiequelle genutzt unter Einwirkung hoher Temperaturen. Die dabei gewonnene Energie kann zur Strom- oder Wärmeerzeugung genutzt werden. [26]

1.6.4. Deponierung

Als Deponierung versteht man die Lagerung von Abfällen auf einer Mülldeponie. Dies ist die letzte zu wählende Option der Abfallbehandlung von Kunststoffabfällen. Österreich ist mit einer Quote von 1% deponierten Kunststoffabfällen auf dem richtigen Weg, jedoch gibt es noch Mitgliedsstaaten der EU in denen mehr als 50% des anfallenden Kunststoffabfalls deponiert werden. [27]

Mechanisches Recycling und chemisches Recycling sind der thermischen Verwertung sowie dem Deponieren vorzuziehen. Jedoch müssen die beiden Verfahren noch optimiert werden. Wie gut das mechanische Recycling von mehrschichtigen Verpackungen aus unterschiedlichen Materialien funktioniert, wird in den Ergebnissen ersichtlich.

2. Analysenmethoden und Durchführung

Für die Untersuchungen wurden 60 Tiefkühlverpackungen im Zeitraum von 01.12.2022 – 15.04.2023 gesammelt und mit Wasser gereinigt. Bei den Verpackungen handelt es sich um post-consumer Abfälle, welche im Normalfall in der „gelben Tonne“ entsorgt werden (Abbildung 12).



Abbildung 12: Beispielfoto Verpackung 19-24

Die gereinigten Verpackungen wurden mit einer Kombination aus Lichtmikroskopie, DSC und FTIR analysiert. Mithilfe der Lichtmikroskopie wurden die einzelnen Schichten der Verpackungen dargestellt. Die vorhandenen Polymere wurden mittels DSC-Analyse bestimmt und mit der FTIR-Analyse wurde das Material der innersten und äußersten Schicht ermittelt.

2.1. Lichtmikroskop - LIM1

Ein Lichtmikroskop wird verwendet um Objekte vergrößert darstellen zu können. Es verwendet eine Lichtquelle, die sich unterhalb des Probenstisches befindet und die Probe durchleuchtet. Meistens hat es mehrere Objektive mit unterschiedlichen Vergrößerungen, die am Objektivrad ausgewählt werden können. Um die Tiefkühlverpackungen mit dem LIM1 untersuchen zu können, müssen sie zuerst vorbereitet werden. [28]

Dazu werden die Folien zugeschnitten (ca. 2x1,2cm groß) und anschließend in einen Probensteg gestellt.

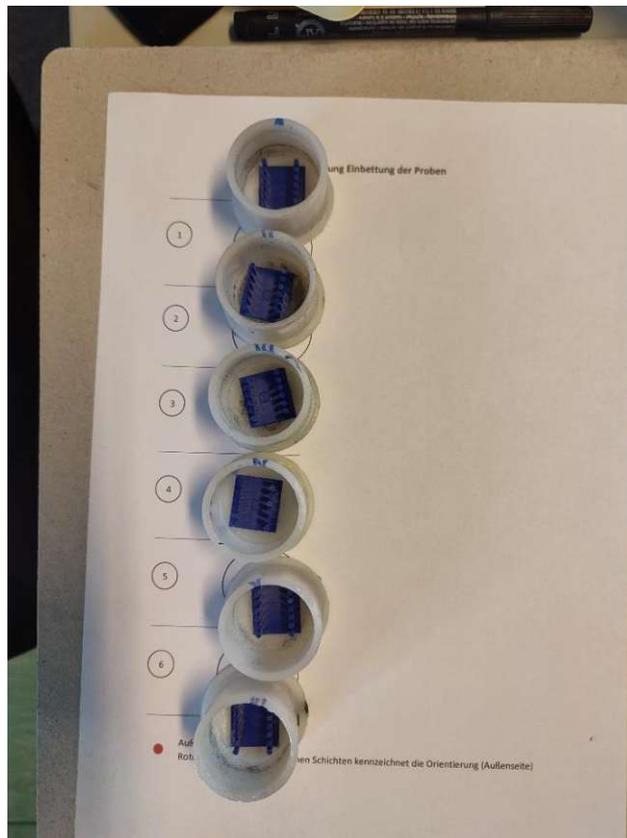


Abbildung 13: Probenvorbereitung

Der Probensteg ist auf der Abbildung 13 in blau erkennbar und befindet sich bereits in der Gussform.

In jeden Probensteg kommen vier zugeschnittene Folien (jeweils zwei der gleichen Verpackung).

Anschließend werden 35g Harz (Araldite AY103) mit 5,6g Härter (REN HY956) vermischt und vorsichtig in die Gussformen gegossen. Füllung etwa bis zur Hälfte der Gussform. Die Proben werden dann für 15 Minuten in eine Vakuumkammer gestellt um Blasen zu reduzieren.

Nach der Vakuumkammer werden die Proben auf einen ebenen Untergrund gestellt um auszuhärten. Dies dauert ca. 1-2h. Anschließend werden die Gussformen vollständig aufgefüllt und härten dann für mindestens 48h aus (Abbildung 14).

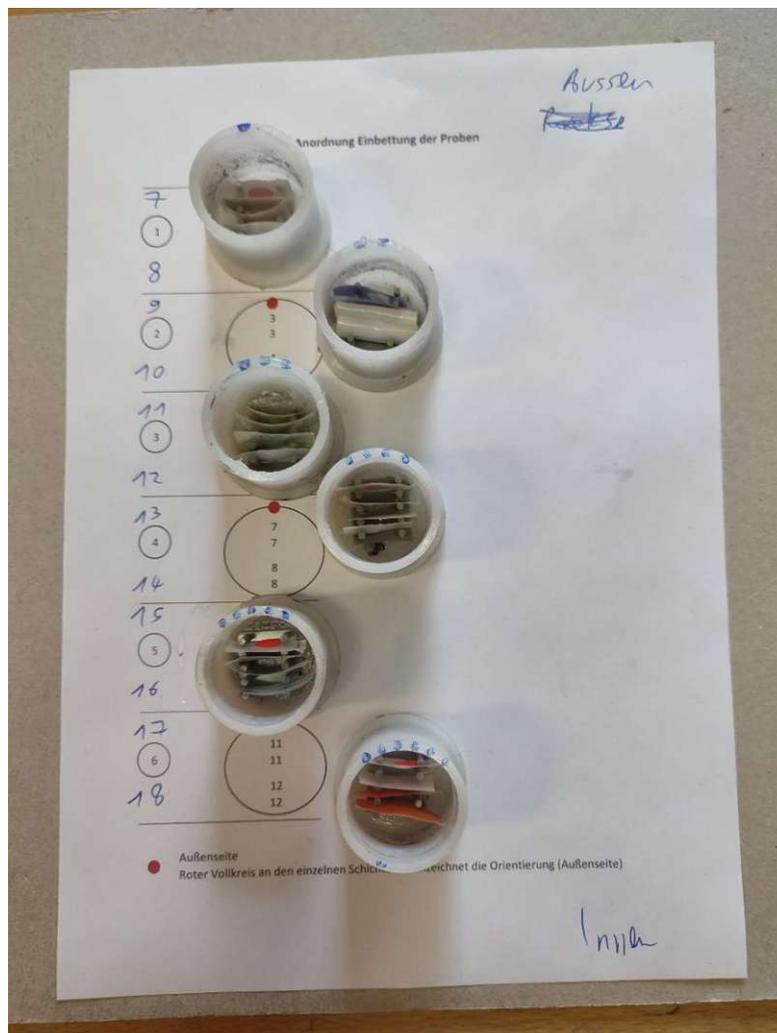


Abbildung 14: Gussformen gefüllt

Nach dem Aushärten, werden die Probenkörper vorsichtig aus den Gussformen entfernt und mit Wasser gewaschen.

Um die Proben mit dem LIM1 untersuchen zu können, muss die Oberfläche der Probenkörper glattgeschliffen werden. Dies geschieht mit einer Struers Schleifmaschine (Tegra Force 31). Die Probenkörper werden in das Gerät eingesetzt und anschließend nach dem Programm in Tabelle 1 geschliffen.

Tabelle 1: Struers Zyklus

Vorgang	Medium	Dauer [min]
Schleifen	SiC, Körnung 500	1
Schleifen	SiC, Körnung 1000	1,5
Schleifen	SiC, Körnung 2400	2
Schleifen	SiC, Körnung 4000	2
Polieren	Diamantfolie 3 μ m	5
Polieren	OP-Chem (Neopren)	3

Nach jedem Schritt, werden die Probenkörper mit Wasser gewaschen und das Schleif-/Poliermedium getauscht. Nach dem letzten Schritt werden die Probenkörper zusätzlich getrocknet.

Im Anschluss können die Proben mit dem Lichtmikroskop (Zeiss Axio Imager M2m) untersucht werden. Das verwendete LIM1 ist an einen Computer angeschlossen, auf den das Bild digital übertragen wird und ausgewertet werden kann. Beispiele für Mikroskopie Bilder verschiedener Verpackungen sind in den Abbildungen 15 und 16 sichtbar.



Abbildung 15: Monolayer

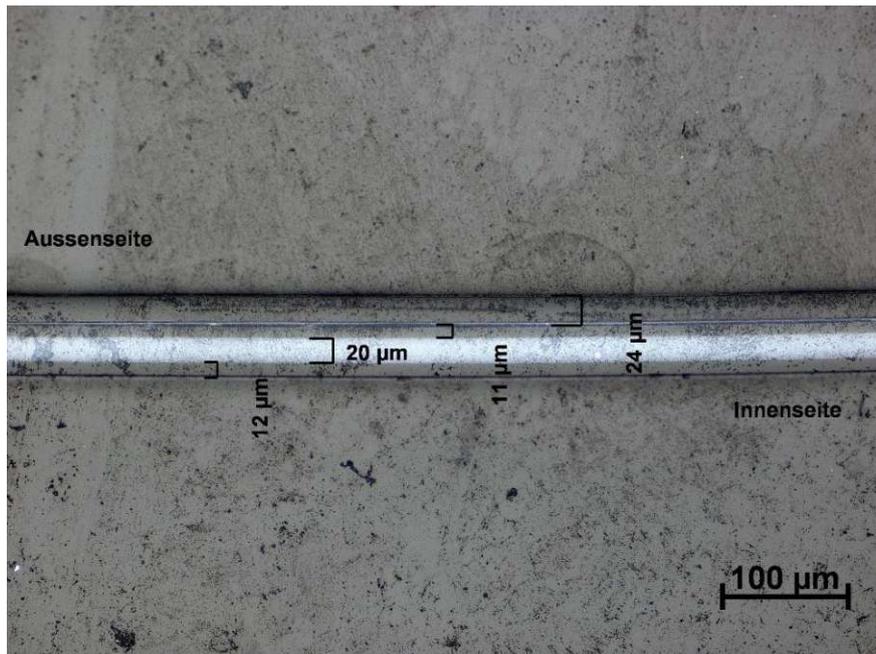


Abbildung 16: Multilayer

2.2. Fourier-Transform-Infrarotspektrometer - FTIR

Das FTIR dient dazu die chemische Zusammensetzung von Materialien zu untersuchen. Es basiert auf dem Prinzip der Wechselwirkungen von Infrarotstrahlung mit dem Probenmaterial.

Das Infrarotlicht durchdringt das Probenmaterial, dabei kommt es zu Absorption und Reflexion. Diese Interaktionen erzeugen ein charakteristisches Spektrum, mit dem man Rückschlüsse auf das zu untersuchende Material ziehen kann.

Die Tiefkühlverpackungen werden gereinigt und anschließend in das FTIR eingespannt. Dies geschieht von beiden Seiten der Verpackung um Daten über die Folie auf der Außen- und Innenseite zu erhalten.

Die FTIR-Analyse erfordert keine aufwendige Vorbereitung des Probenmaterials und die Messung dauert nur wenige Sekunden. Deshalb ist es gut geeignet um schnelle Informationen der zu untersuchenden Folie zu erhalten. [29]

Die Messungen wurden an Bruker Tensor 27 FTIR (Messeinheit DuraSamplIR II) durchgeführt. An der Außen- und Innenseite der Verpackung wurden jeweils mindestens drei Messungen an verschiedenen Stellen durchgeführt.

2.3. Dynamische Differenzkalorimetrie - DSC

Die Dynamische Differenzkalorimetrie (engl. Differential Scanning Calometry) beruht auf der Wärmeänderung bei physikalischen oder chemischen Vorgängen. Die Analysendurchführung beruht auf der Norm DIN EN ISO 11357 [30].

Es wird das zu untersuchende Material mit einer Referenzprobe in eine Messkammer gestellt, welche anschließend erhitzt wird. In unseren Messungen kommt es beim Erhitzen der Proben zu einem physikalischen Übergang von fest zu flüssig. Anschließend wird die Probe wieder abgekühlt und erneut erhitzt.

Die Temperaturdifferenz zwischen Probe und Referenzmaterial ist proportional zur Wärmeenergie. Mit den gemessenen Daten können Rückschlüsse auf den Materialtyp geschlossen werden. [31]

2.3.1. Probenvorbereitung

Zu Beginn wird ein Aluminiumtiegel in der Analysenwaage abgewogen und anschließend tariert. Dann schneidet man das Probenmaterial zu und wiegt ca. 5mg in den Tiegel ein (Abbildung 17).

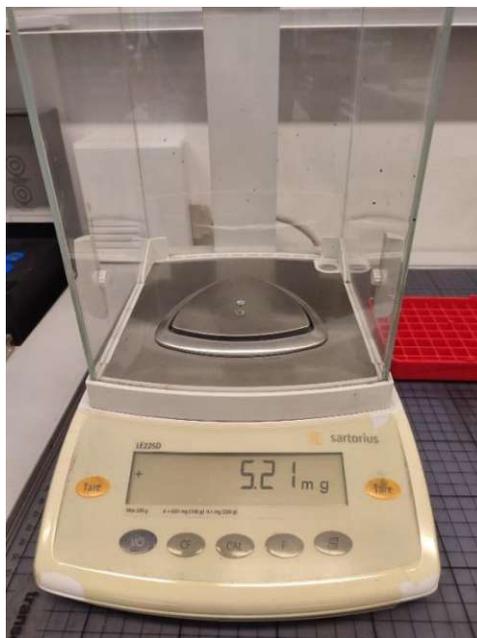


Abbildung 17: Einwaage Probe

Der Aluminiumtiegel wird anschließend verschlossen und gepresst. Dies wird für alle Proben wiederholt.

Die verschlossenen Tiegel werden im Anschluss in den Autosampler des DSC (TA Instruments Q2000) geladen (Abbildung 18).



Abbildung 18: Autosampler DSC

Am Computer werden anschließend die Probenplätze hinterlegt und ein Temperaturprogramm (Tabelle 2) erstellt.

Tabelle 2: Zyklus DSC

Vorgang	Rate [K/min]	Zieltemperatur [°C]
Temperieren		20
Aufheizen	10	300
Abkühlen	10	20
Aufheizen	10	300
Abkühlen		Raumtemperatur

Nach jeder Messung werden die Daten automatisch auf den Computer übertragen und graphisch dargestellt.

2.4. Blends

Um die Recyclingfähigkeit der Tiefkühlverpackungen zu beurteilen wurden sie anhand der bereits gewonnenen Daten in Gruppen aufgeteilt.

1. Polyethylen
2. Polyethylen mit Polypropylen
3. Polypropylen
4. Polyethylen mit PET
5. Mischung aus allen TK-Verpackungen

Die Tiefkühlverpackungen wurden vorerst mit einer Schere grob zerkleinert und dann in einer Schneidemühle (Fritsch Pulverisette 19) mit 4mm Einsatz gemahlen. Das gewonnene Material wurde anschließend in einem Laborextruder (Abbildung 19) von Extron (Typ EX 18-26 1.5) homogenisiert und extrudiert. Dabei kam für die Blends ohne PET ein Temperaturprofil von 165/220/220 °C und für die Blends mit PET von 260/275/275 °C zum Einsatz und eine Drehzahl von 75 Umdrehungen pro Minute.



Abbildung 19: Extron Mecanor Extruder

Das Extrudat wurde wieder zerkleinert und für die weiteren Versuche verwendet.

In Tabelle 3 ist die Massenverteilung der einzelnen Polymere in den Blends dargestellt. Diese wurden über eine volumetrischen Massendichte Berechnung ermittelt mit den Ergebnissen der LIMi, DSC und FTIR-Analysen (Kapitel 2.1-2.4). Hierzu wurde jeder Schicht die mittels LIMi-Analyse sichtbar war ein Polymer zugeordnet. Die Innenschicht und die Außenschicht wurden mit den Ergebnissen aus der FTIR-Analyse bestimmt und die mittleren Schichten mit Hilfe der Ergebnisse aus der DSC-Analyse. Anschließend wurde über die Dicke der einzelnen Schichten, der Fläche der verwendeten Packungsausschnitte sowie der Dichte der einzelnen Polymere die Masse ermittelt, wobei alle Schichten berücksichtigt wurden.

Zuletzt wurden die Massen der jeweils in den Blends verwendeten Verpackungen summiert und die Massenverteilung berechnet.

Tabelle 3: Massenverteilung Blends [%]

Blends	PE (1)	PE&PP (2)	PP (3)	PE&PET (4)	Mix (5)
PE	100%	51,4%	0%	46,9%	44,6%
PP	0%	48,6%	100%	0%	43,2%
PET	0%	0%	0%	53,1%	11,2%
PA	0%	0%	0%	0%	1,0%

2.5. Herstellung Prüfkörper

Um die Eigenschaften des Rezyklats zu testen wurden Prüfkörper von jedem Blend hergestellt.

Dies geschah zum einen mittels Spritzgussverfahren und zum anderen mittels Pressen.

Beim Pressen wird eine Schablone mit dem Material befüllt (Abbildung 20) und anschließend in die Plattenpresse Collin P200P eingelegt. Anschließend wird ein vordefinierter Zyklus durchlaufen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Presszyklus Prüfkörper

Temperatur [°C]	Zeit [min.]	Druck [bar]
180	8	1
220/275	2	35
220/275	5	50
180	1	50
30	15	60

Nachdem der Zyklus durchlaufen ist wurden die Prüfkörper vorsichtig aus der Schablone entfernt und für die rheologischen Messungen verwendet.



Abbildung 20: Schablone befüllt

Für die Zugversuche wurden die Prüfkörper mit dem Spritzgussverfahren hergestellt. Dabei werden die Flakes der Blends in einen Extruder (HAAKE MINILab II von Thermo Scientific) gefüllt um sie aufzuschmelzen und zu homogenisieren. Das Extrudat wird direkt in einen beheizten Zylinder der Spritzgussmaschine (HAAKE MiniJet II von Thermo Scientific) gedrückt und dieser anschließend eingesetzt. Der Zylinder hat eine Temperatur von 220/275°C und die Prüfkörperform 40°C. Unter der Einwirkung eines Drucks von 500bar für 10 Sekunden wird die Masse in die Prüfkörperform gedrückt. Die Prüfkörper können dann entfernt werden und sind nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur bereit für die Zugversuche. Die Prüfkörper Geometrien entsprechen den

Vorgaben der jeweiligen Normen (Zugversuch: DIN EN ISO 527-2-5A [32], Schlagzugversuch: DIN EN ISO 8256/1A [33]).

2.6. Rheologie

Die Rheologie beschäftigt sich mit dem Fließverhalten von Materialien. Im Zuge der Arbeit wurde untersucht wie sich die Kunststoffe unter Einwirkung von Temperatur, Druck und Spannung verhalten. Für die Ermittlung der Daten wurde der MFI bestimmt und ein Rheometer eingesetzt.

2.7. MFI

Der Schmelzflussindex eines Kunststoffes gibt Auskunft über die Fließeigenschaften und Viskosität. Um den MFI gemäß Norm DIN EN ISO 1133 [34] zu ermitteln wird Kunststoffgranulat in das Messgerät eingefüllt und anschließend über die Schmelztemperatur erhitzt.

Die geschmolzene Kunststoffmasse wird mit einem Gewicht beschwert und durch eine genormte Düse gedrückt. Die Menge die in 10min. durch die Düse fließt wird gewogen und somit der MFI bestimmt (Gramm pro 10 Minuten).

Da er relativ leicht und rasch bestimmbar ist, wird er auch in Produktionen laufend gemessen, um etwaige Abweichungen der Produktparameter rasch zu erkennen.

[35]

Für die Blends wurde ein Extrusionsplastometer: KARG MeltFlow basic Code 3100.000 verwendet. Während der Messung wurden die Probenstränge alle 60 Sekunden abgeschlagen und das Gewicht anschließend mit dem Faktor 10 multipliziert.

2.7.1. Parameter:

- 4gr. Granulat
- Temperatur: 220°C bzw. 275°C
- Prüfungsgewicht: 2,16kg
- Abschlagen: alle 60 Sekunden
- Proben pro Blend: 6

2.8. Rheometer

Mit dem Rheometer wurde die Viskosität der Kunststoffproben bestimmt. Eingesetzt wurde ein Anton Paar MCR 302 mit einem Platten-Platten-Aufbau sowie mit einem Koaxialen Zylinder-Messsystem.

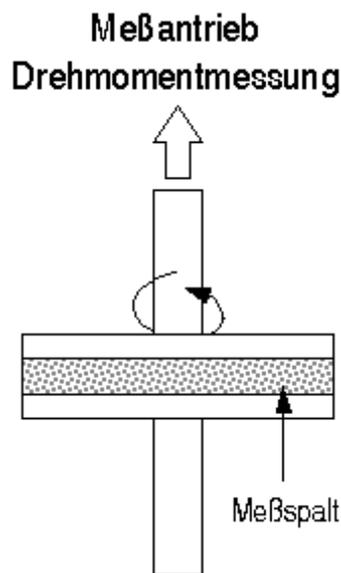


Abbildung 21: Messprinzip Platten-Platten-Aufbau [39]

Die zuvor hergestellten Kunststoffproben werden in die Messvorrichtung (Abbildung 21) eingespannt und anschließend erhitzt. Beim Erreichen der eingestellten Temperatur oszilliert die Messvorrichtung und misst die Schubspannung, die Viskosität, die Normalspannung und das Schubmodul.

Die Daten werden aufgezeichnet und konnten anschließend mit der Software RheoCompass 1.25 ausgewertet werden. [36]

Die Versuchsdurchführung erfolgte unter Verwendung eines Platte-Platte-Systems mit der Bezeichnung Stempel PP25-SN39840, das unter Stickstoffatmosphäre und bei einer konstanten Temperatur von 220°C arbeitete. Die Messungen wurden über einen Frequenzbereich von 628 bis 0,1 (in rad/s) durchgeführt, wobei insgesamt 25 Messpunkte aufgenommen wurden. Die Spaltbreite wurde dabei auf 1 mm festgelegt.

2.9. Zugversuch

Mithilfe des Zugversuchs, ausgeführt gemäß Norm DIN EN ISO 527-2 [32], können die mechanischen Eigenschaften eines Materials bestimmt werden. Ein Probenkörper wird zwischen zwei Backen eingespannt und anschließend einer einachsigen Kraft ausgesetzt. Dabei durchläuft der Probenkörper unterschiedliche Verformungen.

- 1.) Elastische Verformung: Der Probenkörper verformt sich unter Belastung, kehrt aber in seine ursprüngliche Form zurück, wenn die Belastung entfernt wird.
- 2.) Plastische Verformung: Nach Entfernung der Belastung nimmt der Probenkörper nicht mehr seine Ursprungsform an, sondern bleibt in seinem verformten Zustand.
- 3.) Einschnürung: Der Querschnitt des Probenkörpers verringert sich lokal.
- 4.) Bruch: Schlagartiger Riss des Materials.

Während des Versuchs wird die Dehnung und die angewendete Kraft Spannung aufgezeichnet. [32]

Die Messungen wurden auf einer Universalprüfmaschine Zwick Roell Z050 bei einer Traversengeschwindigkeit von 10 mm/min bei einer maximalen Prüfkraft von 1 kN durchgeführt. Die Ermittlung des E Moduls erfolgte mittels Extensometer. Als Kennwerte wurden E-Modul und Bruchdehnung ausgewertet.

Im Bereich der elastischen Verformung kann das Hook'sche Gesetz angewendet werden.

Hookesches Gesetz:

$$D = \frac{F}{\Delta L}$$

Formel 1: Hookesches Gesetz [35]

Mit Hilfe des Hookeschen Gesetze, sowie der Formel für die mechanische Spannung und Dehnung, kann das E-Modul hergeleitet werden.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Formel 2: Mechanische Spannung [35]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Formel 3: Dehnung [35]

Durch Normierung des Hookeschen Gesetztes auf die Querschnittsfläche, sowie auf die Stablänge im unbelasteten Zustand erhält man das E-Modul. Anschließend kann man die mechanische Spannung und die Dehnung einsetzen.

$$E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Formel 4: E-Modul [35]

Verschiedene Kunststoffe weisen ein unterschiedliches Verhalten im Zugversuch auf (Abbildung 22). Weiche Kunststoffe, wie PE, zeigen hohe Bruchdehnungen aber vergleichsweise geringe Spannungswerte. Gegenteilig weisen spröde Kunststoffe hohe Spannungswerte aber nur geringe Bruchdehnungen auf. [35]

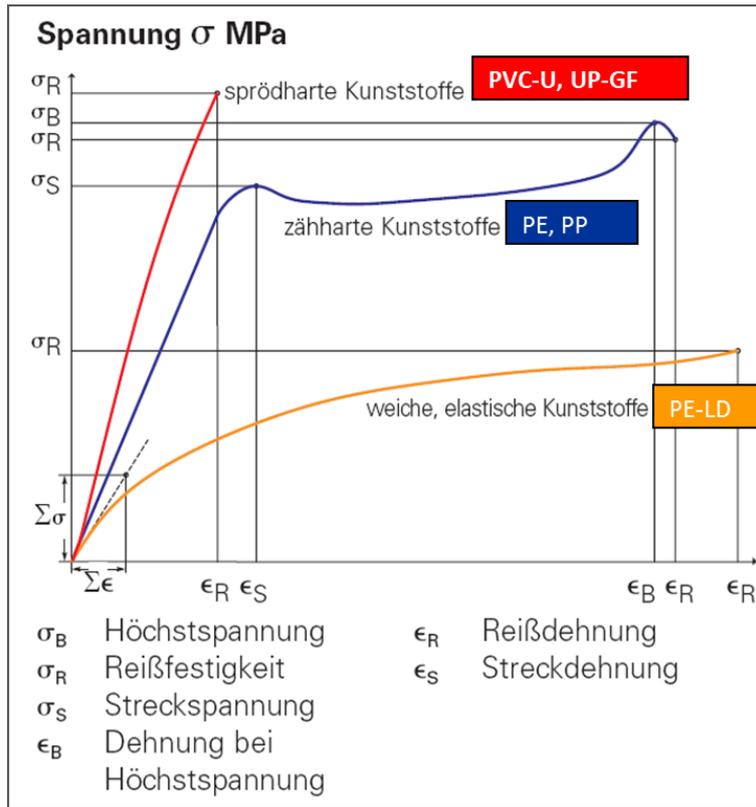


Abbildung 22: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Kunststoffe [32]

2.10. Kerbschlagzugversuch

Der Kerbschlagzugversuch, ausgeführt gemäß Norm DIN EN ISO 8256 [33], liefert Daten um die Zähigkeit oder Sprödigkeit eines Materials zu charakterisieren. Der Probenkörper wird an einer definierten Stelle eingekerbt und anschließend in das Versuchsgerät eingespannt.

Der Probenkörper befindet sich im Pendelweg eines Pendelschlaghammers. Dieser Hammer wird aus erhöhter Position entkoppelt und trifft die Probe in der tiefsten Position. Dabei kommt es zu einer plastischen Verformung sehr elastischer Materialien bzw. zum Bruch bei spröden Materialien. Die für die Verformung benötigte Energie entspricht der Schlagarbeit des Pendelhammers. Mit dieser Energie kann man die Schlagzugzähigkeit der Probe mit folgender Formel berechnen [35]:

$$a = \frac{E}{x * h} * 10^3$$

a = Schlagzugzähigkeit [kJ/m²]

E = Schlagarbeit [J]

h = Probenkörperdicke [mm]

x = Stegbreite [mm]

Hammer: 2J, Querjoch 15 g



Abbildung 23: INSTRON CEAST 9050

Die Messungen wurden mit einem Instron Ceast 9050 (Abbildung 23) Pendelschlagwerk durchgeführt, wobei die maximale Schlagarbeit des Pendels 2 J betrug und die Masse des Querjochs 15 g war.

2.11. Blasextrusion

Die Blasextrusion wird verwendet um Hohlkörper aus Kunststoffen herzustellen. Ausgangsmaterial ist ein Kunststoffgranulat, welches in einen Extruder gefüllt wird um es aufzuschmelzen. Das Extrudat wird anschließend durch eine Ringdüse gepresst, durch die ein Luftstrom fließt. Dadurch entsteht ein Kunststoffschlauch der über mehrere Walzen geführt wird um abzukühlen. [18] Für die Versuche dieser Arbeit wurde eine Ultra Micro Blown-Film Line von LabTech (Abbildung 24) verwendet. Der Extruder wurde mit 120 Umdrehungen pro Minute bei 220°C betrieben. Die Temperatur der Ringdüse betrug 180°C, das Kühlgebläse war mit 1600 Umdrehungen pro Minute eingestellt und die Abzugsgeschwindigkeit betrug 1,9 m/min. Folienblasversuche wurden nur mit den Rezyklaten ohne PET durchgeführt, da die Schmelzstabilität bei diesen Proben zu gering war.



Abbildung 24: Ultra Micro Blown Film von Labtech

2.12. Dehnrheologie

Um die Schmelze Festigkeit besser quantifizieren zu können, wurden auch dehnrheologische Untersuchungen durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird ein Kunststoffstreifen durch einachsige Zugspannung bei konstanter Temperatur und mit gleichbleibender Dehnrage gedehnt und die Dehnaviskosität η_D ermittelt. Das Hauptziel dieses Versuchs besteht darin, die Dehnungseigenschaften der Kunststoffschmelze zu untersuchen. Diese Eigenschaften sind insbesondere für Prozesse wie das Folienblasen oder das Spinnen von Fasern von großer Bedeutung [37]. Ein Schema des Versuchaufbaus ist in Abbildung 25 zu sehen.

Die Methodik der Dehnrheologie wurde verwendet um die Dehnaviskosität der Kunststoffproben zu bestimmen. Dabei wird der Probenkörper unter Hitzezufuhr plastisch deformiert.

Ein Kunststoffstreifen wird auf die Größe $L \times B \times H = 20 \times 8 \times 0,8 \text{ mm}$ zugeschnitten und in das Messsystem SER-HPV 1 eingespannt. Anschließend wird das

Probenmaterial in der Messkammer CTD450 des Anton Paar MCR 302 auf 180°C erhitzt und mit konstanter Dehnrade gedehnt.



Abbildung 25: Messaufbau Dehnrheologie

Die Versuche zu den Dehneigenschaften wurden ebenfalls auf dem Anton Paar MCR 302 Rheometer durchgeführt, allerdings mit Hilfe einer Stickstoff gespülten Messkammer (CTD 450) und einem SER-HPV 1 Messsystem. Die Messungen wurden bei einer Temperatur von 180°C bei drei verschiedenen Dehnraten von 5 rad/s; 1 rad/s und 0,1 rad/s) durchgeführt. Die Hüllkurven (LVE) des Versuchs wurden wiederum mit einem Platte-Platte System aber konstanten Scherraten von 0,1 und 0,001 1/s bei 180°C bestimmt. Allerdings ist für die Umrechnung von Scher- und Dehnaviskosität ein Trouton Faktor von 3 zu berücksichtigen, da die Dehnaviskosität größer als die Scherviskosität ist. Für eine bessere Quantifizierung der Dehnaviskosität wurde außerdem der SHC-Koeffizient (engl. Strain hardening coefficient) aus Maximum und Minimum der Dehnaviskositäts Kurve ermittelt:

$$SHC = \frac{\eta_{D,max}(t)}{\eta_0(t)}$$

Formel 5: SHC-Koeffizient

In Abbildung 23 sieht man einen im Messsystem eingespannten Kunststoffstreifen. [37]

3. Auswertung und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Daten der Messungen ausgewertet und teilweise graphisch dargestellt. Die Proben wurden durchnummeriert und mit P1 – P60 bezeichnet.

Für die Analysen wurden unterschiedliche Marken und Produkte ausgewählt um ein breites Spektrum der im Handel verfügbaren Tiefkühlverpackungen abzudecken. Mit den in den LIM- und FTIR-Analysen (Kapitel 2.1-2.3) gewonnenen Daten wurde die Massenverteilung der einzelnen Polymere berechnet und in Abbildung 26 graphisch dargestellt. Die Massenverteilung der Polymere entspricht hierbei der Massenverteilung in Blend Nummer 5, bei dem Stücke aller Verpackungen gemeinsam extrudiert wurde. Die Ermittlung der Massenprozent wurde in Kapitel 2.4 auf Seite 26 erläutert.

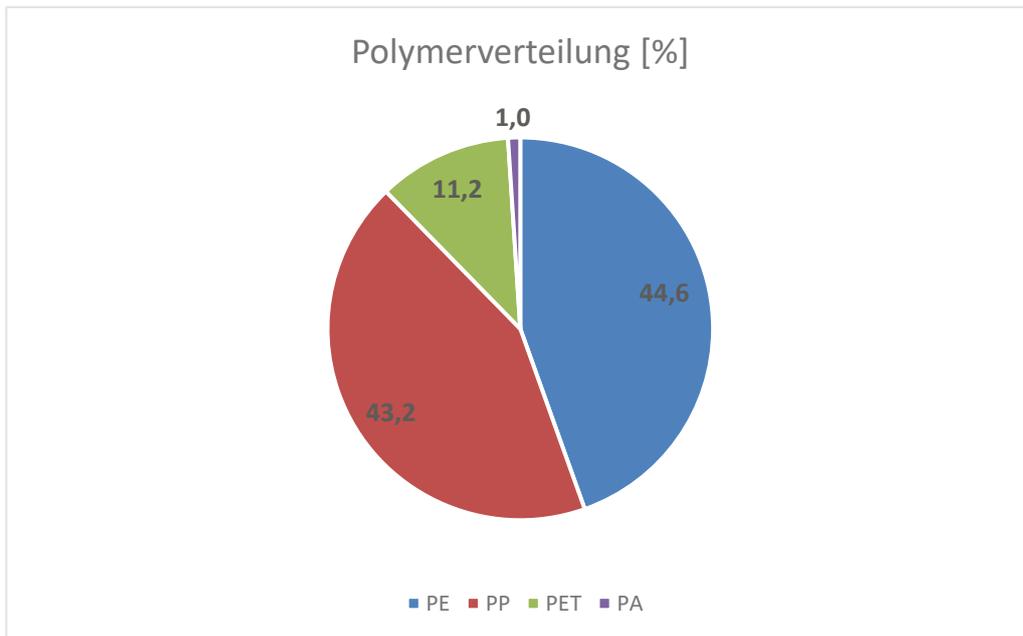


Abbildung 26: Polymerverteilung [%]

3.1. Verpackungskennzeichnung

Manche Hersteller drucken Informationen über den verwendeten Kunststoff bzw. den Recyclingcode auf die Verpackungen. Der Recycling Code oder die Kennzeichnung von Kunststoffen wird in der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 7) aufgeschlüsselt.

Tabelle 5: Recycling Codes

Recycling Code	Kunststoff
1	PET
2	HD-PE
3	PVC
4	LD-PE
5	PP
6	PS
7	OTHER

Ca. 50% der untersuchten Tiefkühlverpackungen haben Informationen zum Ausgangsmaterial aufgedruckt (Tabelle 5, Tabelle 6).

Tabelle 6: Verpackungsinformationen P1 - P30

Probennr.	Marke	Inhalt	Kunststoff	Code
1	Sweet Valley	Waldbeerenmischung	other	7
2	S Budget	Erbsen	PELD	4
3	Nature`s Gold	Rote Rüben - Laibchen	keine	keine
4	Metro Chef	Sweet Chestnuts	LDPE	4
5	Seawork	Mies-Muschel-Fleisch	keine	keine
6	Iglo	Blattspinat Zwutschgerl	keine	keine
7	Caterline	Knusper-Apfelradeln	keine	keine
8	Ich bin Österreich	Chicken Wings BBQ	keine	keine
9	Penny	Waldbeeren Mischung	LDPE	4
10	Perutnina	Chicken Wings Barbecue	other	7
11	Farmers Gold	Zapfen-Krokette	keine	keine
12	Freshona	Broccoli	LDPE	4
13	Bauernland	Grießnockerl	keine	keine
14	Clever	Junge Fissolen	keine	keine
15	Hilcona	Tortelli Steinpilz	LDPE	4
16	Islamar	Backteig mit Tintenfisch	LDPE	4
17	Bonduelle	Maiskolben Supersweet	PE	4
18	Bauernland	Gemüseschnitzel	keine	keine
19	Nature`s Gold	Pommes Frites	keine	keine
20	Toni Kaiser	Powidl Taschen	keine	keine
21	Penny	Blattspinat	PELD	4
22	Spar	Curly Fries	keine	keine
23	Meisterfrost	Semmelknödel	keine	keine
24	Sweet Valley	Erdbeeren	other	7
25	Sweet Valley	Erdbeeren	other	7
26	Ben & Jerrys	Ice Cream Cookie Dough Pieces	LDPE	4
27	Natur Aktiv	Bio Garnelen	keine	keine
28	Magnum	Collection White Chocolate and Cookies	PP	5
29	Spar	Marchfelder Erbsen	keine	keine
30	Ardo	Green Riced Vegetables	LDPE	4

Tabelle 7: Verpackungsinformationen P31 - P60

Probennr.	Marke	Inhalt	Kunststoff	Code
31	Nature`s Gold	Süßkartoffel Pommes	other	7
32	Gartengold	Junge Fissolen	keine	keine
33	Grandessa	Premium Vanille mit Schlagsahne	PP	5
34	Spar	Joghurt Himbeer Heidelbeer Eiscreme	PP	5
35	Cremissimo	Bourbon Vanille	PP	5
36	Cremissimo	Haselnuss Vanille Schokolade	PP	5
37	11er / elfer	Selection Polentini	LDPE	4
38	Meisterfrost	Topfenstrudel	keine	keine
39	Select Horeca	Dill	LDPE	4
40	Farmers Gold	Potato Wedges	keine	keine
41	McCain	Potato Pancake Kartoffelpuffer	LDPE	4
42	Golden Seafood	Thai-Curry	keine	keine
43	Inaka	Edamame	keine	keine
44	Primana	Selchfleischknödel	LDPE	4
45	Beyond Meat	Beyond Burger	keine	keine
46	Resch&Frisch	Bäckerähre	keine	keine
47	Eskimo	Erdbeer Cambino	PP	5
48	Mars	Bounty Ice Cream	PP	5
49	Original Wagner	Big City Pizza Boston	keine	keine
50	Dr. Oetker	Ristorante Pizza Salame	LDPE	4
51	Dr. Oetker	Die Ofenfrische Diavolo	keine	keine
52	Metro Chef	Dill	LDPE	4
53	Asian Choice	Sojabohnen	keine	keine
54	Ashoka	Garlic Naan	keine	keine
55	Sumeru	Veg Momos	keine	keine
56	Faragello	Frozen Okra No. 1	keine	keine
57	Sumeru Fine Dining	Whole Wheat Atta Paratha	keine	keine
58	Sumeru	Wassup French Fries Piri Piri	keine	keine
59	Grandessa	Zeit für Eis ist immer	keine	keine
60	Billa	Kroketten	LDPE	4

3.2. FTIR-Ergebnisse

Die Auswertung der FTIR-Spektren liefert Daten zum verwendeten Kunststoff der Innenschicht sowie der Aussenschicht der Tiefkühlverpackungen. Zur Veranschaulichung sind Beispielspektren der einzelnen Kunststoffe in den Abbildungen 27-30 dargestellt. In Tabelle 7 sind die Wellenlängen der Peaks zu finden.

Tabelle 8: Charakteristische Banden im FTIR Spektrum [38]

Polymer	Vibration*	Wellenzahl* [cm ⁻¹]
PE	vaCH ₂ und vsCH ₂ δCH ₂ ρCH ₂	3000–2840 1463 725
PP	vaCH ₂ und vsCH ₂ vaCH ₃ und vsCH ₃ δCH ₂ und δaCH ₃ δCH ₃ und δaCH ₃ δsCH ₃ νC – C δsCH ₂	3000-2840 3000-2840 1459 1376 1167 998,973 840
PET	ν=CH vaCH ₂ und vsCH ₂ νC=O νPh νC(=O)O und δ=CH νO-C und δ=CH δ=CH γ=CH γPh	3150–3000 3000–2840 1718 1600–1325 1260 1100 1018 971, 872 726
PA6	νNH vaCH ₂ vsCH ₂ νC=O δNH and νCN δCH ₂ ωCH ₂ and τCH ₂ γNH und γC=O	3303 2935 2860 1635 1539, 1276 1465 1200 690

*ν_a: antisymmetrische Streckschwingung, ν_s: symmetrische Streckschwingung, δ: Deformationsschwingung in der Ebene, γ: Deformationsschwingung ausserhalb der Ebene, ρ: Schaukelschwingung, ω: Wippschwingung, τ: Drehschwingung

**die angegebenen Wellenzahlen entsprechen dem Transmissionsspektrum

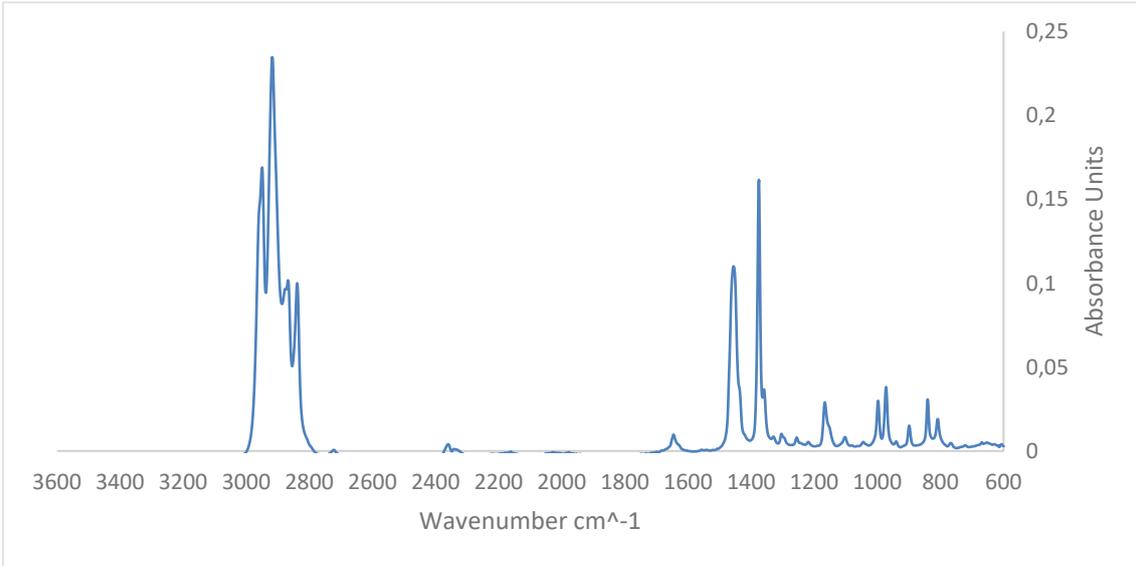


Abbildung 27: FTIR Spektrum Probe 1 Aussenschicht (PP)

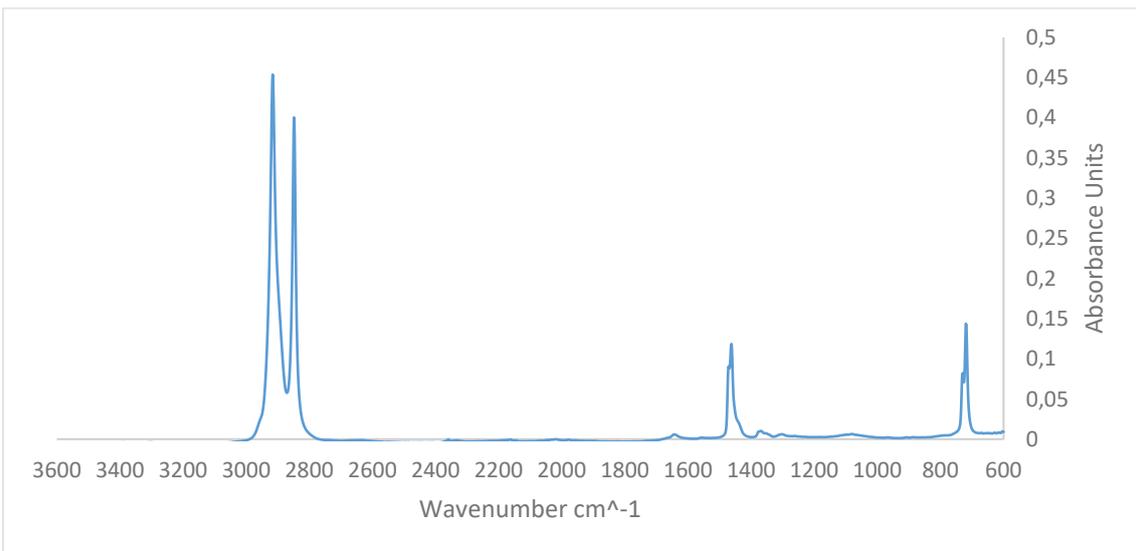


Abbildung 28: FTIR Spektrum Probe 1 Innenschicht (PE)

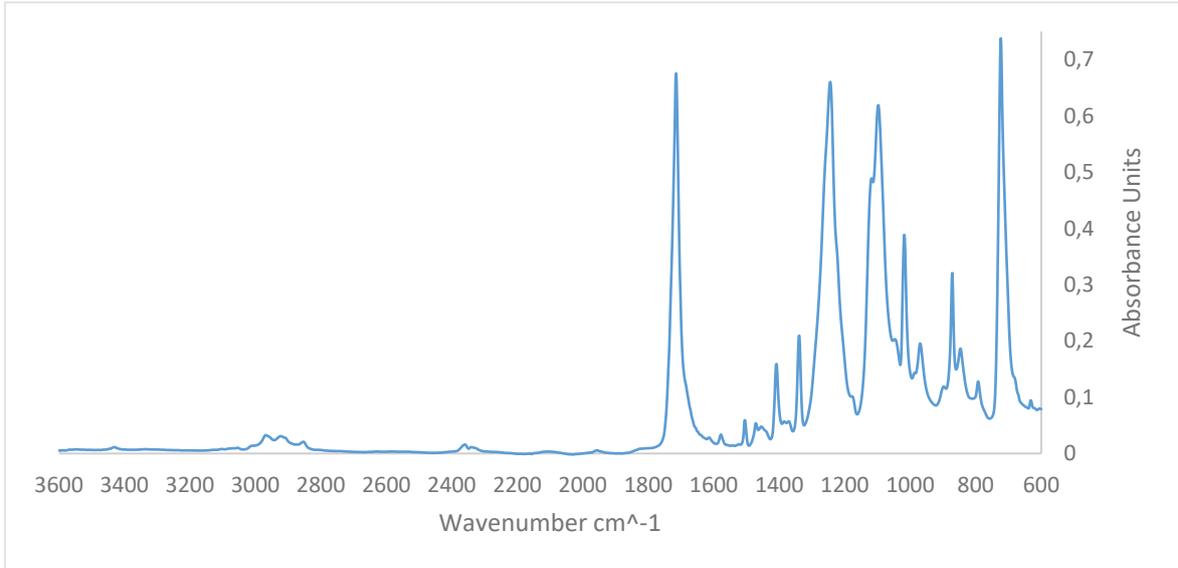


Abbildung 29: FTIR Spektrum Probe 2 Aussenschicht (PET)

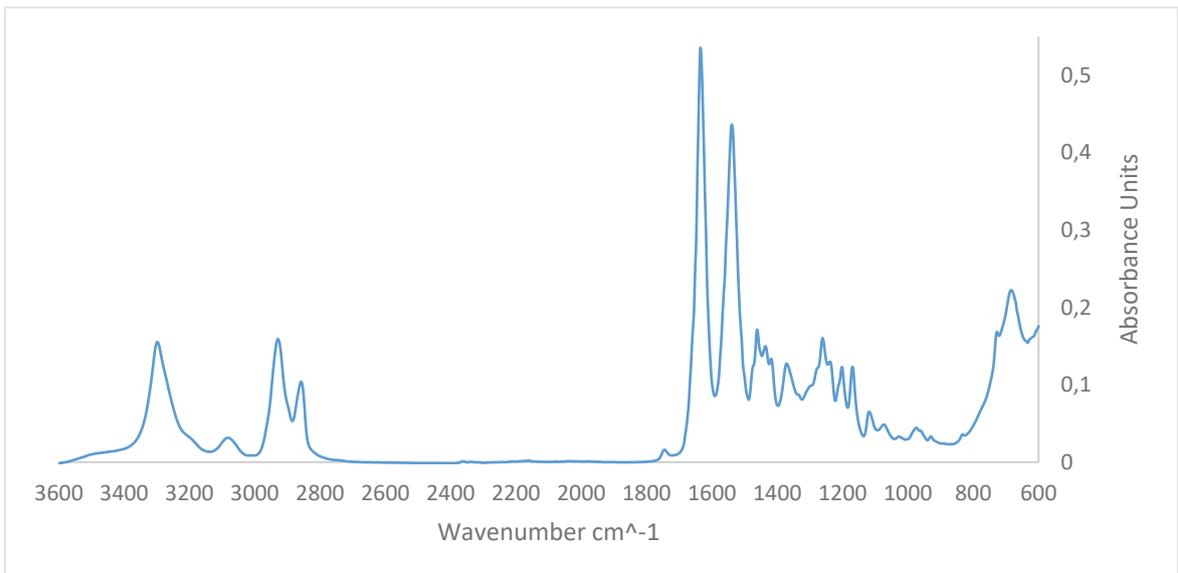


Abbildung 30: FTIR Spektrum Probe 10 Aussenschicht (PA)

Die Ergebnisse der FTIR-Untersuchung sind für alle Verpackungsproben in den Tabellen 11 und 12 zusammengefasst. Es hat sich gezeigt, dass die Innenschicht immer aus einem Polyolefin (PE oder PP) besteht. Wobei der überwiegende Anteil mit 50 von 60 Proben PE war. Bei den Außenschichten war die Variation deutlich größer und neben PE und PP wurden auch PET und PA detektiert.

Tabelle 9: Probe 1 - 30, FTIR-Ergebnisse

Probenr.	Innenschicht	Außenschicht
1	PE	PP
2	PE	PET
3	PE	PE
4	PE	PE
5	PE	PET
6	PE	PET
7	PE	PP
8	PE	PP
9	PE	PE
10	PE	PA
11	PE	PE
12	PE	PE
13	PE	PE
14	PE	PE
15	PE	PE
16	PE	PE
17	PE	PE
18	PE	PE
19	PE	PE
20	PE	PET
21	PE	PE
22	PE	PE
23	PE	PE
24	PE	PP
25	PE	PP
26	PE	PE
27	PE	PE
28	PP	PP
29	PE	PET
30	PE	PE

Tabelle 10: Probe 31 - 60, FTIR-Ergebnisse

Probennr.	Innenschicht	Außenschicht
31	PE	PET
32	PE	PP
33	PP	PP
34	PP	PP
35	PP	PP
36	PP	PP
37	PE	PE
38	PP	PP
39	PE	PE
40	PE	PE
41	PE	PE
42	PE	PET
43	PE	PET
44	PE	PE
45	PE	PET
46	PP	PP
47	PP	PET
48	PP	PP
49	PE	PE
50	PE	PE
51	PE	PE
52	PE	PET
53	PE	PE
54	PE	PET
55	PE	PET
56	PE	PET
57	PE	PET
58	PE	PET
59	PP	PP
60	PE	PE

3.3. LIMI-Ergebnisse

Mithilfe des Lichtmikroskops wurden die Anzahl der Schichten sowie die Schichtdicken der Tiefkühlverpackungen ermittelt.

In Abbildung 31 ist Probe 3 dargestellt. Die einzelnen Schichten sowie die Schichtdicke sind gut erkennbar. In Abbildung 32 ist eine Monolayer Verpackung dargestellt.

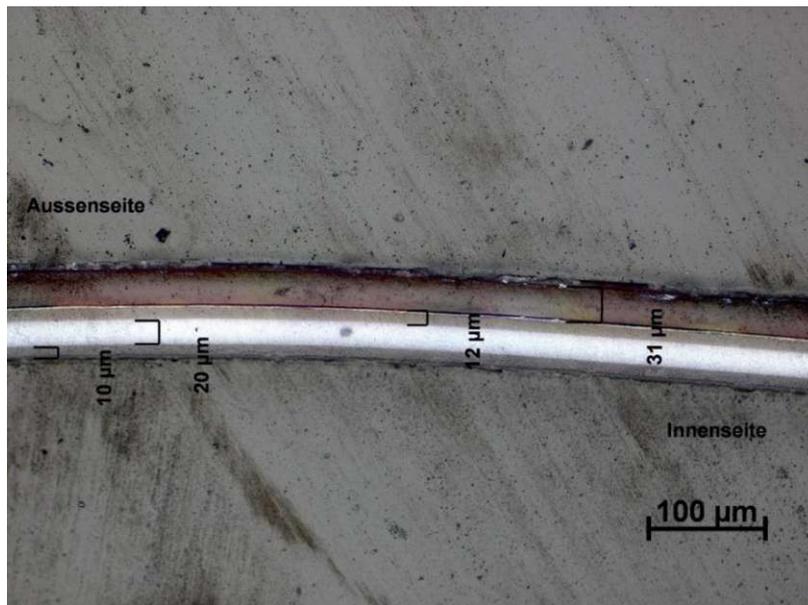


Abbildung 31: LIMI Probe 3

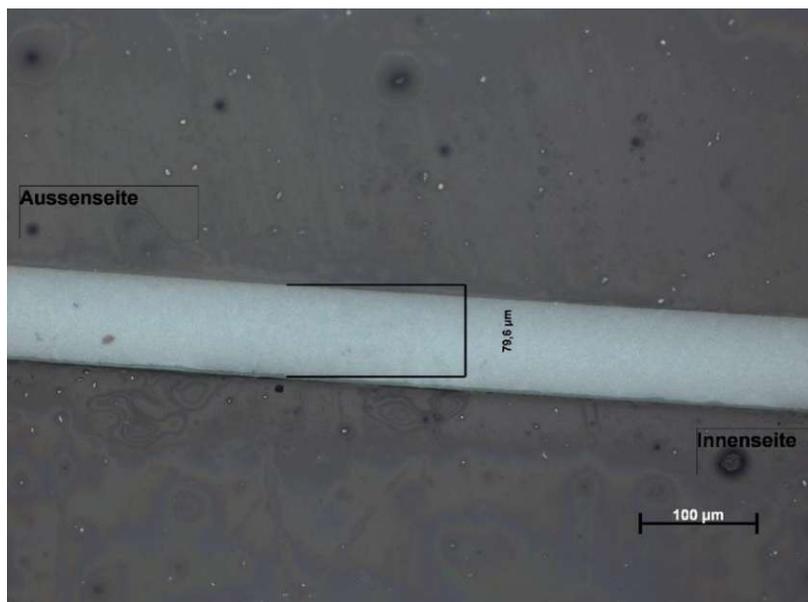


Abbildung 32: LIMI Probe 7

Während die Multilayer Verpackung vier separat erkennbare Schichten mit Dicken zwischen 10 und 30 μm aufweist, zeigt die Monolayer Verpackung eine einzelne Schicht mit einer Dicke von etwa 80 μm . In ihrer Gesamtdicke sind sich die Verpackungen mit etwa 75 μm und 80 μm trotz ihrer unterschiedlichen Schichtstruktur sehr ähnlich.

Es hat sich gezeigt, dass ca. ein Drittel der untersuchten Verpackungen Monolayer waren (19 von 60) und zwei Drittel Multilayer (41 von 60). Davon hatten 10 Verpackungen zwei Schichten, 19 Verpackungen drei Schichten, 10 Verpackungen vier Schichten und nur 2 Verpackungen fünf Schichten.

Die geringste Schichtdicke hatte Probe 44 mit 5,1 μm und die höchste Probe 35 mit 669,2 μm , wobei es sich bei dieser Probe um eine Hartkunststoffverpackungen handelt. Die höchste Foliendicke betrug 80,1 μm bei Probe 42. In der Regel variieren die gemessenen Schichtdicken zwischen 10 und 40 μm .

Bei der Gesamtdicke weisen die Monolayer Verpackungen einen Durchschnittswert von 69,85 μm auf, wobei die Proben 33-36 nicht berücksichtigt wurden. Diese Proben sind Hartkunststoffverpackungen und weisen eine Schichtdicke von 548,3 – 669,2 μm auf, welche den Durchschnittswert der Gesamtdicke deutlich erhöhen, auf 165,88 μm .

Die Berechnung der Gesamtdicke der Multilayerverpackungen ergab einen Mittelwert von 120,75 μm . Auffallend war, dass alle Multilayer Verpackungen, unabhängig von der Anzahl der Schichten, einen Durchschnittswert von 107,78-136,41 μm bei der Gesamtdicke aufweisen.

In den Tabellen 13 und 14 sind wiederum die gemessenen Schichtdicken aller untersuchten Proben angeführt.

Tabelle 11: Probe 1 - 30, LIMI-Ergebnisse

Probenr.	Anzahl der Schichten	1 (Innen) [µm]	2 [µm]	3 [µm]	4 [µm]	5 (Außen) [µm]
1	4	12	20	11	24	-
2	3	12	40	12	-	-
3	4	10	20	12	31	-
4	2	47	10	-	-	-
5	2	66	12	-	-	-
6	5	16	14	22	13	16
7	1	79,6	-	-	-	-
8	4	14,6	29,4	15,1	21,3	-
9	4	7	20,8	8,1	41	-
10	4	18,9	24,6	16,5	35,9	-
11	4	10,8	25,9	12,7	32,7	-
12	3	13,8	48,6	16,7	-	-
13	3	15,9	56,1	15,1	-	-
14	3	15,1	43,3	18,1	-	-
15	3	14,3	44,3	10	-	-
16	1	86,3	-	-	-	-
17	3	18,9	36,4	22,1	-	-
18	3	10	45,3	10,8	-	-
19	3	22,1	32,1	20,8	-	-
20	3	23,5	66,9	18,1	-	-
21	3	37,2	18,3	37,2	17	-
22	3	8,9	11,7	73,1	-	-
23	3	13,5	45,6	14,3	-	-
24	4	13,5	30,8	14,3	21,3	-
25	4	11,9	29,7	14,6	23,2	-
26	4	22,1	32,9	25,1	26,4	-
27	1	58	-	-	-	-
28	2	20,8	18,1	-	-	-
29	3	8,9	30,2	14,3	-	-
30	3	9,4	30,8	10	-	-

Tabelle 12: Probe 31 - 60, LIM-ERgebnisse

Probennr.	Anzahl der Schichten	1 (Innen) [µm]	2 [µm]	3 [µm]	4 [µm]	5 (Außen) [µm]
31	3	21,9	63,1	18,3	-	-
32	2	26,4	35,4	-	-	-
33	1	556,1	-	-	-	-
34	1	555,3	-	-	-	-
35	1	669,2	-	-	-	-
36	1	548,3	-	-	-	-
37	3	17,8	59,1	17,5	-	-
38	2	37,8	5,7	-	-	-
39	1	52,9	-	-	-	-
40	3	17	52,3	17	-	-
41	1	69,1	-	-	-	-
42	2	80,1	24,6	-	-	-
43	1	73,7	-	-	-	-
44	5	24,6	5,1	15,1	7,6	23,7
45	3	28,3	20,8	4,9	-	-
46	2	24	25,4	-	-	-
47	1	38,6	-	-	-	-
48	1	52,3	-	-	-	-
49	1	22,9	-	-	-	-
50	1	17	-	-	-	-
51	1	21,3	-	-	-	-
52	1	66,1	-	-	-	-
53	1	69,4	-	-	-	-
54	2	32,1	50,5	-	-	-
55	2	61,8	17,5	-	-	-
56	3	10,8	21,6	14,6	-	-
57	2	15,1	36,7	-	-	-
58	1	80,4	-	-	-	-
59	1	35,3	-	-	-	-
60	4	10,8	14,6	15,1	35,9	-

3.4. DSC-Ergebnisse

Die Auswertung der DSC-Daten liefert Ergebnisse zu allen bei der Herstellung verwendeten Kunststofftypen. Somit kann auch bestimmt werden welche Materialien zwischen der Innenschicht und Aussenschicht eingesetzt wurden. In Abbildung 33-35 sind die Schmelzbereiche der DSC-Spektren der Proben 1, 2 und 10 dargestellt.

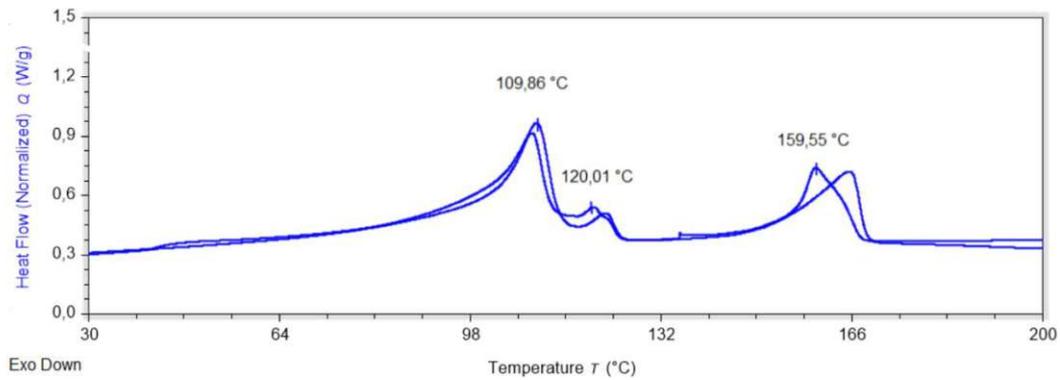


Abbildung 33: DSC Probe 1

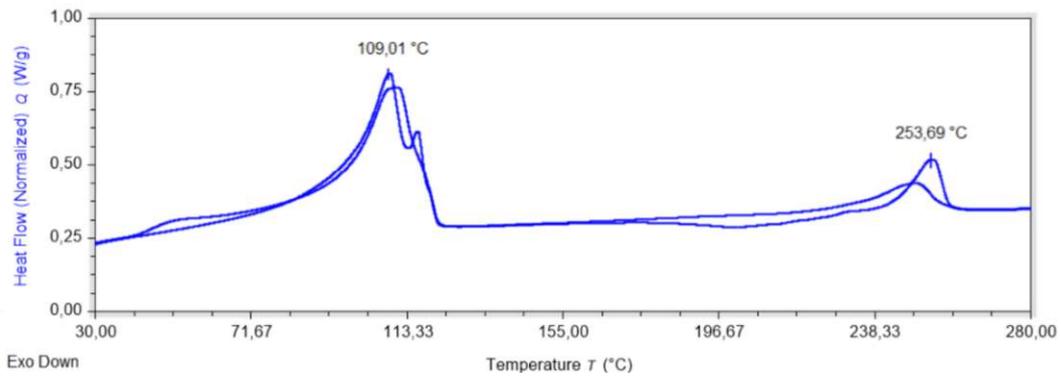


Abbildung 34: DSC Probe 2

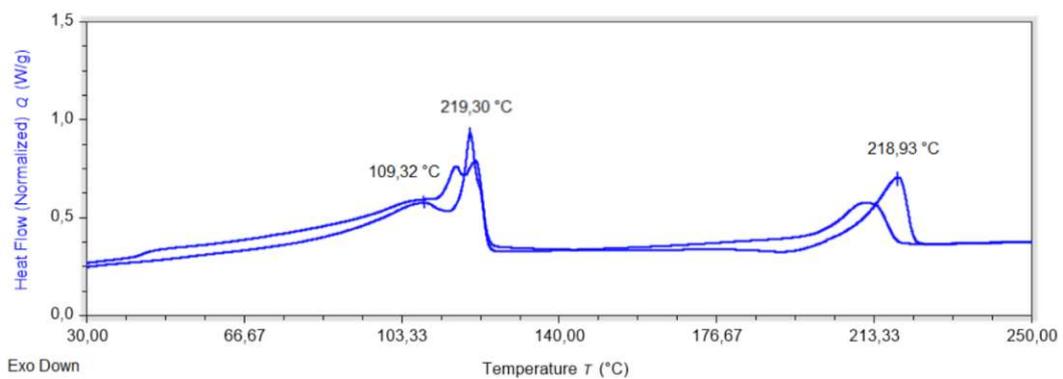


Abbildung 35: DSC Probe 10

Tabelle 15 listet die gefundenen Schmelzbereiche laut Literatur auf, die dann den einzelnen Schmelzpeaks der DSC-Analyse zugeordnet werden konnten.

Tabelle 13: Schmelzpunkte Polymere [38]

Polymer	Schmelzpunkt [°C]
LDPE	105-113°C
LLDPE	120°C
PP	160°C
PA6	215°C
PET	256°C

Bei den untersuchten Proben konnten max. drei unterschiedliche Materialien pro Verpackungen identifiziert werden, was einem DSC-Spektrum mit drei Peaks entspricht. Die Hälfte der Proben hatte 2 Peaks (31 von 60). Einen Peak hatten 19 Proben, wobei nur die Materialien PE und PP zum Einsatz bei der Herstellung gekommen sind.

Auffällig war das LLDPE bei 43 von 60 Proben enthalten war, wobei dieses meistens in Kombination mit LDPE oder PET zum Einsatz kommt. Grund dafür ist eine Verbesserung der Stabilität. Studien haben gezeigt, dass ein Mischungsverhältnis von 80% LDPE / 20% LLDPE die höchsten Schmelzfestigkeitswerte erzielt. Umgekehrt tritt der gleiche Effekt auf, wenn kleine Mengen (<20%) LDPE zu LLDPE gemischt werden. Dieser Effekt hängt mit den langen Kettenverzweigungen zusammen, die LLDPE aufweist. [39]

Die Tabellen 16 und 17 zeigen die Ergebnisse der DSC-Auswertungen aller untersuchten Verpackungsprodukte.

Tabelle 14: Probe 1 - 30, DSC-Ergebnisse

Probennr.	EW Tiegel [µm]	EW Folie [µm]	Probenplatz	Peaks	Auswertung
1	20,16	5,53	10	3	LDPE, LLDPE, PP
2	19,84	4,5	11	2	LDPE, PET
3	19,89	4,7	12	1	LLDPE
4	19,61	5,01	13	2	LDPE, LLDPE
5	19,84	4,51	14	2	LDPE, LLDPE
6	19,8	5,21	15	2	LDPE, LLDPE
7	19,86	4,9	3	3	LDPE, LLDPE, PP
8	20,2	4,84	4	2	LDPE, LLDPE
9	20,21	4,91	5	1	LDPE
10	19,97	5,08	6	2	LLDPE, PA
11	19,89	4,78	7	2	LDPE, LLDPE
12	20,09	4,95	8	2	LDPE, LLDPE
13	20,01	5,29	9	2	LDPE, LLDPE
14	20,07	5	10	2	LDPE, LLDPE
15	19,97	5,15	11	1	LLDPE
16	19,75	5,14	12	1	LDPE
17	19,91	5,07	13	1	LDPE
18	19,92	4,59	14	2	LDPE, LLDPE
19	20,19	4,69	19	2	LDPE, LLDPE
20	20	4,77	20	2	LDPE, PET
21	19,94	4,68	21	1	LDPE
22	20,09	5,14	22	2	LDPE, LLDPE
23	19,69	5,35	23	2	LDPE, LLDPE
24	20,09	5,36	24	3	LDPE, LLDPE, PP
25	20,05	4,55	25	3	LDPE, LLDPE, PP
26	19,87	4,88	26	2	LDPE, LLDPE
27	19,57	5,08	27	1	LLDPE
28	20,13	4,7	28	1	PP
29	20,03	5,11	29	2	LLDPE, PET
30	19,82	5,27	30	2	LDPE, LLDPE

Tabelle 15: Probe 31 - 60, DSC-Ergebnisse

Probennr.	EW Tiegel [µm]	EW Folie [µm]	Probenplatz	Peaks	Auswertung
31	19,78	5,49	31	2	LDPE, LLDPE
32	19,83	4,82	32	3	LDPE, LLDPE, PP
33	20	5,19	33	1	PP
34	20,18	5,1	34	1	PP
35	19,88	4,64	35	2	LLDPE, PP
36	19,87	4,85	36	1	PP
37	19,84	5,34	37	2	LDPE, LLDPE
38	20,07	4,51	38	1	PP
39	20,07	5,01	39	1	LDPE
40	20	4,67	40	2	LDPE, LLDPE
41	19,77	5,04	41	1	LLDPE
42	19,9	5	42	2	LDPE, PET
43	19,8	5	5	2	LLDPE, PET
44	20,07	4,5	6	2	LDPE, LLDPE
45	19,83	4,8	7	3	LDPE, LLDPE, PET
46	19,75	5,05	8	1	PP
47	19,65	3	9	1	PP
48	19,75	3,33	10	1	PP
49	20,2	3,11	11	1	LLDPE
50	20,06	4,77	12	2	LDPE, LLDPE
51	19,57	4,93	13	2	LDPE, LLDPE
52	19,93	5,05	14	2	LLDPE, PET
53	20,08	5	15	1	LLDPE
54	19,86	4,95	16	2	LLDPE, PET
55	19,87	5,24	17	2	LLDPE, PET
56	20,1	5,11	18	3	LDPE, LLDPE, PET
57	19,95	5,37	19	2	LLDPE, PET
58	19,87	5,64	20	2	LLDPE, PET
59	20,05	3,09	21	1	PP
60	19,86	5,69	22	2	LDPE, LLDPE

3.5. MFI-Ergebnisse

Die Ergebnisse der MFI Messung von den extrudierten Blends sind in Abbildung 36 dargestellt. Die Mischung aus PE und PP weist den niedrigsten Wert von 1,5 g/min auf, wohingegen die reine PP Fraktion einen vergleichsweise hohen Wert von 24 g/10 min zeigt. Auch die reine PE Fraktion zeigt mit einem MFI von 1,6 g/10 min deutlich geringere Werte. Eine mögliche Erklärung für diesen Unterschied besteht darin, dass die reine PP Fraktion auch Behälter für Eiscreme beinhaltet, die nicht aus Folien hergestellt sind, sondern mittels Spritzgusses. Was am Anguss Abdruck an der Verpackung erkennbar ist. Für dieses Verfahren werden Materialien benötigt, die im Vergleich zur Herstellung von Folien weniger zähfließend sind, um die Formen rasch und gleichmäßig ausfüllen zu können [40].

In der Schmelze des Blends von PE mit PP sind außerdem Inhomogenitäten erkennbar. Dabei handelt es sich vermutlich um Verunreinigungen von Beschichtungen oder Adhesiven, die oftmals mehrere μm bei Tiefkühl Verpackungen betragen. Dies Inhomogenitäten, könnten das Fließverhalten der Schmelze beziehungsweise die Wandhaftung im MFI entsprechend beeinflussen [37] und zu dem relativ niedrigen Wert führen, obwohl auch in diesem Blend Spritzguss PP Verpackungen enthalten sind.

Die Mischung aus PE und PET weist ebenfalls einen, im Vergleich zu PE, hohen MFI von 20 g/10 min auf. Dieses Verhalten ist in diesem Fall auf die Unverträglichkeit von PE und PET zurückzuführen und typisch für die Mischung von Polyolefinen mit Polyestern [41]. Auch die Mischung aus allen Verpackungen zeigt mit einem MFI von 23 g/10 min einen ähnlich hohen Wert.

Die Messreihen haben eine niedrige Standardabweichung ($<5\%$), welche auf eine gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse hindeutet, sowie eine gute Homogenisierung der einzelnen Blends.

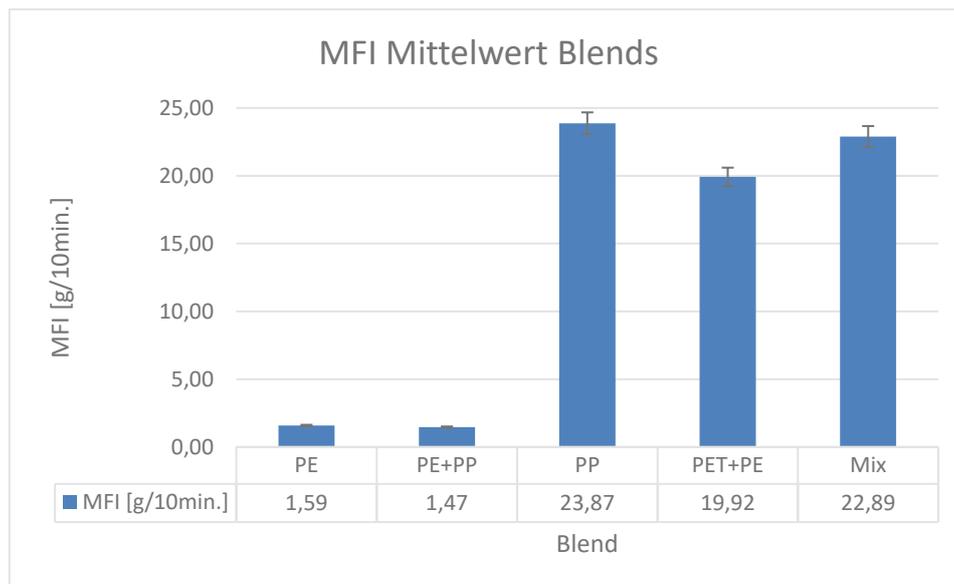


Abbildung 36: MFI Mittelwert Blend 1 - 5

3.6. Rheometer-Ergebnisse

In Abbildung 37 sind die komplexen Viskositäten aller Verpackungs Blends dargestellt. Im höheren Kreisfrequenzbereich von 100 bis 1 rad/s sind die Viskositätskurven in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der MFR Messung. Der PP Verpackungs Blend zeigt die geringste Viskosität. Die Kurven der gemischten Fraktion und der PET+PE Mischung liegen etwas höher aber tendenziell näher an PP als an PE und PE+PP. Die höchste Viskosität weist die Mischung PE+PP auf, die auch den geringsten MFR Messwert ergeben hat. Die reine PE Fraktion liegt etwas darunter.

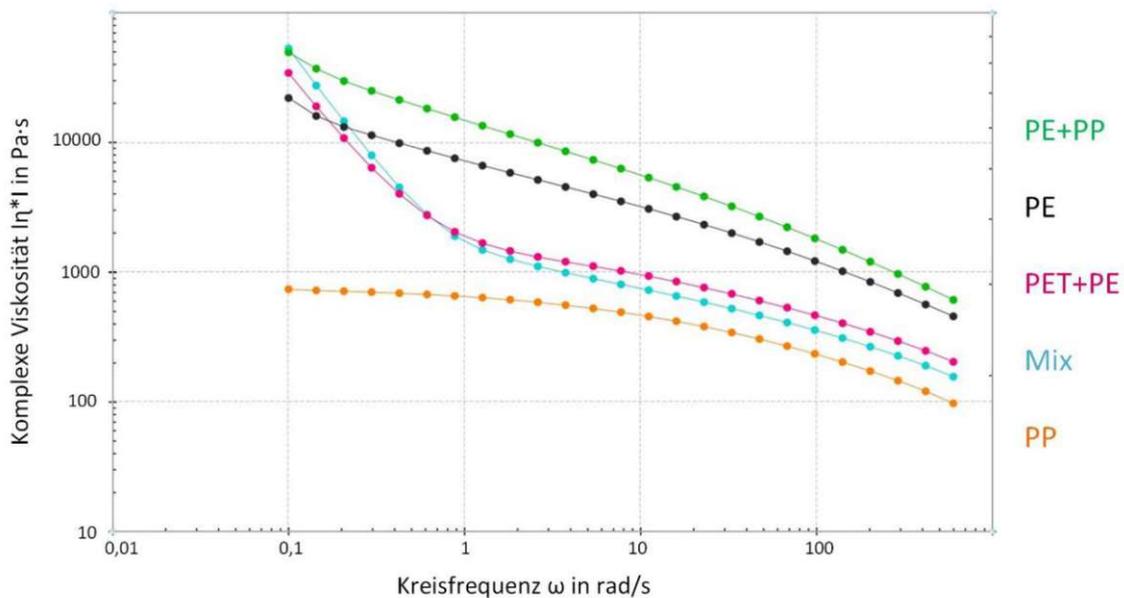


Abbildung 37: Rheologie Auswertung

Während PP im niedrigen Kreisfrequenz Bereich ein Plateau ausbildet, steigen die Werte bei PE+PP und PE leicht an. Dieses Verhalten ist typisch für die unterschiedlichen Kunststoffe und auf die lineare (PP) und verzweigte (PE) Struktur zurückzuführen [42]. Bei PET+PE und der gemischten Fraktion ist der Anstieg deutlich steiler, was vermutlich mit Verzweigungsreaktionen in Zusammenhang mit der höheren Messtemperatur von 270 °C zusammenhängt [43].

3.7. Dehnrheologie Ergebnisse

Die Auswertungen der Dehnrheologie sind graphisch in den Abbildungen 38-40 dargestellt.

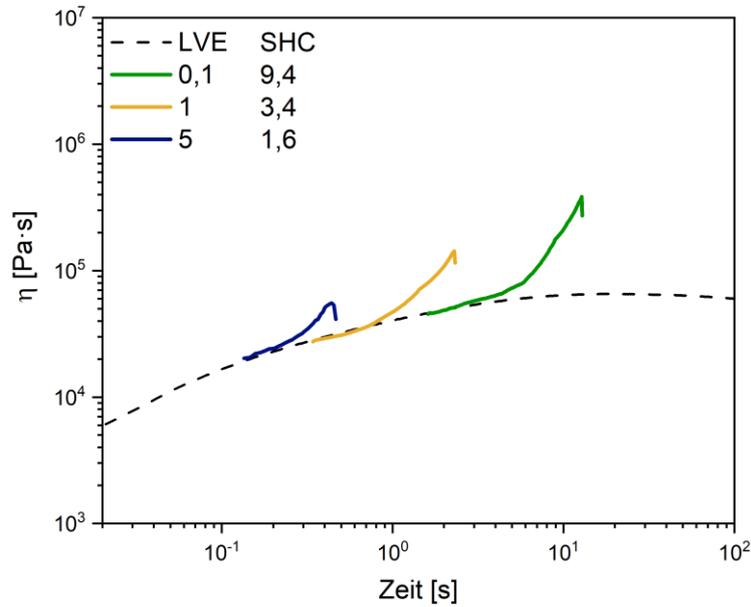


Abbildung 38: Dehnrheologie PE

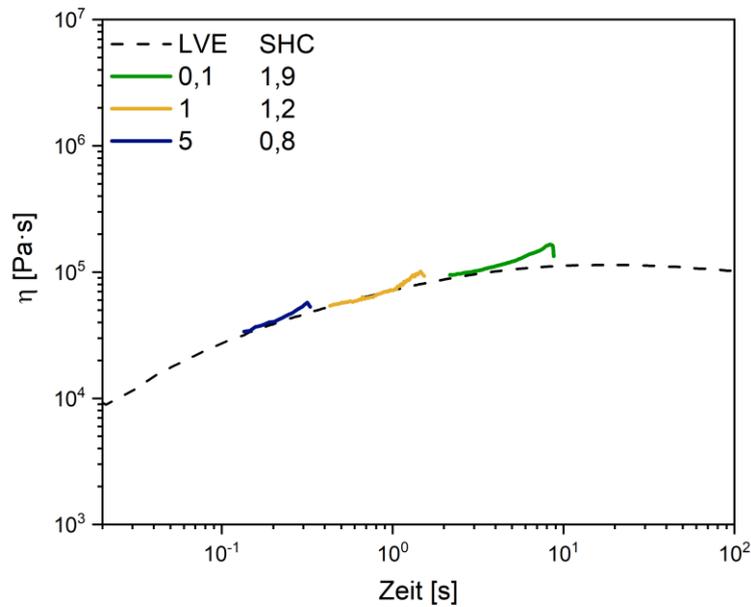


Abbildung 39: Dehnrheologie PE + PP

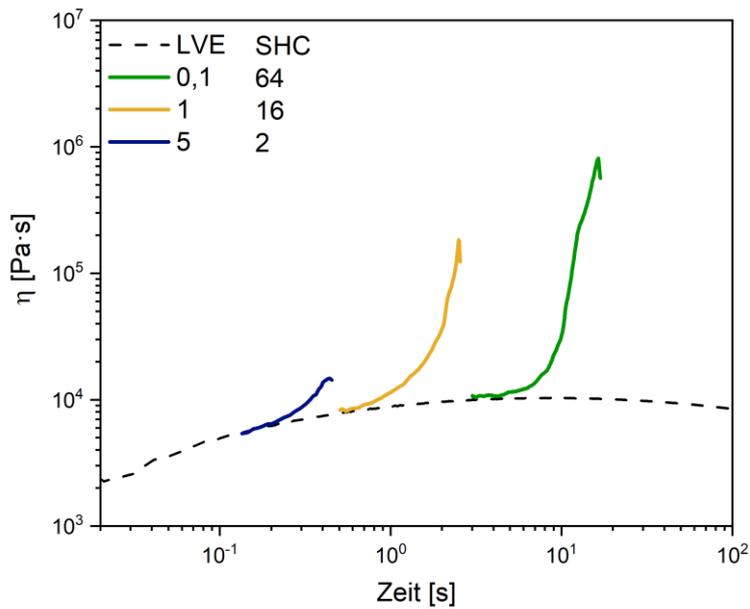


Abbildung 40: Dehnrheologie PP

Die Untersuchung hat gezeigt, dass bei allen Polyolefin Verpackungs Blends zumindest geringfügige Dehnverfestigungen auftreten. Die geringste Dehnverfestigung zeigte der PE+PP Blend mit SHC Werten zwischen 0,8 und 1,9. Auch das ist wiederum auf die Inhomogenitäten beziehungsweise Verunreinigungen in der Schmelze zurückzuführen. Durch die relativ Großen Partikel, kommt es zu einem sofortigen Riss der Probe, ohne dass sich das Material dehnen kann.

Die Verpackungs Rezyklate aus PE und PP zeigen beide eine sehr ausgeprägte Dehverfestigung, wobei PP die höchsten SHC Werte zeigt (0,1: 64, 1: 16, 5: 2). Eine gewisse Schmelzestabilität ist eine wichtige Eigenschaft für die Herstellung von Folien, da die Schmelze beim Aufblasen gedehnt wird und dieser äußeren Krafteinwirkung standhalten muss.

3.8. Zugversuch-Ergebnisse

Der E-Modul eines Werkstoffs ist ein Anhaltspunkt für dessen Festigkeit. Die gemessenen E-Modul Mittelwerte aller Blends sind in Abbildung 41 dargestellt. Die sortenreinen PE und PP Fraktionen weisen jeweils mittlere Modul Werte von 268 MPa (PE) und 941 MPa (PP) auf. Diese Werte sind in guter Übereinstimmung mit Werten für Neuware aus der Literatur. Für die PP Fraktion deutet der Wert außerdem darauf hin, dass es sich überwiegend um PP Copolymere handelt, die Modul Werte im Bereich 800-1300 MPa zeigen, wohingegen Homopolymere höhere Werte von 1500-2000 MPa hätten [44]. In diesem Fall liegt auch der E-Modul der gemischten PE+PP Blends mit 401 MPa zwischen den Werten von PE und PP.

Reines PET hat laut Literatur einen E-Modul von etwa 3000 MPa und hätte damit von allen, in den Blends vorhandenen Materialien, die höchste Festigkeit [44]. Die Mischung aus PET+PE zeigt allerdings nur einen Modul Wert von 536 MPa was zum einen dem Anteil an PE aber auch der schlechten Verträglichkeit der beiden Kunststoffe zuzuschreiben ist. Auch der gemischte Blend zeigt mit 442 MPa einen ähnlich geringen Wert.

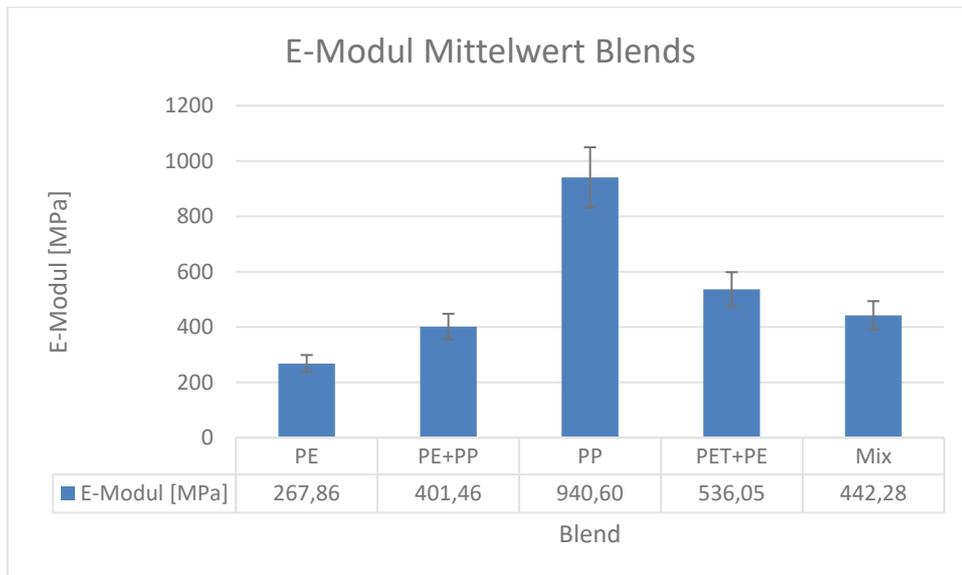


Abbildung 41: E-Modul Mittelwert Blends

Ergänzend zu den E-Modul Werten, zeigt Abbildung 42 die Mittelwerte der Bruchdehnungen. Überraschend ist hierbei vor allem der hohe Bruchdehnungswert des gemischten Blends. Dieser weist zwar einen relativ hohen Anteil an Polyolefinen auf aber, dass die Bruchdehnungen aller anderen Blends übertroffen werden ist dennoch unerwartet, da mit PE-LD, PE-LLD, PET, PP und PA fünf verschiedene Kunststoffe in der Mischung vorhanden sind.

Auch die eher geringe Bruchdehnung von 53% für die reine PP Fraktion ist etwas ungewöhnlich, da PP üblicherweise eher duktiler ist [44]. Unter Umständen könnte das auf den Einsatz von Additiven oder Füllstoffen hindeuten.

Die Mischung aus PET+PE wiederum zeigt ein erwartungsgemäß sprödes Bruchverhalten, das der Inkompatibilität der beiden Materialien zu Grunde liegt.

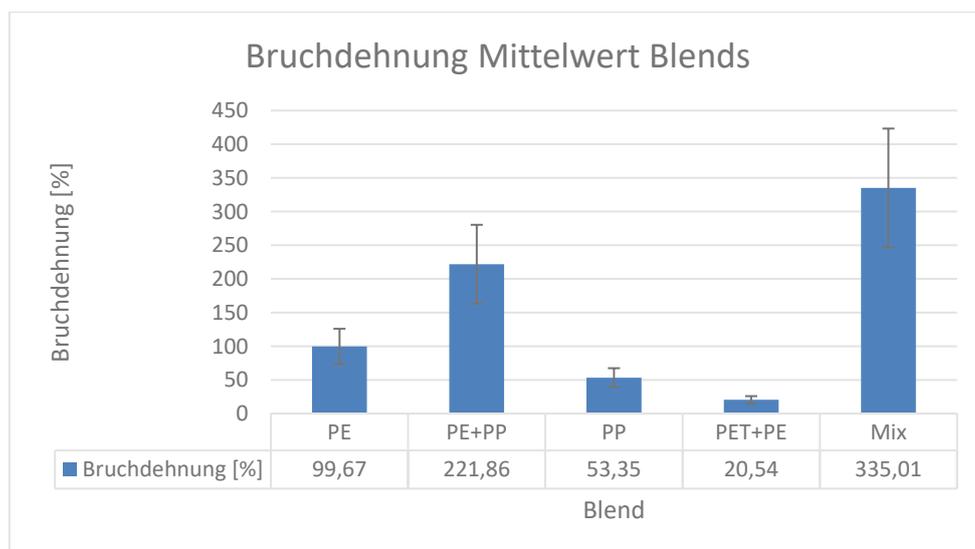


Abbildung 42: Bruchdehnung Mittelwert Blends

3.9. Kerbschlagzugversuch-Ergebnisse

Abbildung 43 stellt eine Übersicht über die Ergebnisse der Schlagzugzähigkeiten dar. Der PE Verpackungs Blend weist mit rund 190 kJ/m² mit Abstand die höchste Schlagzugzähigkeit auf. PE ist von allen vorkommenden Materialien allerdings auch jenes mit der höchsten Zähigkeit [44]. Die reine PP Fraktion weist vergleichsweise nur mehr einen Wert von 44 kJ/m² auf.

Beim PE+PP Blend dominieren eher die Eigenschaften des PE und auch dieses Material weist eine relativ hohe Schlagzugzähigkeit von 159 kJ/m² auf. Die gemischten Verpackungsabfälle haben vergleichsweise zwar wiederum eine geringere Zähigkeit, jedoch übersteigt sie mit 57 kJ/m² sogar jene der reinen PP Verpackungen. Das ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den hohen Polyolefin Anteil des Blends (> 80 wt.%) zurückzuführen. Im Gegensatz zu diesem Blend zeigt die PET+PE Mischung nämlich sehr geringe Werte von 12 kJ/m², da es durch die schlechte Verträglichkeit von PET und PE zu einem Verspröden des Materials kommt.

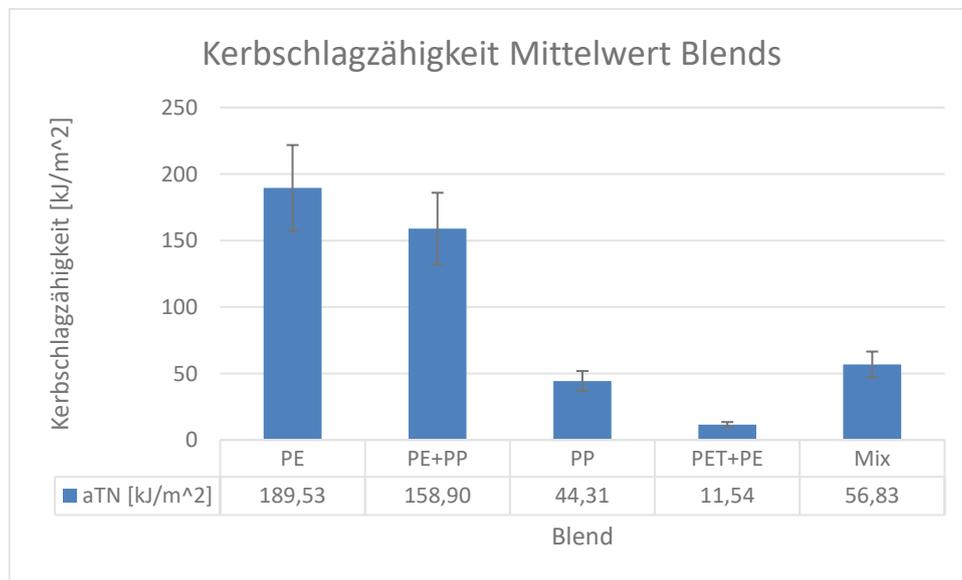


Abbildung 43: Kerbschlagzähigkeit Mittelwert Blends

3.10. Folienblasversuch Ergebnisse

Mit den Folienblasversuchen wurde untersucht ob ein „Film to Film“ Recycling der Tiefkühlverpackungen möglich ist. Durchgeführt wurden die Versuche mit Blend 1 (PE), Blend 2 (PE+PP) und Blend 3 (PP). In Abbildung 44 sind die Folien abgebildet.

Es war zu erkennen, dass die Folien von Blend 3 am vielversprechendsten aussehen. Bei dem Blend Nummer 2 waren Stücke erkennbar, die nicht komplett aufgeschmolzen und homogenisiert wurden und anschließend ein Reißen der Folie verursachten.



Abbildung 44: Folienblasen, links: PE, mittig: PP, rechts: PE+PP

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass durchaus Potential für ein Recycling von post-consumer Verpackungen besteht, jedoch wird dies durch Multilayer Verpackungen und aufwendigen Verpackungsdesign erschwert.

Die Eigenschaften der rezyklierten Polyolefin Blends (Blend 1-3) weisen gute mechanische Eigenschaften auf, jedoch zeigen die rheologischen Ergebnisse, dass eine Mischung aus PE und PP kaum Dehnverfestigung aufweist.

Dies kann an Inhomogenitäten, beziehungsweise Verunreinigungen in der Schmelze liegen.

Diese Verunreinigungen können unter anderem von Klebeschichten durch das laminieren, von Füllstoffen oder von den Etiketten kommen. Diese können nur schwer vom Polymer getrennt werden und verbleiben beim mechanischen Recycling zum Großteil im Rezyklat. [45]

Um einen Blend aus PE und PP für das Folienblasen zu verwenden, kann eine Reinigung der Schmelze durch Schmelzrektifikation in Betracht gezogen werden.

Vor allem die Ergebnisse des Blends mit reinem PP zeigen gute mechanische und rheologische Eigenschaften, was auch im Anwendungsversuch der Blasextrusion deutlich sichtbar wurde.

Eine einheitliche EU-Richtlinie, in der Vorgaben für Hersteller von Kunststoffverpackungen vorgeschrieben sind, würde das Recycling vereinfachen. Ein Beispiel wie die Vorgaben aussehen könnten wäre:

- Monolayer Verpackungen
- Multilayer Verpackungen, bei denen alle Schichten aus demselben Kunststoff bestehen
- Beschriftungen und Designs auf Papier drucken, welches auf der Verpackung angebracht wird

Ein Beispiel für eine Verpackung, aus Kombination von Kunststoff und Papier, sowie von zwei Schichten die beide aus PE bestehen, ist Probe Nr.5, welche in Abbildung 45 zu sehen ist.



Abbildung 45: Probe Nr. 5

Wie auf Seite 47 erläutert, sind ca. ein Drittel aller untersuchten Verpackungen bereits Monolayer und ca. zwei Drittel Multilayer. Zwar konnte bei einigen Multilayer Verpackungen für einzelne Produktgruppen schon ähnliche Verpackungs Designs in Hinblick auf Schicht Anzahl und verwendete Materialien beobachtet werden (vier Schichten aus PE und/oder PP für Tiefkühl Früchte), was im Sinne homogener Recycling Ströme positiv ist. Erweitert man die Betrachtung nun aber auf Tiefkühl Früchte und Gemüse, gibt es wiederum vereinzelt Verpackungen, die nur aus PE, PE mit PP oder auch PE mit PET bestehen, obwohl sich beide Produktkategorien sehr ähnlich sind. Hier ist unbedingt eine weitere Vereinheitlichung der Verpackungen im Sinne der Kreislaufwirtschaft nötig und es sollte kritisch hinterfragt werden, ob diese unterschiedlichen Designs wirklich für den optimalen Schutz des Lebensmittels nötig sind.

Um sogenanntes Virgin Material aus Rezyklat zu erhalten, bleibt die Möglichkeit des chemischen Recyclings, welches immer mehr an Bedeutung gewinnt.

Gegenüber der Kunststoffverbrennung können große Mengen Treibhausgase eingespart werden und die gewonnen Rohstoffe können wieder der industriellen Verarbeitung zugeführt werden.

5. Anhang

5.1. Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] EU Recycling, *Recyclinglösung für Mehrschicht-Verpackungsfolien*, <https://eu-recycling.com/Archive/19092#:~:text=Die%20Entwicklung%20„Newcycling%20von%20APK,Güte%20wie%20Neuware%20zu%20gewinnen> **2018**.
- [2] P. Fellows, *Food processing technology: Principles and practice*, 3rd ed., Woodhead Publishing in food science, technology and nutrition, Vol. 174, Woodhead, Oxford **2011**.
- [3] B. A. Morris, *Multilayer Flexible Packaging*, William Andrew Publishing, Oxford **2016**.
- [4] O. Horodytska, F. J. Valdés, A. Fullana, *Waste management* **2018**, 77, 413 – 425. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.023.
- [5] B. A. Morris, *The Science and Technology of Flexible Packaging*, William Andrew Publishing, Oxford **2017**.
- [6] B. Maughon, *R&D Efforts to Make Plastic More Sustainable*, <https://www.rdworldonline.com/rd-efforts-to-make-plastic-more-sustainable/>.
- [7] K. Ragaert, L. Delva, K. van Geem, *Waste management* **2017**, 69, 24 – 58. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.
- [8] Polymerservice Merseburg, *Barriere-Kunststoffe*, <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Barriere-Kunststoffe>.
- [9] M. Hanika, Zur Permeation durch aluminiumbedampfte PP- und PET-Folien, *Dissertation*, Technische Universität München **2004**.
- [10] *Freisinger Tage - Neuentwicklungen und Trends bei Barrierematerialien und flexiblen Verpackungen*, Keppler Medien Gruppe, Offenbach **2000**, *Verpackungsrundschau*, 51 (7), <https://www.tib.eu/de/suchen/id/olc%3AOLC157695594X>.
- [11] H.-C. Langowski, *Anwendung der Nanotechnologie in Materialien für den Lebensmittelkontakt*, https://www.bfr.bund.de/cm/343/anwendung_der_nanotechnologie_in_materialien_fuer_den_lebensmittelkontakt.pdf.

- [12] J. Schlossnikl, E. Pinter, M. P. Jones, T. Koch, V.-M. Archodoulaki, *Resources, Conservation and Recycling* **2024**, 200, 107299.
DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107299.
- [13] J. Gulmine, P. Janissek, H. Heise, L. Akcelrud, *Polymer Testing* **2002**, 21 (5), 557 – 563. DOI: 10.1016/S0142-9418(01)00124-6.
- [14] P. Eyerer, P. Elsner, T. Hirth, *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2005**.
- [15] D. Tripathi, *Practical Guide to Polypropylene*, ISmithers Rapra Pub, Shrewsbury **2002**.
- [16] M. Kaßmann, *Grundlagen der Verpackung: Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung*, Beuth, Berlin **2020**.
- [17] A. Limper, *Verfahrenstechnik der Thermoplastextrusion*, Hanser, München **2013**.
- [18] S. E. Selke, J. D. Culter, R. J. Hernandez, *Plastics Packaging: Properties, Processing, Applications, and Regulations*, 3rd ed., Carl Hanser Verlag, München **2016**.
- [19] O. S. Carneiro, J. M. Nobrega, *Design of extrusion forming tools*, Smithers Rapra, Shrewsbury **2012**.
- [20] S. Koltzenburg, Maskos, *Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen*, Springer, Berlin, Heidelberg **2014**.
- [21] A. Emblem, H. Emblem, *Packaging technology: fundamentals, materials and processes*, 1st ed., Woodhead Publishing Limited, Sawston **2012**.
- [22] Stadt Wien-Abfallwirtschaft, *Sammlung von Leichtverpackungen in der Gelben Tonne*, <https://www.wien.gv.at/umwelt/ma48/beratung/muelltrennung/plastikflaschen/plastikflaschen.html>.
- [23] Umweltbundesamt, *Kunststoffabfälle in Österreich–Aufkommen und Behandlung: Studien zum Aufkommen, Behandlung und Recycling*, https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/kunststoffe/kunststoffabfaelle.html
#:~:text=28%20Prozent%20werden%20stofflich%20verwertet,als%20Kunststoffanteil%20in%20einzelnen%20Abfallarten.

- [24] C. Neubauer, B. Stoifl, M. Tesar, P. Thaler, *Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich*, Wien **2020**.
- [25] D. Jubinville, E. Esmizadeh, S. Saikrishnan, C. Tzoganakis, T. Mekonnen, *Sustainable Materials and Technologies* **2020**, 25, e00188.
DOI: 10.1016/j.susmat.2020.e00188.
- [26] K. Kaiser, M. Schmid, M. Schlummer, *Recycling* **2018**, 3 (1), 1.
DOI: 10.3390/recycling3010001.
- [27] Plastics Europe, *Keine Kunststoffe in Deponien*, <https://legacy.plasticseurope.org/de/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill>.
- [28] *Grundlagen der Licht- und Elektronenmikroskopie*, UTB, UTB Band-Nr. 4864 (Eds: A. Linnemann, S. Kühl), Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart **2018**.
- [29] P. R. Griffiths, J. A. de Haseth, *Fourier Transform Infrared Spectrometry*, Wiley, Hoboken, N.J. **2007**.
- [30] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 11357 - Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC)*, Beuth, Berlin **2017**.
- [31] G. W. Ehrenstein, G. Riedel, P. Trawiel, *Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen*, 2nd ed., Hanser, München **2003**.
- [32] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 527-2 - Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften*, Beuth, Berlin **2012**.
- [33] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 8256 - Kunststoffe - Bestimmung der Schlagzugähigkeit*, Beuth, Berlin **2005**.
- [34] Deutsches Institut für Normung, *DIN EN ISO 1133 - Kunststoffe - Bestimmung der Schmelze-Masseflussrate (MFR) und der Schmelze-Volumenflussrate (MVR) von Thermoplasten*, Beuth, Berlin.
- [35] W. Hellerich, G. Harsch, E. Baur, *Werkstoff-Führer Kunststoffe: Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte*, 10th ed., Hanser, München **2010**.
- [36] A. Frick, *Praktische Kunststoffprüfung*, Hanser Verlag, München **2010**.
- [37] T. Schröder, *Rheologie der Kunststoffe: Theorie und Praxis*, Carl Hanser Verlag, München **2018**.
- [38] A. Mieth, E. Hoekstra, C. Simoneau, *Guidance for the identification of polymers in multilayer films used in food contact materials: User guide of*

selected practices to determine the nature of layers, EUR, Scientific and technical research series, Vol. 27816, Publications Office European Union, Luxembourg **2016**.

- [39] R. M. Patel, T. P. Karjala, N. R. Savargaonkar, P. Salibi, L. Liu, *Journal of Plastic Film & Sheeting* **2019**, 35 (4), 401 – 421.
DOI: 10.1177/8756087919844303.
- [40] M. Seier, J. Roitner, V.-M. Archodoulaki, M. P. Jones, *Resources, Conservation and Recycling* **2023**, 196, 107052.
DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107052.
- [41] M. Seier, V.-M. Archodoulaki, T. Koch, B. Duscher, M. Gahleitner, *Polymers* **2023**, 15 (13). DOI: 10.3390/polym15132966.
- [42] T. Kallel, V. Massardier-Nageotte, M. Jaziri, J.-F. Gérard, B. Elleuch, *J. Appl. Polym. Sci.* **2003**, 90 (9), 2475 – 2484. DOI: 10.1002/app.12873.
- [43] M. Seier, V.-M. Archodoulaki, T. Koch, B. Duscher, M. Gahleitner, *Food Packaging and Shelf Life* **2022**, 33, 100890.
DOI: 10.1016/j.fpsl.2022.100890.
- [44] E. Baur, T. Osswald, N. Rudolph, *Plastics Handbook - The Resource for Plastics Engineers (5th Edition)*, Carl Hanser Verlag, München **2018**.

5.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schichten einer Multilayer Verpackung [6]	3
Abbildung 2: Permeationsverlauf durch Polymer [9].....	4
Abbildung 3: Verpackungsfunktionalitäten für Lebensmittel und pharmazeutische Produkte [10, 11]	5
Abbildung 4 : Barriereigenschaften einiger Kunststoffe [12]	6
Abbildung 5: Strukturformel PE [14]	7
Abbildung 6: Strukturformel PP [14]	8
Abbildung 7: Strukturformel PET [14]	9
Abbildung 8: Strukturformel PA [14]	10
Abbildung 9: Einschneckenextruder [17]	11
Abbildung 10: Castextrusion [19].....	12
Abbildung 11: Blasextrusion [20]	13
Abbildung 12: Beispielfoto Verpackung 19-24	17
Abbildung 13: Probenvorbereitung	18
Abbildung 14: Gussformen gefüllt	19
Abbildung 15: Monolayer.....	21
Abbildung 16: Multilayer	21
Abbildung 17: Einwaage Probe	23
Abbildung 18: Autosampler DSC.....	24
Abbildung 19: Extruder Mecanor Extruder.....	25
Abbildung 20: Schablone befüllt	27
Abbildung 21: Messprinzip Platten-Platten-Aufbau [39]	29
Abbildung 22: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Kunststoffe [32]	32
Abbildung 23: INSTRON CEAST 9050	34
Abbildung 24: Ultra Micro Blown Film von Labtech	35
Abbildung 25: Messaufbau Dehnrheologie.....	36
Abbildung 26: Polymerverteilung [%].....	37
Abbildung 27: FTIR Spektrum Probe 1 Aussenschicht (PP)	42
Abbildung 28: FTIR Spektrum Probe 1 Innenschicht (PE)	42
Abbildung 29: FTIR Spektrum Probe 2 Aussenschicht (PET)	43
Abbildung 30: FTIR Spektrum Probe 10 Aussenschicht (PA).....	43

Abbildung 31: LIM1 Probe 3	46
Abbildung 32: LIM1 Probe 7	46
Abbildung 33: DSC Probe 1	50
Abbildung 34: DSC Probe 2	50
Abbildung 35: DSC Probe 10	50
Abbildung 36: MFI Mittelwert Blend 1 - 5.....	55
Abbildung 37: Rheologie Auswertung	56
Abbildung 38: Dehnrheologie PE	57
Abbildung 39: Dehnrheologie PE + PP.....	57
Abbildung 40: Dehnrheologie PP	58
Abbildung 41: E-Modul Mittelwert Blends	59
Abbildung 42: Bruchdehnung Mittelwert Blends	60
Abbildung 43: Kerbschlagzähigkeit Mittelwert Blends	61
Abbildung 44: Folienblasen, links: PE, mittig: PP, rechts: PE+PP.....	62
Abbildung 45: Probe Nr. 5	64
Abbildung 46: FTIR P1-P10 innen.....	77
Abbildung 47: FTIR P11-P19 + P21 innen	77
Abbildung 48: FTIR P22-27 + P29-P32 innen	77
Abbildung 49: FTIR P33-P36 innen.....	78
Abbildung 50: FTIR P28, P38, P46, P48, P59 innen	78
Abbildung 51: FTIR P11, P37, P39-P45, P52 innen.....	78
Abbildung 52: FTIR P20, P47, P49, P50, P51, P53, P54-P58, P60 innen	79
Abbildung 53: FTIR P1, P8, P24, P25, P32, P34, P35, P36, P46 aussen.....	79
Abbildung 54: FTIR P7, P28, P33, P38, P48, P59 aussen.....	79
Abbildung 55: FTIR P2, P5, P6, P20, P31, P42, P43, P45, P52, P54-P58 aussen	80
Abbildung 56: FTIR P29, P47 aussen	80
Abbildung 57: FTIR P10 aussen.....	80
Abbildung 58: FTIR P3, P4, P9, P11, P15, P26, P27, P37, P39, P41 aussen ..	81
Abbildung 59: FTIR P12, P13, P14, P16-P19, P21, P22 aussen	81
Abbildung 60: FTIR P23, P30, P40, P44, P49-P51, P53, P60 aussen.....	81
Abbildung 61: LIM1 P1	82

Abbildung 62: LIM I P2	82
Abbildung 63: LIM I P3	82
Abbildung 64: LIM I P4	82
Abbildung 65: LIM I P5	82
Abbildung 66: LIM I P6	82
Abbildung 67: LIM I P7	83
Abbildung 68: LIM I P8	83
Abbildung 69: LIM I P9	83
Abbildung 70: LIM I P10	83
Abbildung 71: LIM I P11	83
Abbildung 72: LIM I P12	83
Abbildung 73: LIM I P13	84
Abbildung 74: LIM I P14	84
Abbildung 75: LIM I P15	84
Abbildung 76: LIM I P16	84
Abbildung 77: LIM I P17	84
Abbildung 78: LIM I P18	84
Abbildung 79: LIM I P19	85
Abbildung 80: LIM I P20	85
Abbildung 81: LIM I P21	85
Abbildung 82: LIM I P22	85
Abbildung 83: LIM I P23	85
Abbildung 84: LIM I P24	85
Abbildung 85: LIM I P25	86
Abbildung 86: LIM I P26	86
Abbildung 87: LIM I P27	86
Abbildung 88: LIM I P28	86
Abbildung 89: LIM I P29	86
Abbildung 90: LIM I P30	86
Abbildung 91: LIM I P31	87
Abbildung 92: LIM I P32	87
Abbildung 93: LIM I P33	87

Abbildung 94: LIM I P34	87
Abbildung 95: LIM I P35	87
Abbildung 96: LIM I P36	87
Abbildung 97: LIM I P37	88
Abbildung 98: LIM I P38	88
Abbildung 99: LIM I P39	88
Abbildung 100: LIM I P40	88
Abbildung 101: LIM I P41	88
Abbildung 102: LIM I P42	88
Abbildung 103: LIM I P43	89
Abbildung 104: LIM I P44	89
Abbildung 105: LIM I P45	89
Abbildung 106: LIM I P46	89
Abbildung 107: LIM I P47	89
Abbildung 108: LIM I P48	89
Abbildung 109: LIM I P49	90
Abbildung 110: LIM I P50	90
Abbildung 111: LIM I P51	90
Abbildung 112: LIM I P52	90
Abbildung 113: LIM I P53	90
Abbildung 114: LIM I P54	90
Abbildung 115: LIM I P55	91
Abbildung 116: LIM I P56	91
Abbildung 117: LIM I P57	91
Abbildung 118: LIM I P58	91
Abbildung 119: LIM I P59	91
Abbildung 120: LIM I P60	91
Abbildung 121: DSC P3, P15, P27, P41, P49, P53.....	92
Abbildung 122: DSC P9, P16, P17, P21, P39	92
Abbildung 123: DSC P28, P33, P34, P36, P38, P46, P47, P48, P59.....	92
Abbildung 124: DSC P2, P20, P42.....	93
Abbildung 125: DSC P4, P5, P6, P8, P11-P14, P18, P19, P50, P51	93

Abbildung 126:DSC P22, P23, P26, P30, P31, P37, P40, P44, P60.....	93
Abbildung 127: DSC P10	94
Abbildung 128: DSC P35	94
Abbildung 129: DSC P1, P7, P24, P25, P32	94
Abbildung 130: DSC P45, P56	95

5.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Struers Zyklus.....	20
Tabelle 2: Zyklus DSC.....	24
Tabelle 3: Massenverteilung Blends [%]	26
Tabelle 4: Presszyklus Prüfkörper	27
Tabelle 5: Recycling Codes.....	38
Tabelle 6: Verpackungsinformationen P1 - P30	39
Tabelle 7: Verpackungsinformationen P31 - P60	40
Tabelle 8: Charakteristische Banden im FTIR Spektrum [38].....	41
Tabelle 9: Probe 1 - 30, FTIR-Ergebnisse	44
Tabelle 10: Probe 31 - 60, FTIR-Ergebnisse	45
Tabelle 11: Probe 1 - 30, LIM1-Ergebnisse	48
Tabelle 12: Probe 31 - 60, LIM1-Ergebnisse	49
Tabelle 13: Schmelzpunkte Polymere [38]	51
Tabelle 14: Probe 1 - 30, DSC-Ergebnisse	52
Tabelle 15: Probe 31 - 60, DSC-Ergebnisse	53
Tabelle 16: Messdaten Blends	95

5.4. Formelverzeichnis

Formel 1: Hooksches Gesetz [35]	31
Formel 2: Mechanische Spannung [35].....	31
Formel 3: Dehnung [35].....	31
Formel 4: E-Modul [35].....	31
Formel 5: SHC-Koeffizient.....	36

5.5. FTIR-Spektren

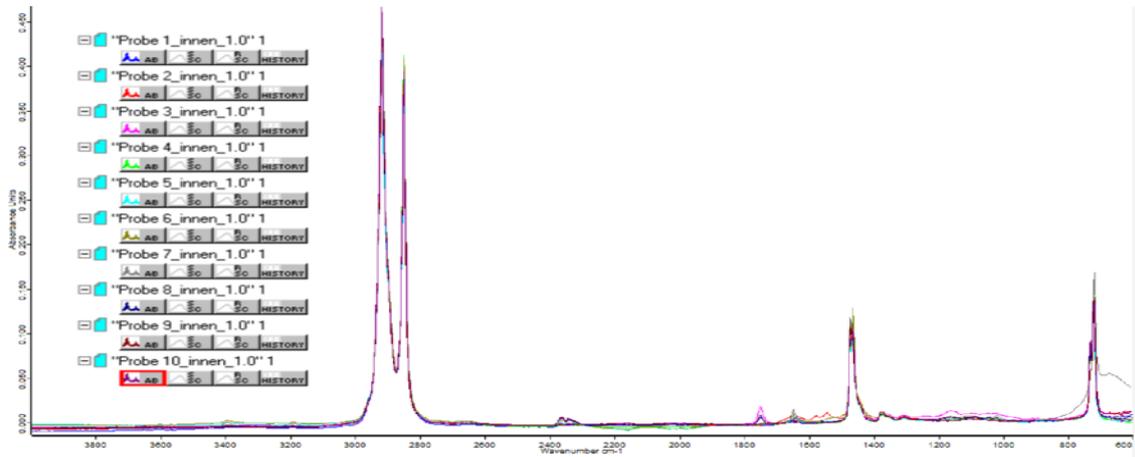


Abbildung 46: FTIR P1-P10 innen

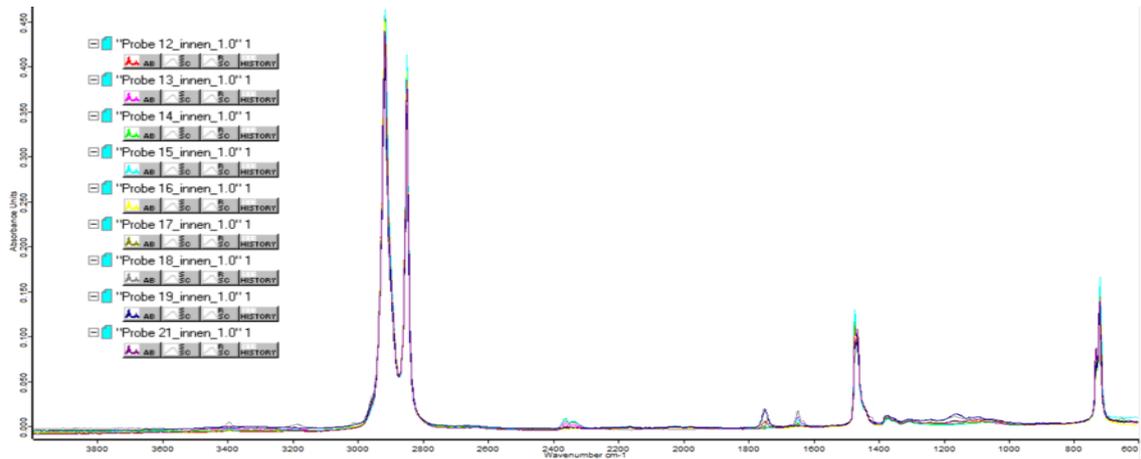


Abbildung 47: FTIR P11-P19 + P21 innen

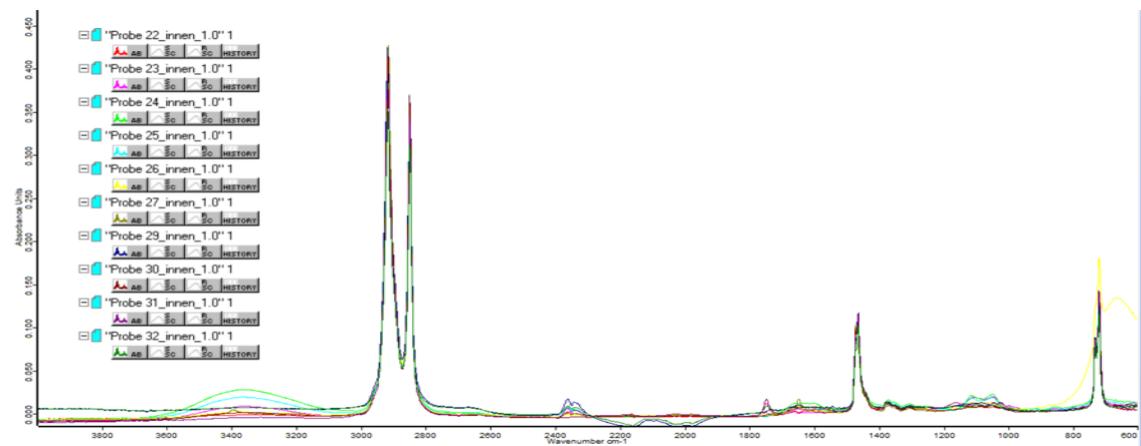


Abbildung 48: FTIR P22-27 + P29-P32 innen

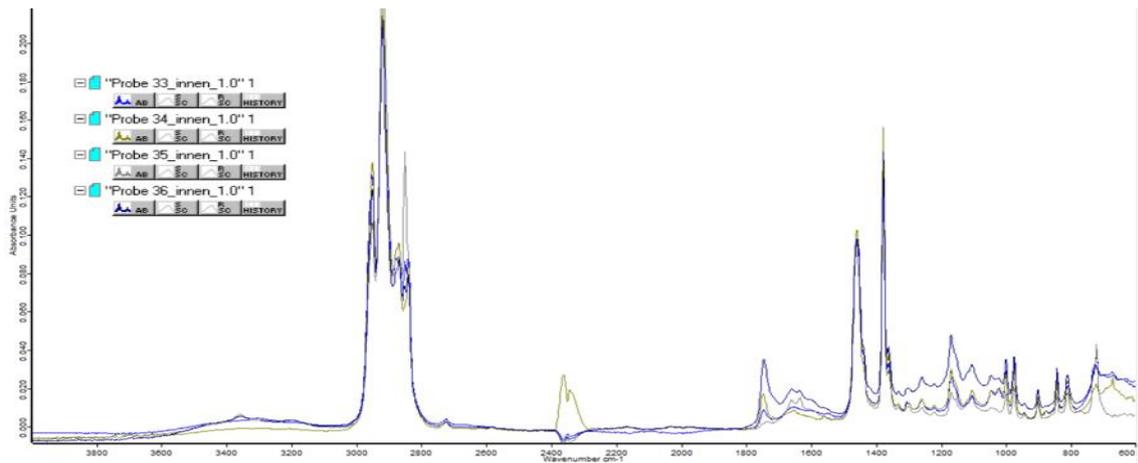


Abbildung 49: FTIR P33-P36 innen

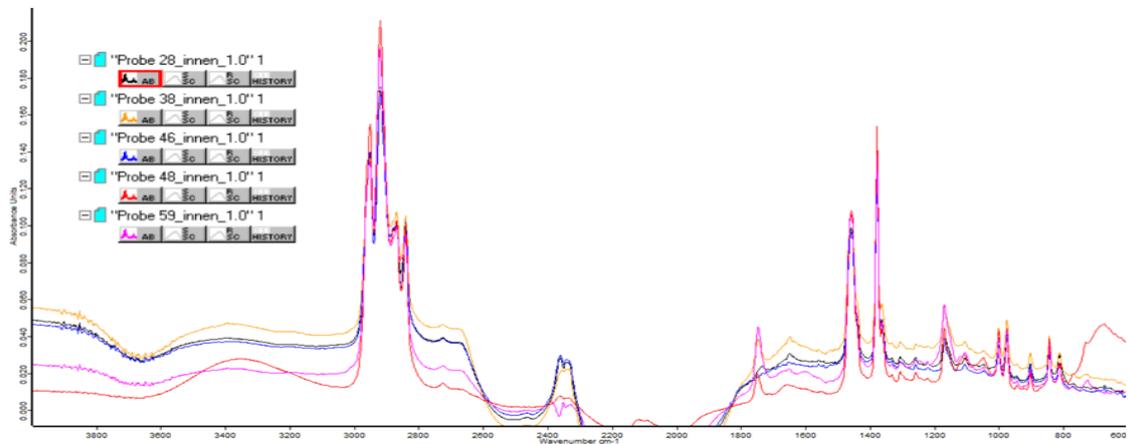


Abbildung 50: FTIR P28, P38, P46, P48, P59 innen

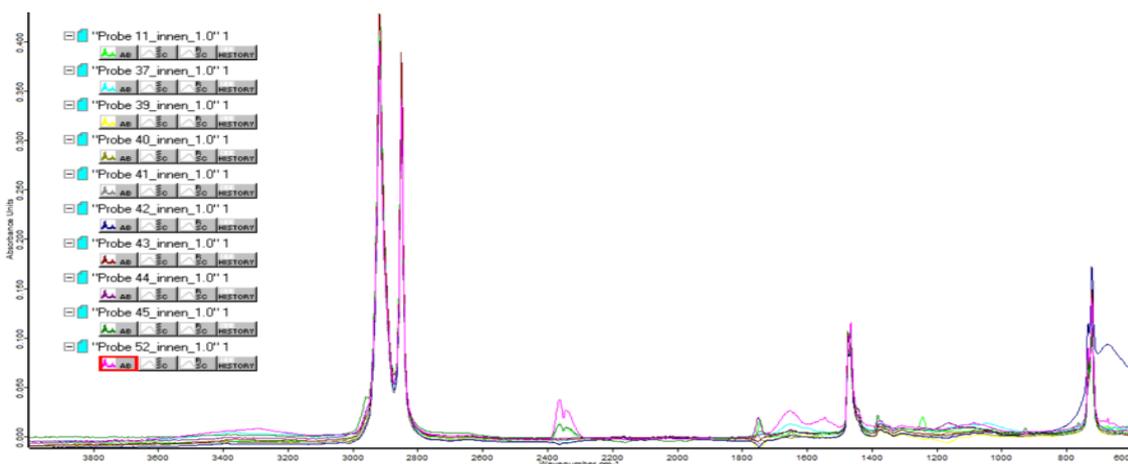


Abbildung 51: FTIR P11, P37, P39-P45, P52 innen

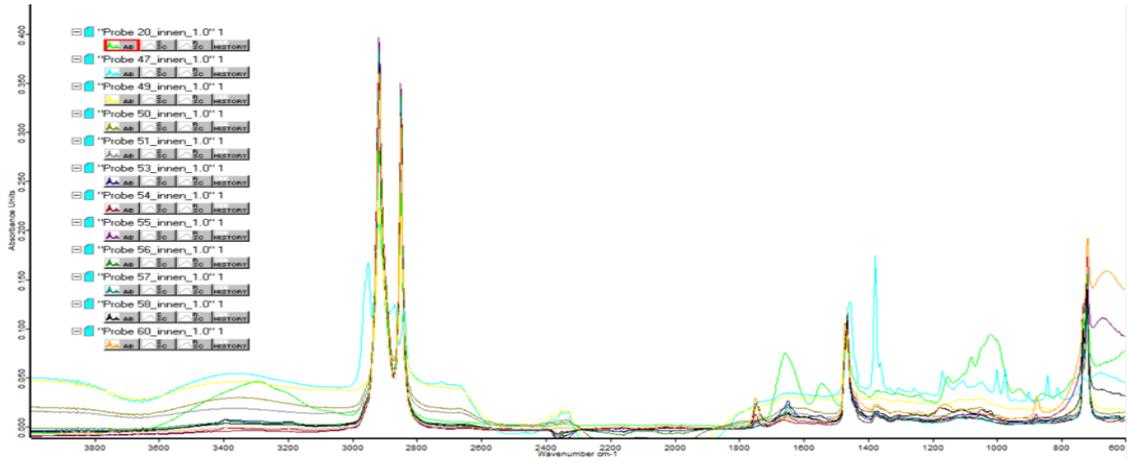


Abbildung 52: FTIR P20, P47, P49, P50, P51, P53, P54-P58, P60 innen

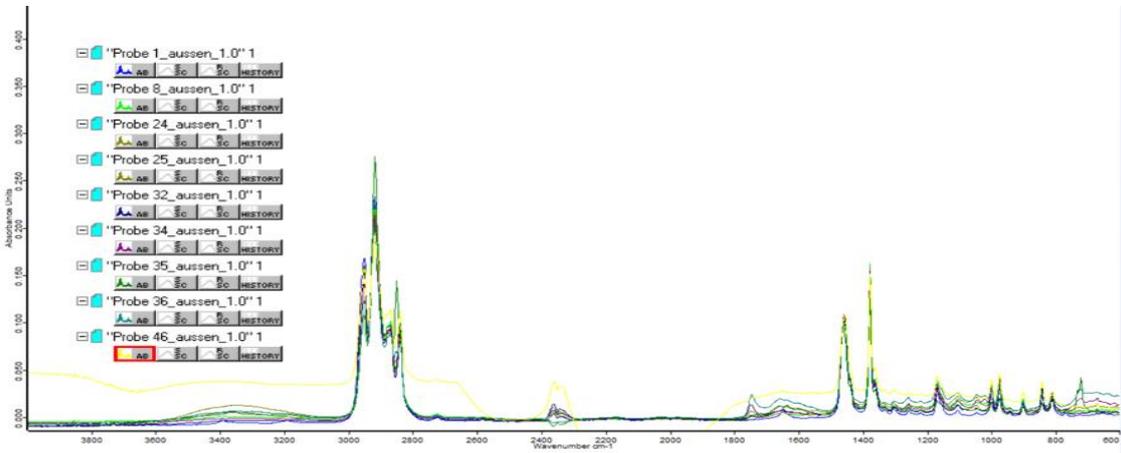


Abbildung 53: FTIR P1, P8, P24, P25, P32, P34, P35, P36, P46 aussen

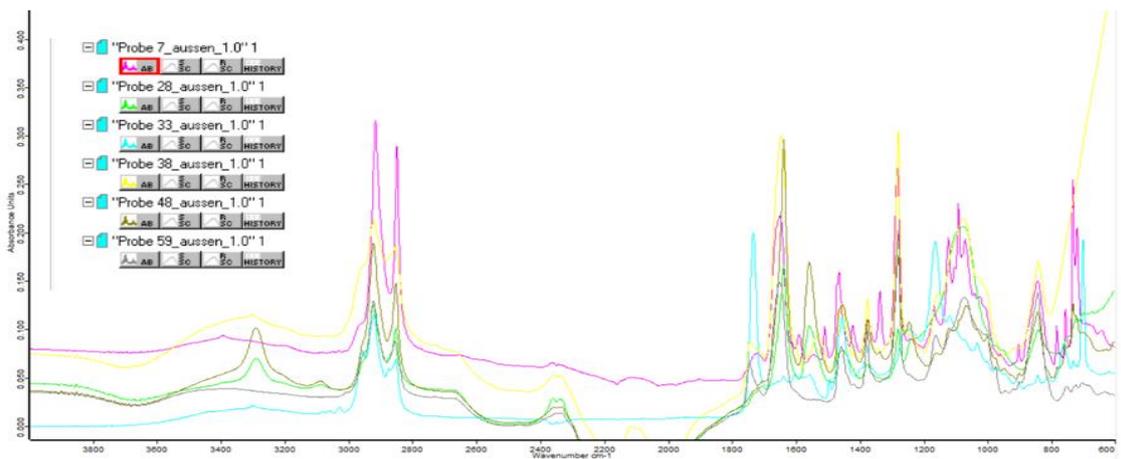


Abbildung 54: FTIR P7, P28, P33, P38, P48, P59 aussen

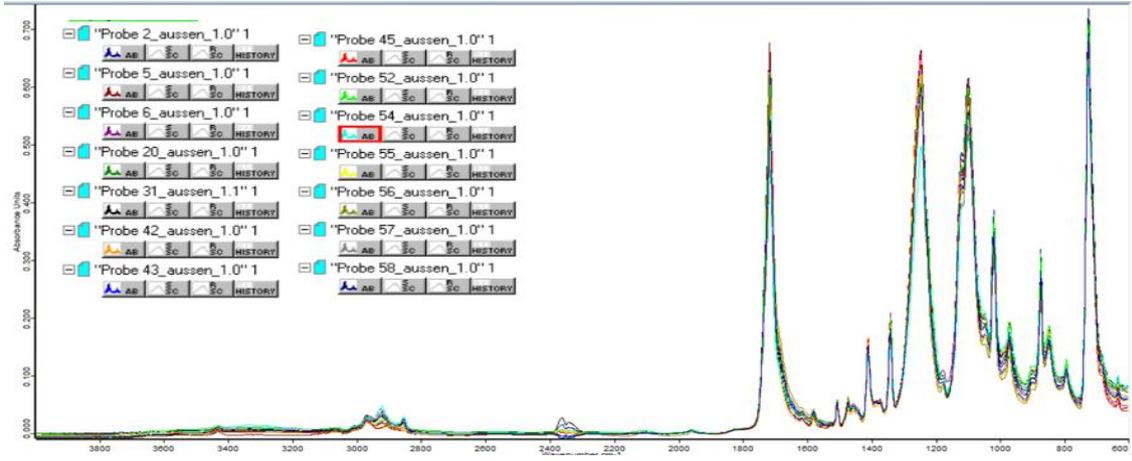


Abbildung 55: FTIR P2, P5, P6, P20, P31, P42, P43, P45, P52, P54-P58 aussen

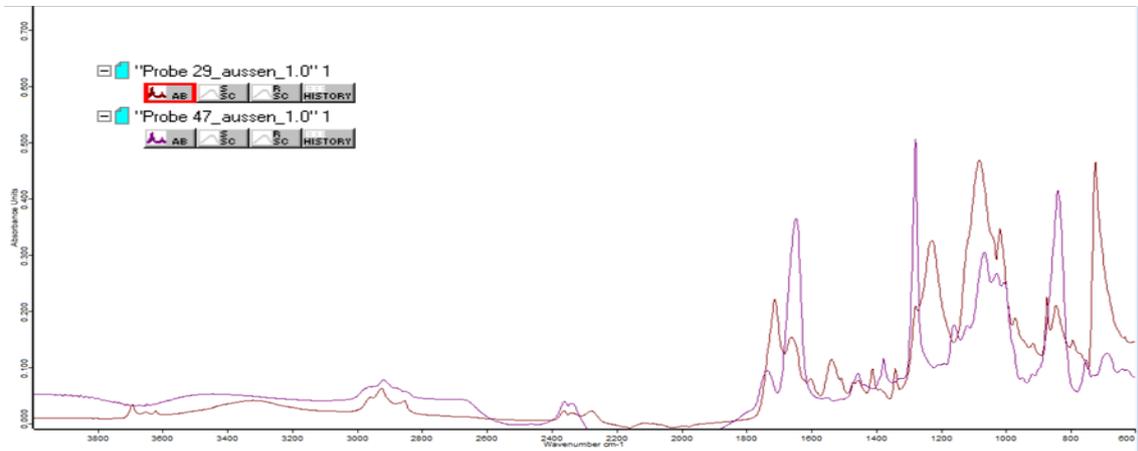


Abbildung 56: FTIR P29, P47 aussen

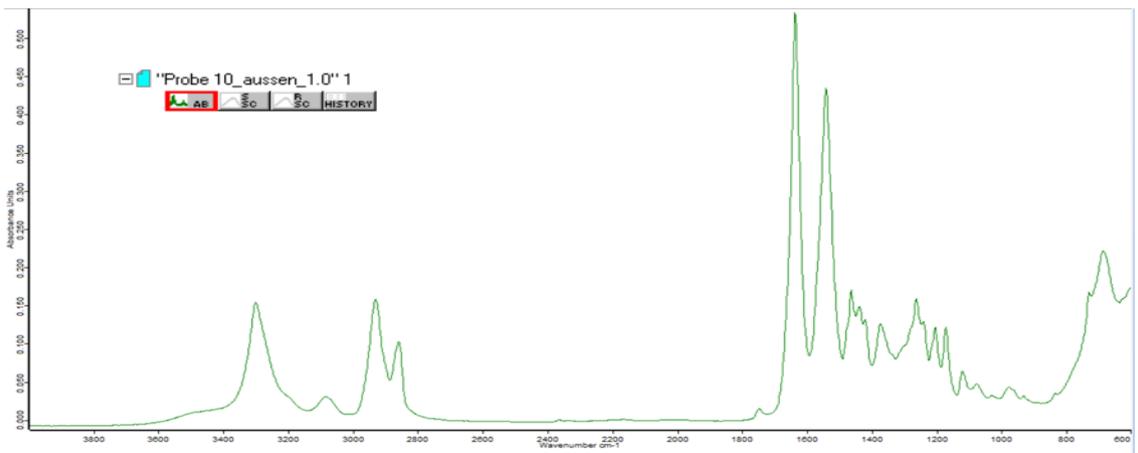


Abbildung 57: FTIR P10 aussen

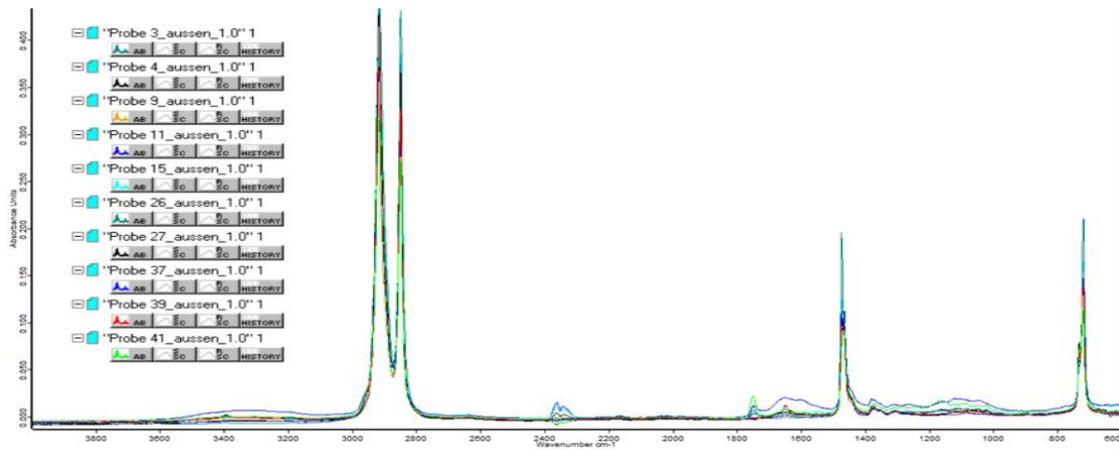


Abbildung 58: FTIR P3, P4, P9, P11, P15, P26, P27, P37, P39, P41 aussen

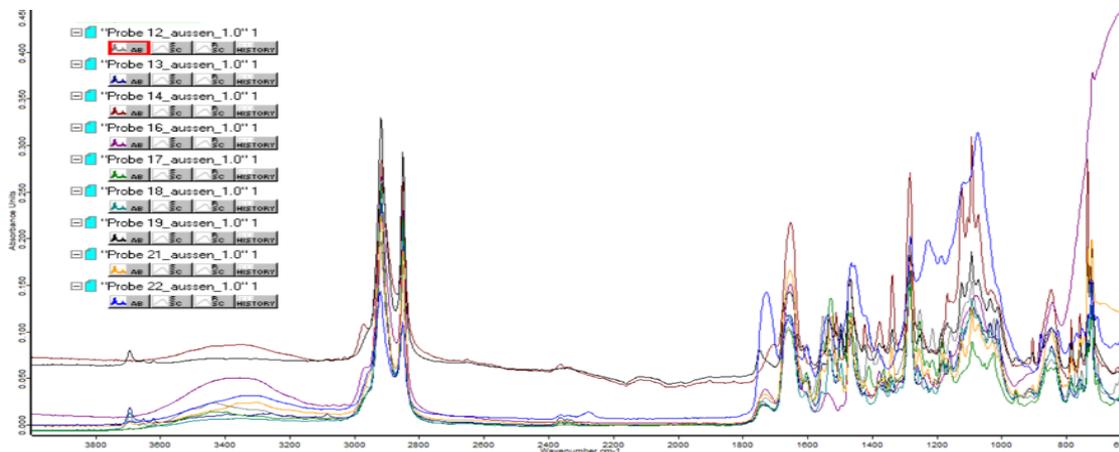


Abbildung 59: FTIR P12, P13, P14, P16-P19, P21, P22 aussen

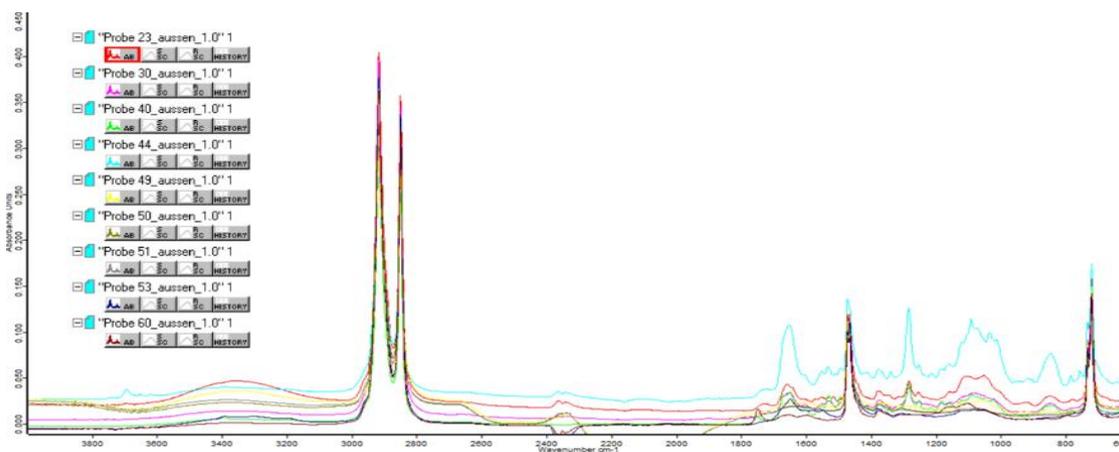


Abbildung 60: FTIR P23, P30, P40, P44, P49-P51, P53, P60 aussen

5.6. LIMI-Aufnahmen

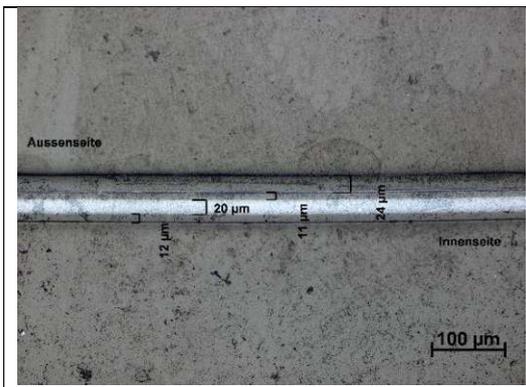
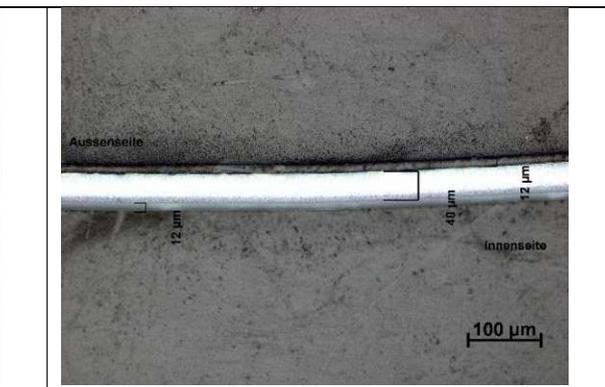
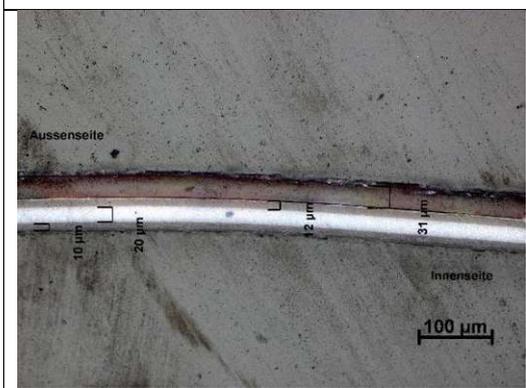
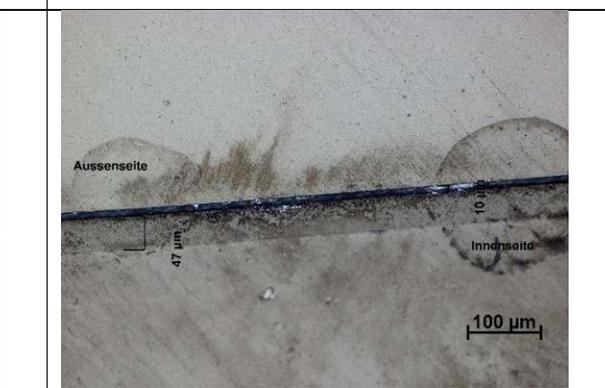
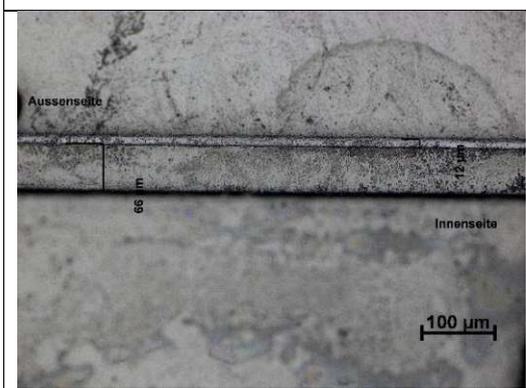
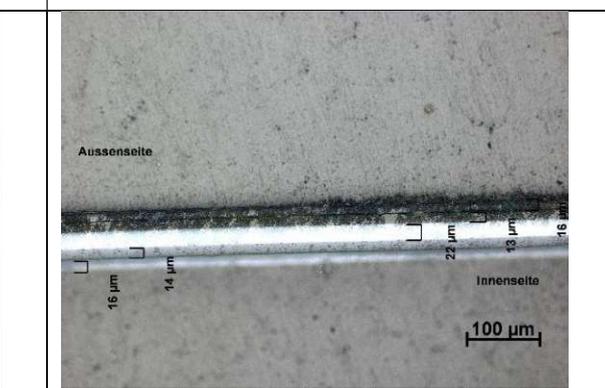
	
<p>Abbildung 61: LIMI P1</p>	<p>Abbildung 62: LIMI P2</p>
	
<p>Abbildung 63: LIMI P3</p>	<p>Abbildung 64: LIMI P4</p>
	
<p>Abbildung 65: LIMI P5</p>	<p>Abbildung 66: LIMI P6</p>



Abbildung 67: LIMIP7

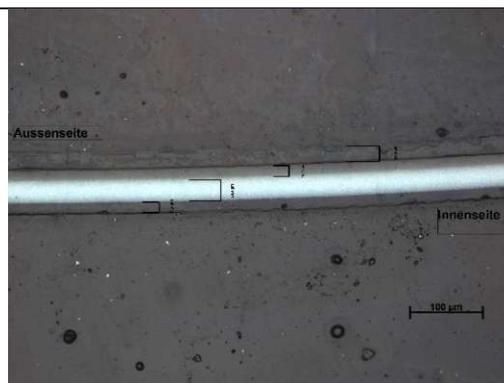


Abbildung 68: LIMIP8

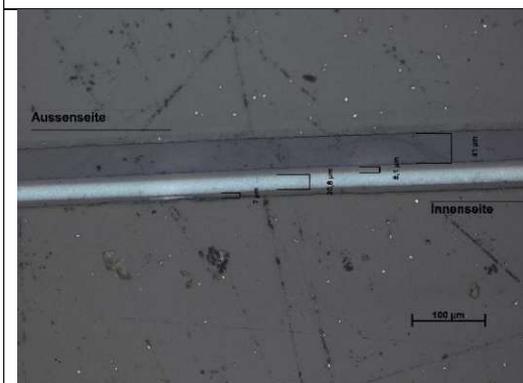


Abbildung 69: LIMIP9

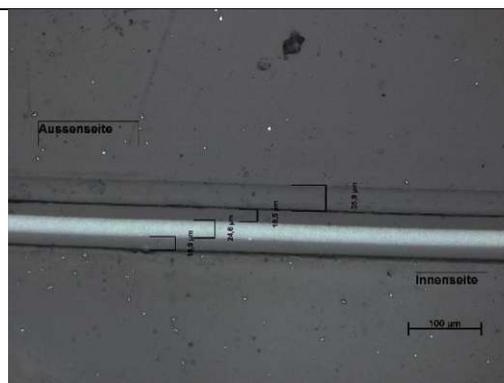


Abbildung 70: LIMIP10



Abbildung 71: LIMIP11

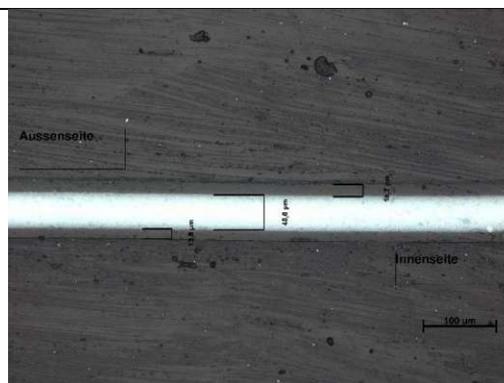


Abbildung 72: LIMIP12

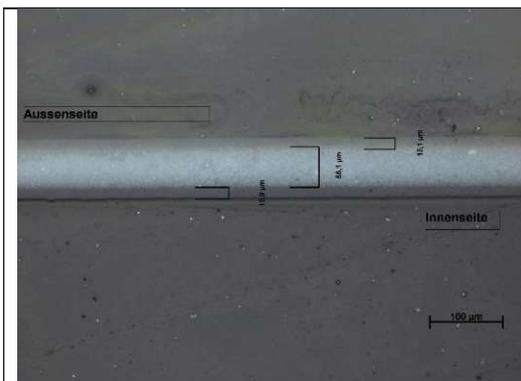


Abbildung 73: LIMIP13

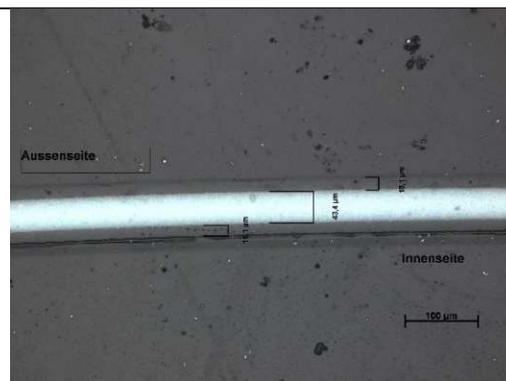


Abbildung 74: LIMIP14

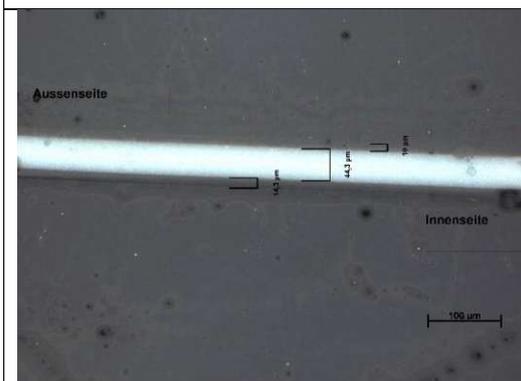


Abbildung 75: LIMIP15

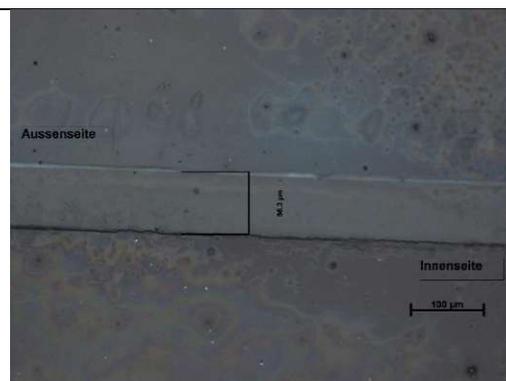


Abbildung 76: LIMIP16

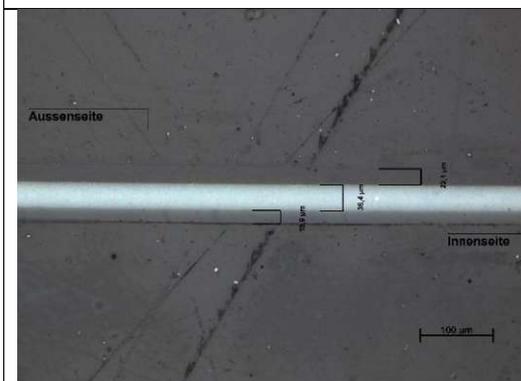


Abbildung 77: LIMIP17



Abbildung 78: LIMIP18

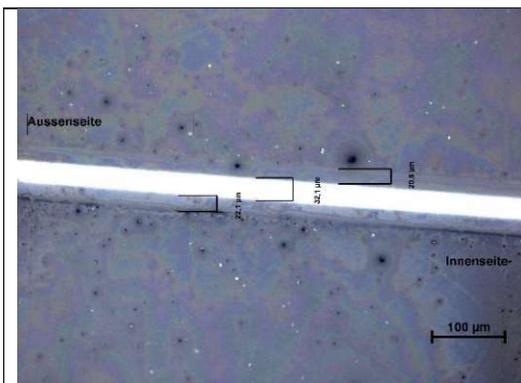


Abbildung 79: LIM1 P19

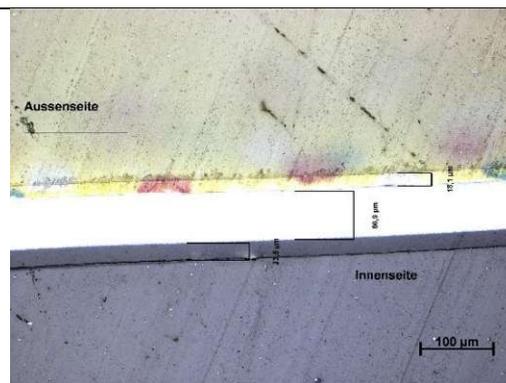


Abbildung 80: LIM1 P20

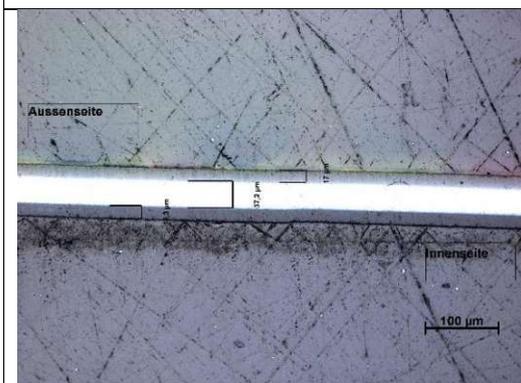


Abbildung 81: LIM1 P21

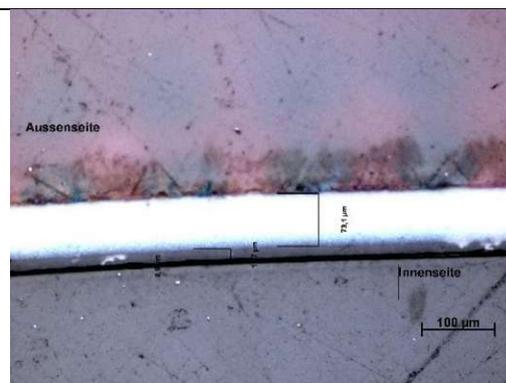


Abbildung 82: LIM1 P22

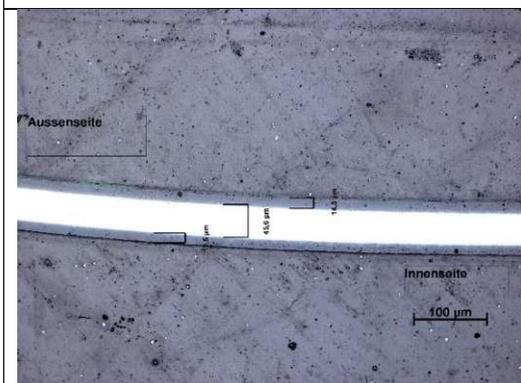


Abbildung 83: LIM1 P23

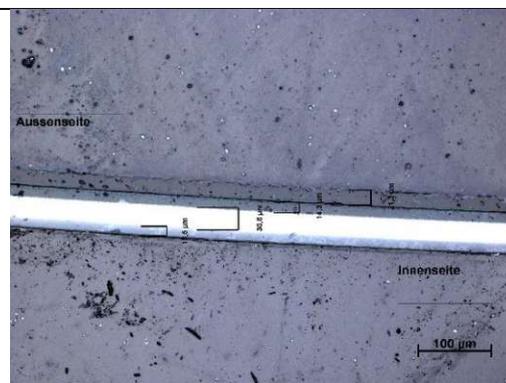


Abbildung 84: LIM1 P24

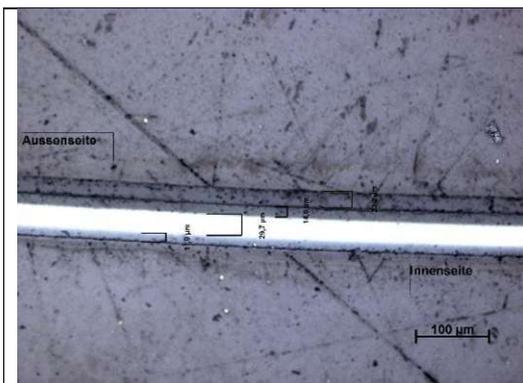


Abbildung 85: LIMIP25



Abbildung 86: LIMIP26

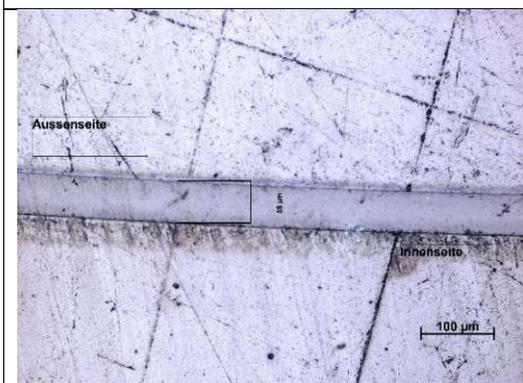


Abbildung 87: LIMIP27

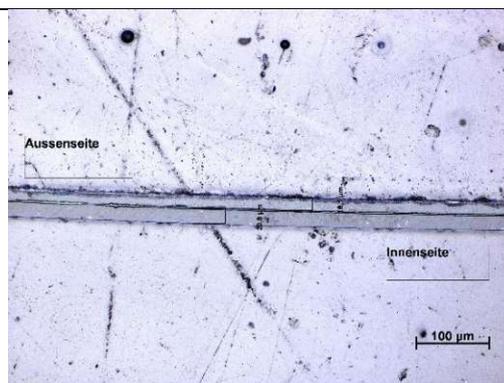


Abbildung 88: LIMIP28



Abbildung 89: LIMIP29

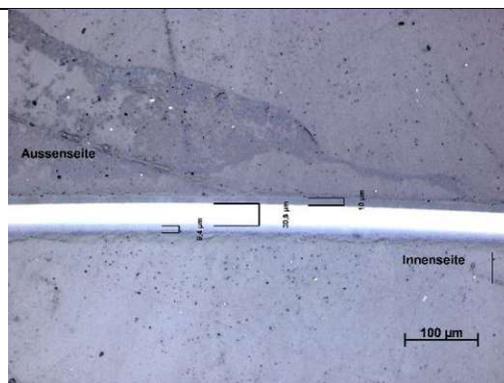


Abbildung 90: LIMIP30

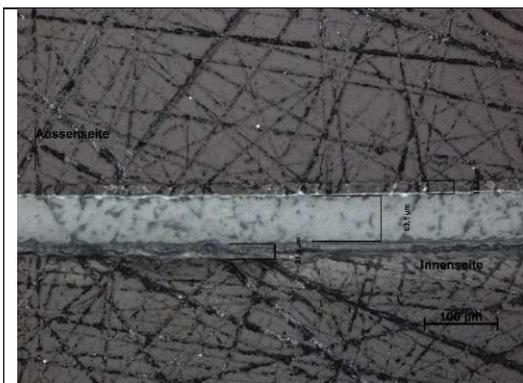


Abbildung 91: LIM1 P31

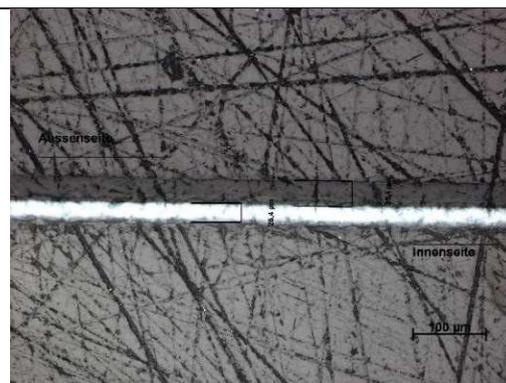


Abbildung 92: LIM1 P32

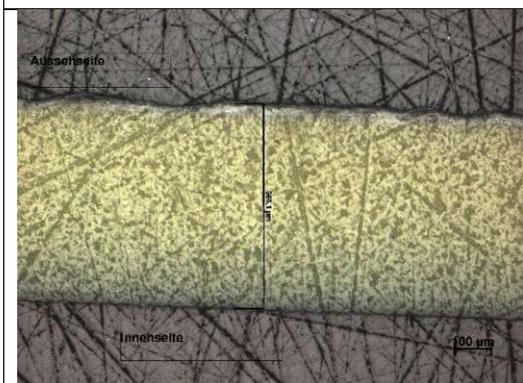


Abbildung 93: LIM1 P33

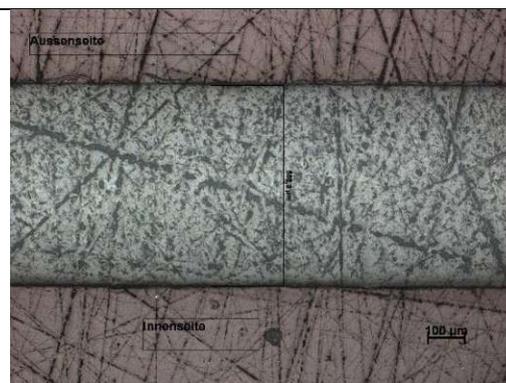


Abbildung 94: LIM1 P34

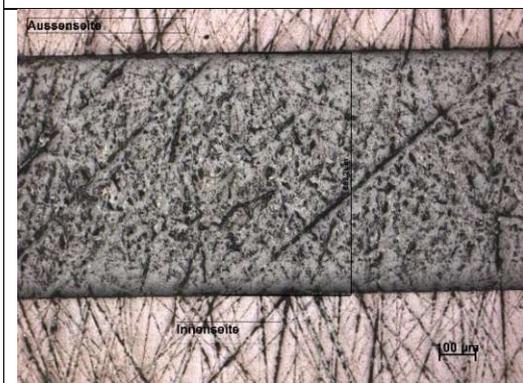


Abbildung 95: LIM1 P35

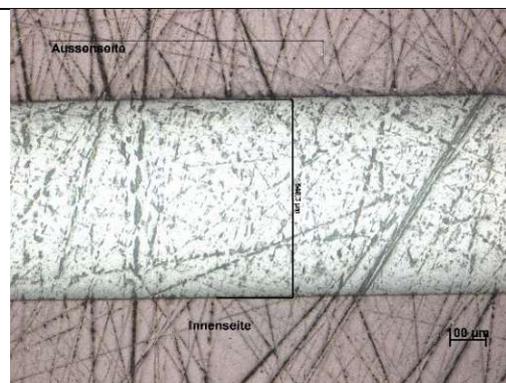


Abbildung 96: LIM1 P36

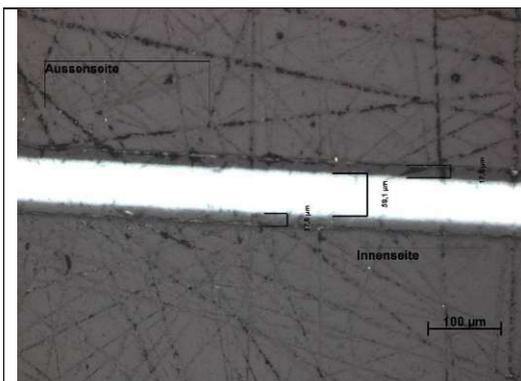


Abbildung 97: LIMI P37

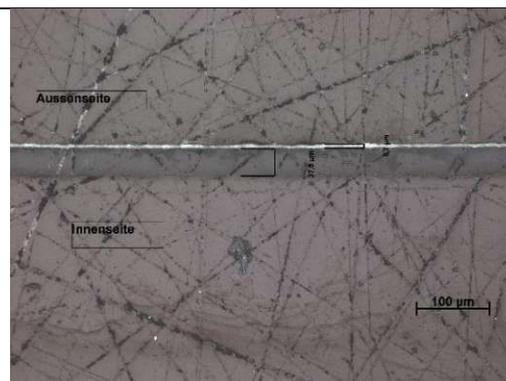


Abbildung 98: LIMI P38

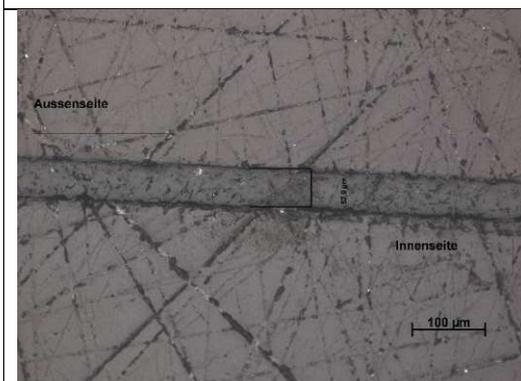


Abbildung 99: LIMI P39



Abbildung 100: LIMI P40

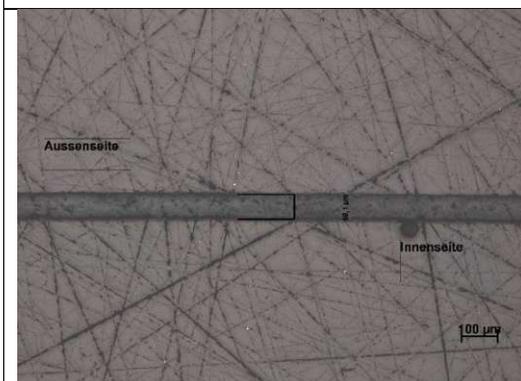


Abbildung 101: LIMI P41

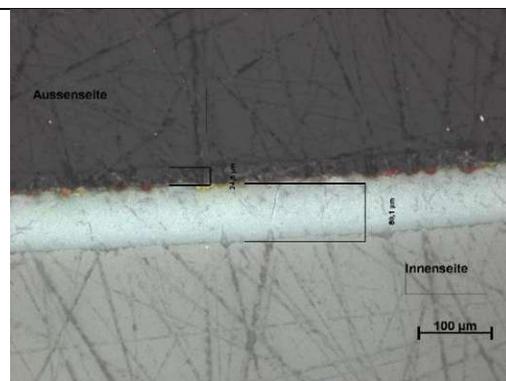


Abbildung 102: LIMI P42

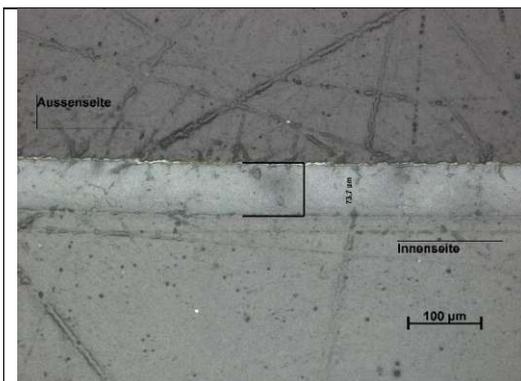


Abbildung 103: LIM I P43

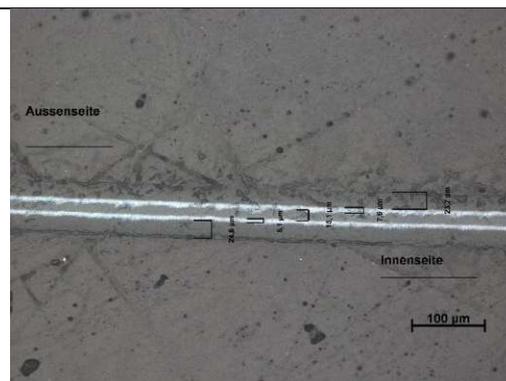


Abbildung 104: LIM I P44

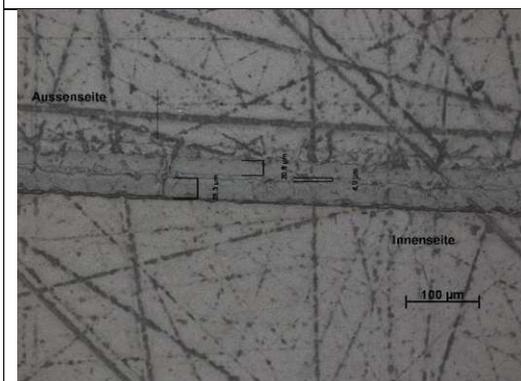


Abbildung 105: LIM I P45

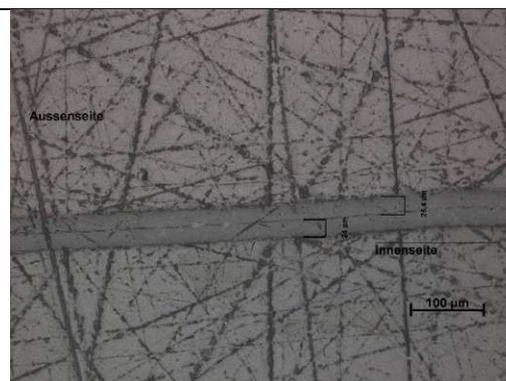


Abbildung 106: LIM I P46

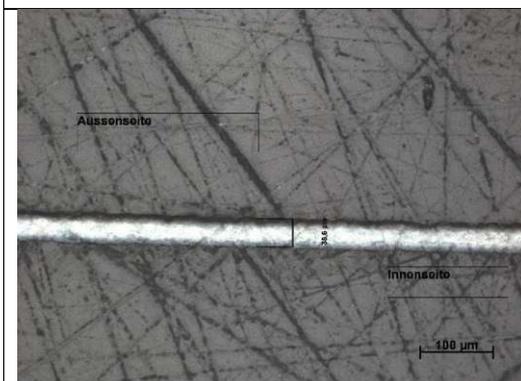


Abbildung 107: LIM I P47

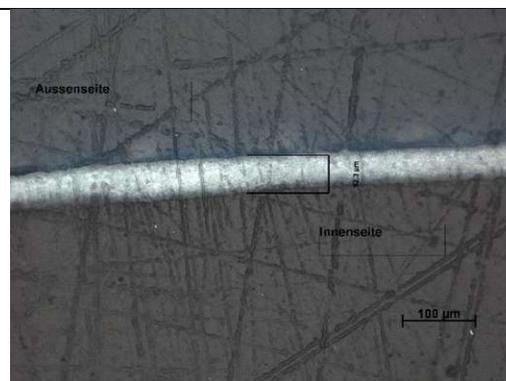


Abbildung 108: LIM I P48

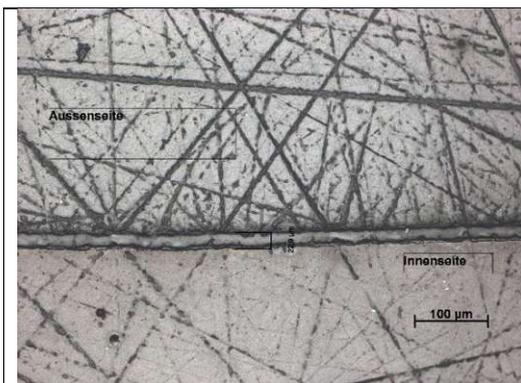


Abbildung 109: LIM I P49

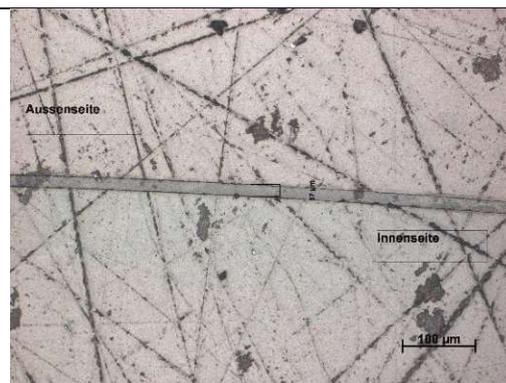


Abbildung 110: LIM I P50

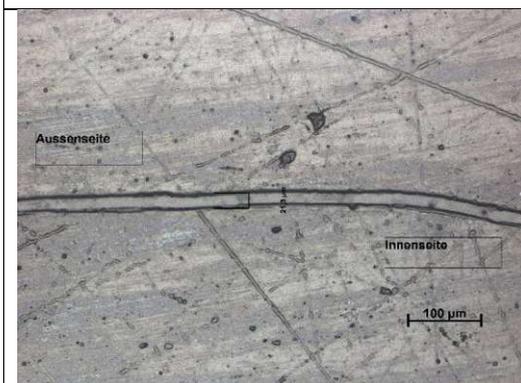


Abbildung 111: LIM I P51

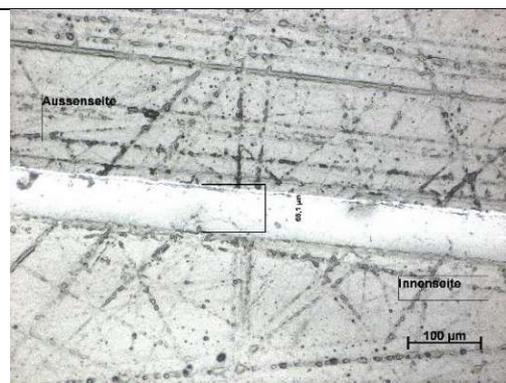


Abbildung 112: LIM I P52



Abbildung 113: LIM I P53

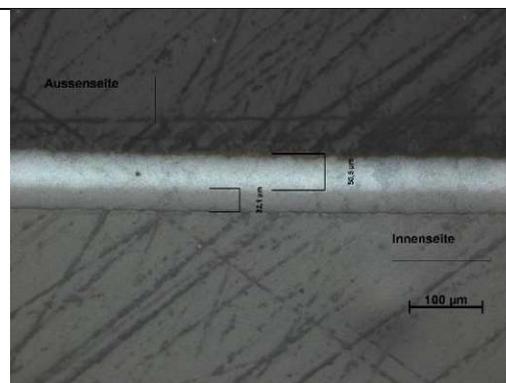


Abbildung 114: LIM I P54

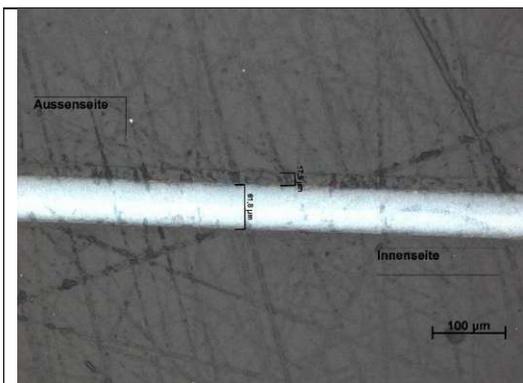


Abbildung 115: LIM I P55

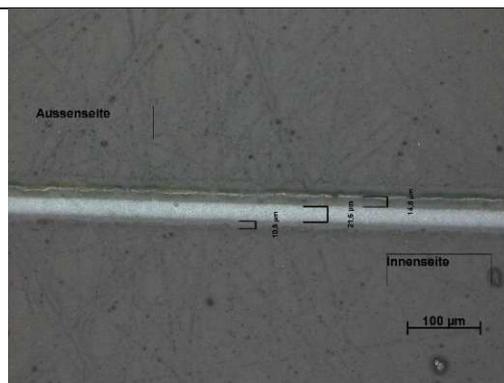


Abbildung 116: LIM I P56

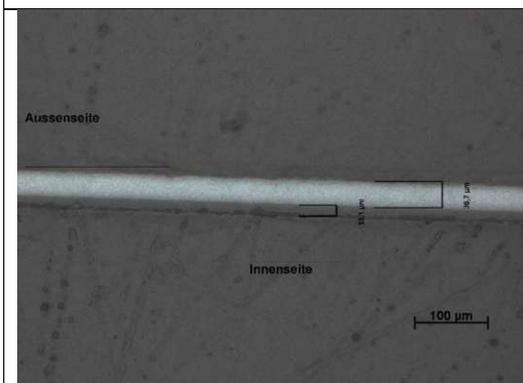


Abbildung 117: LIM I P57

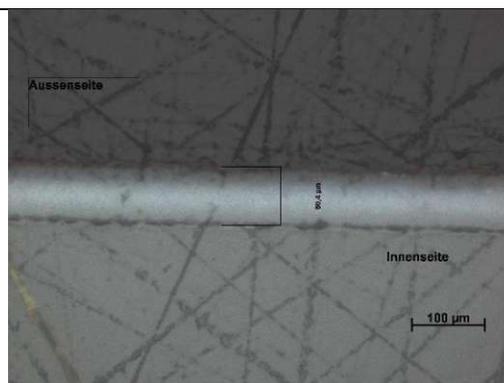


Abbildung 118: LIM I P58

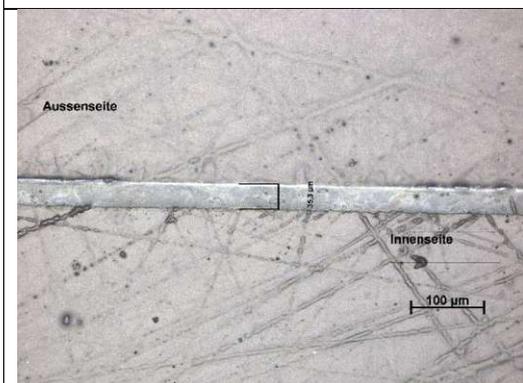


Abbildung 119: LIM I P59

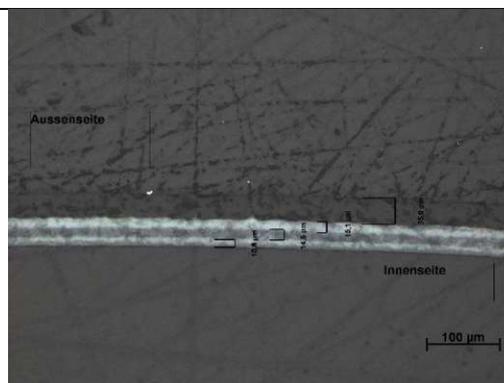


Abbildung 120: LIM I P60

5.7. DSC-Kurven

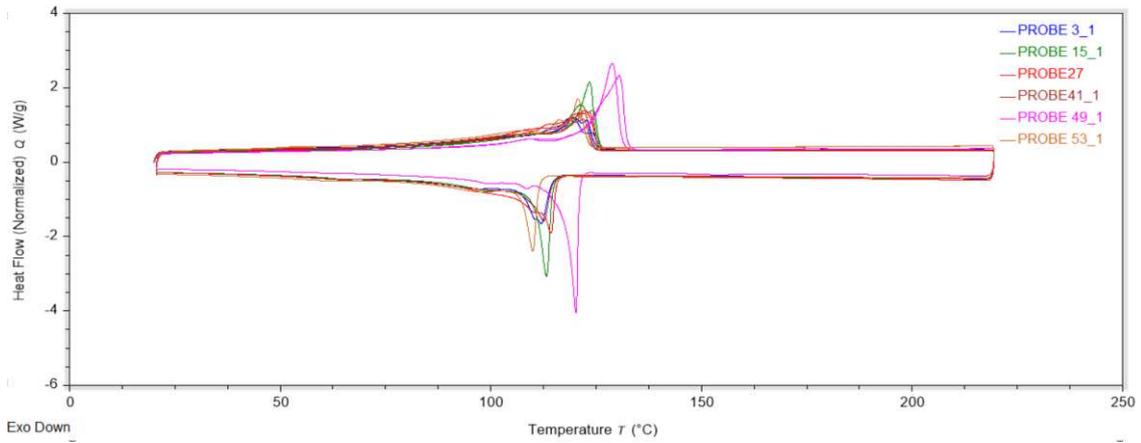


Abbildung 121: DSC P3, P15, P27, P41, P49, P53

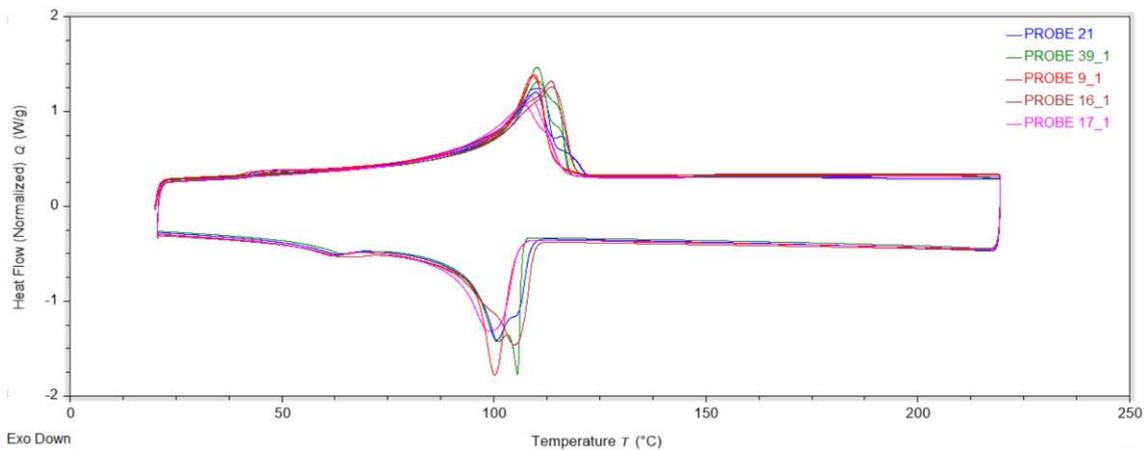


Abbildung 122: DSC P9, P16, P17, P21, P39

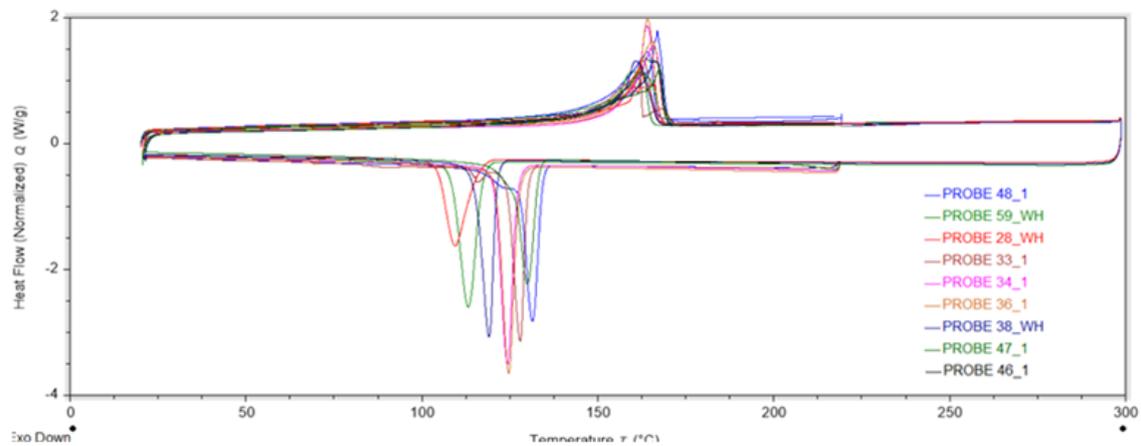


Abbildung 123: DSC P28, P33, P34, P36, P38, P46, P47, P48, P59

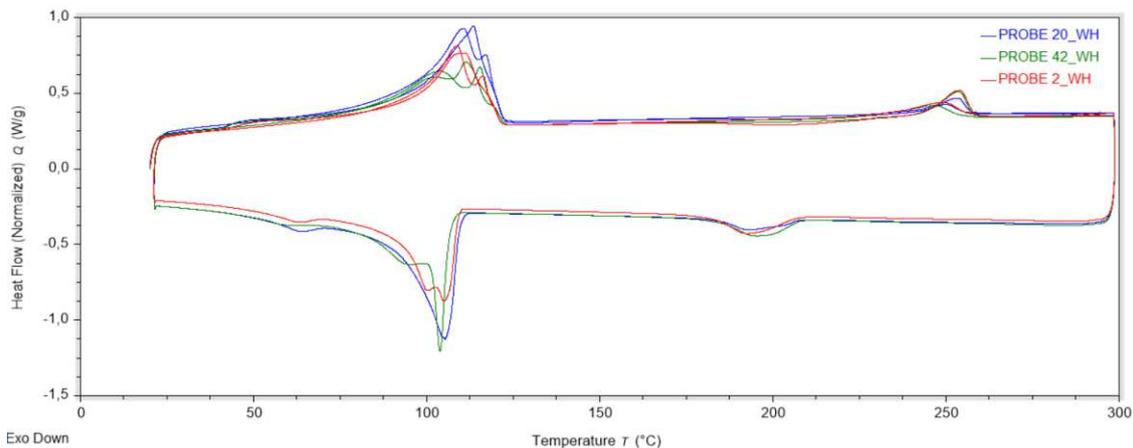


Abbildung 124: DSC P2, P20, P42

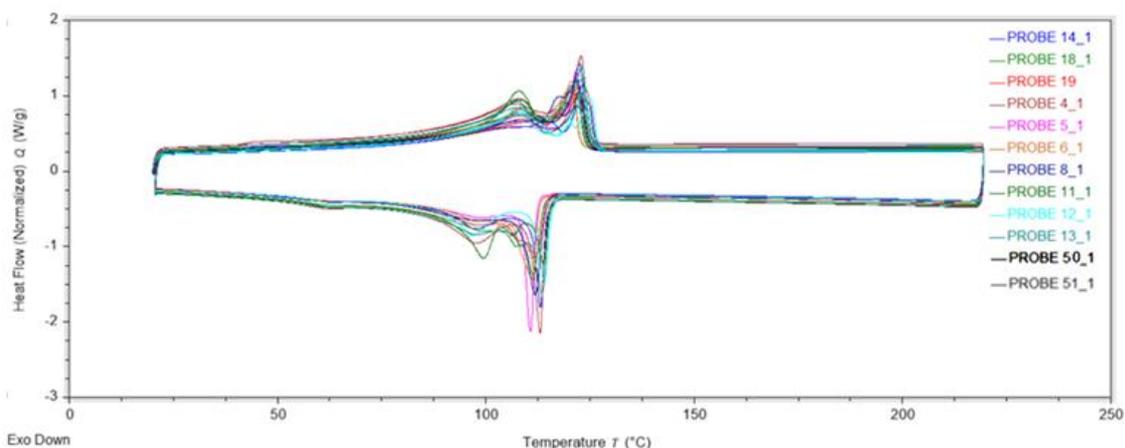


Abbildung 125: DSC P4, P5, P6, P8, P11-P14, P18, P19, P50, P51

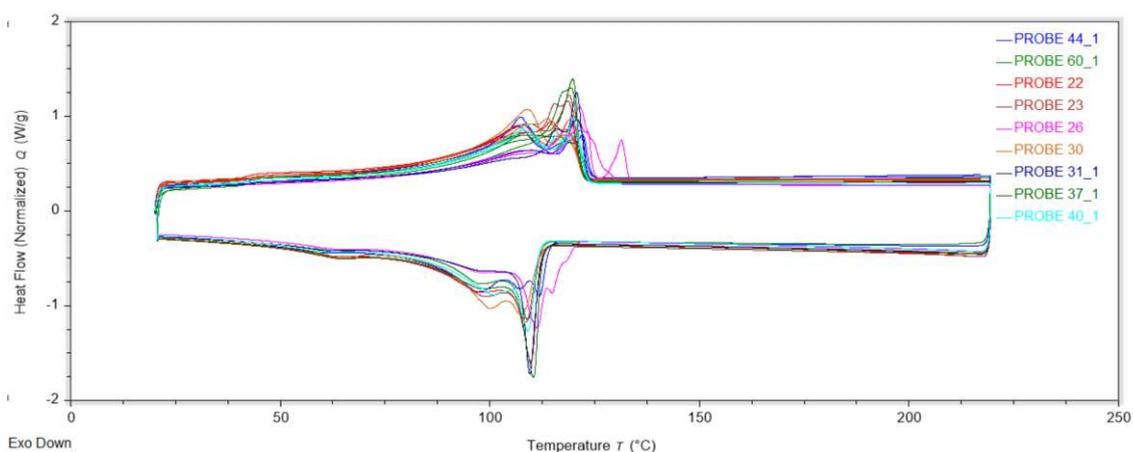


Abbildung 126: DSC P22, P23, P26, P30, P31, P37, P40, P44, P60

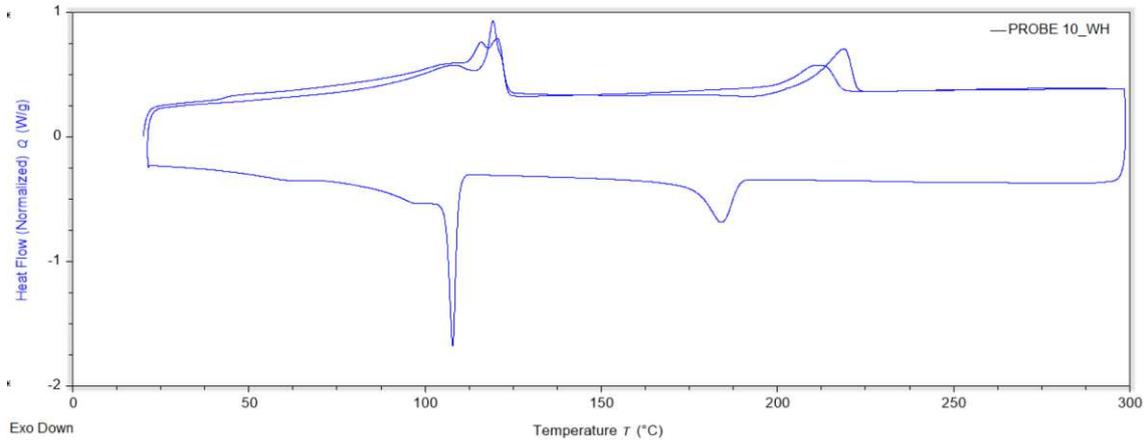


Abbildung 127: DSC P10

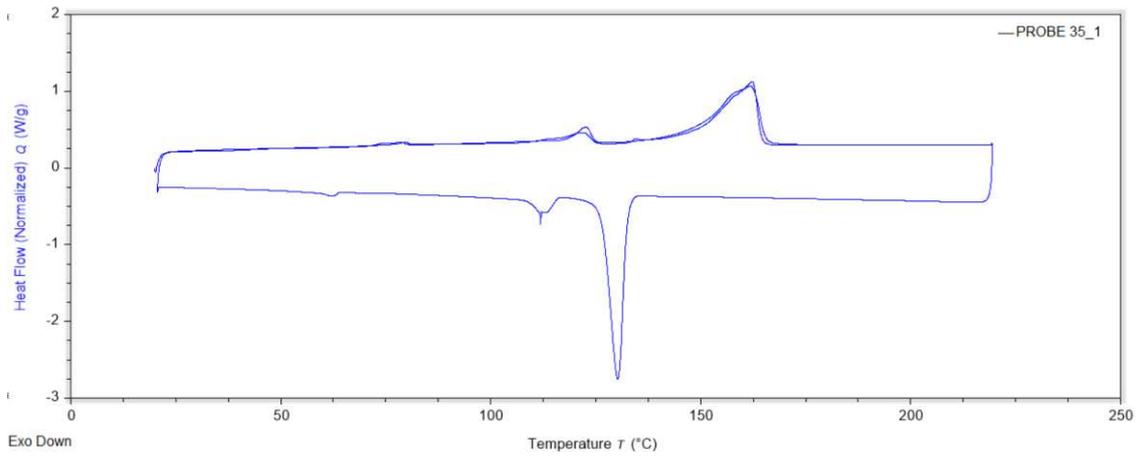


Abbildung 128: DSC P35

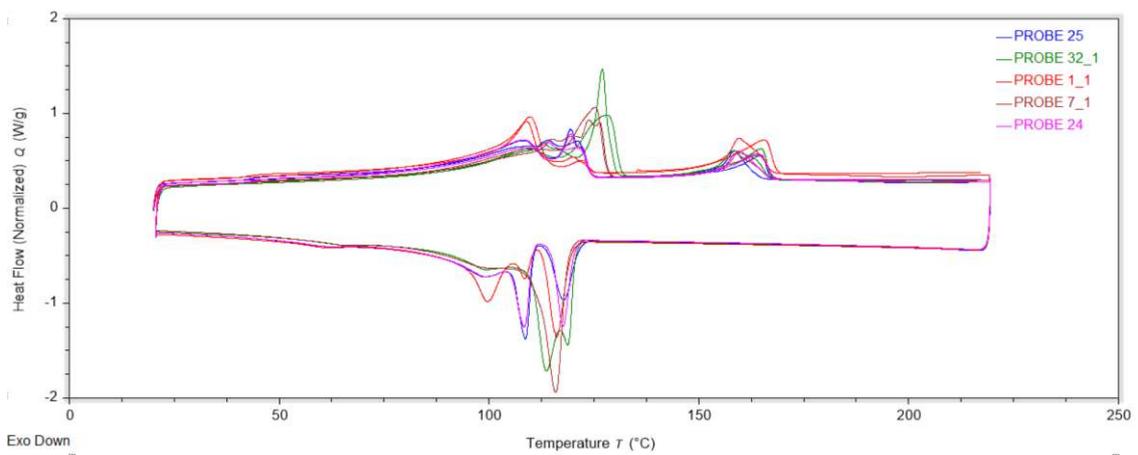


Abbildung 129: DSC P1, P7, P24, P25, P32

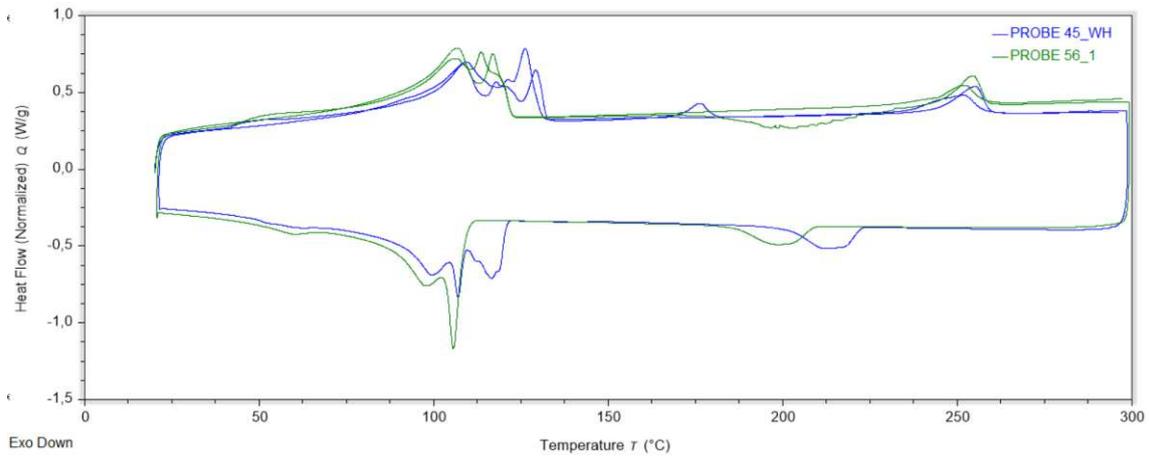


Abbildung 130: DSC P45, P56

5.8. Messdaten Blends

Tabelle 16: Messdaten Blends

	atN [kJ/m ²]	E-Modul [Mpa]	εB [%]	MFI [g/10min.]
MW (PE)	189,526412	267,8619238	99,6734772	1,586633333
σ (PE)	22,8139077	11,04689342	13,1851951	0,051644283
MW (PE+PP)	158,90255	401,4569042	221,863183	1,466783333
σ (PE+PP)	38,0577081	63,89037805	36,9295573	0,044294849
MW (PP)	44,3078324	940,5998501	53,3479802	23,8661
σ (PP)	1,88042201	74,98668557	13,5442911	0,757141369
MW (PE+PET)	11,5437158	536,0510716	20,5365973	19,9232
σ (PE+PET)	1,59491245	113,8385401	4,21946362	0,87113154
MW (Mix)	56,8306011	442,2832681	335,006648	22,8905
σ (Mix)	17,6450702	27,4677768	143,402818	0,729786728