

Technische Universität Wien



Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie

Getreidemarkt 9 | 1060 Wien



Diplomarbeit

im Studiengang

Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau (WIMB)

Charakterisierung von Mehrschicht-Verpackungen in Hinblick auf den weiterführenden Recycling-Prozess

Verfasser: Lukas Alexander Pasler, MSc

Matrikelnummer: 01126938

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

E-mail: vasiliki-maria.archodoulaki@tuwien.ac.at

Kurzbeschreibung

In Anlehnung an die steigende Umweltverschmutzung durch Plastikverpackungen, befasst sich diese Diplomarbeit mit der Analyse von insgesamt 31 unterschiedlichen Mehrschicht-Verpackungen, um diese im weiteren Schritt auf ihre Recyclierbarkeit prüfen zu können. Nach einer prägnanten Einführung in die Thematik mitsamt dem aktuellen Stand der Technik bzgl. der unterschiedlichen Recyclingmethoden und der – zur Herstellung von Multilayer-Verpackungen – verwendeten Herstellungsverfahren, folgt eine Beschreibung der benutzten Messinstrumente sowie die Angabe aller Polymere und haftvermittelnden Substanzen, welche Bestandteil der analysierten Verpackungsfolien sind.

Im zweiten elementaren Teil der Arbeit werden die ermittelten Messergebnisse angeführt und diskutiert, um im weiteren Schritt – auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse – eine Einteilung der analysierten Mehrschicht-Verpackungen hinsichtlich ihres strukturellen Aufbaus vornehmen zu können. Diese Gruppierung bildet schlussendlich die Grundlage für die möglichen Strategien bzgl. der potentiellen Wiederverwertbarkeit von Multilayer-Verpackungen.

Abstract

According to the growing environmental pollution caused by plastic packaging, this diploma thesis deals with the analysis of 31 different multi-layer packaging in order to be able to check their recyclability.

After a succinct introduction to the topic with the current state of the art regarding the different recycling methods and the manufacturing processes of multilayer packaging, it continues with a description of the used measuring instruments and all polymers as well as adhesives, which are components of the analyzed packaging films.

In the second elementary part of the thesis, the measured results are presented and in a further step – based on the knowledge gained – a classification of the analyzed multilayer packaging is outlined. This grouping ultimately forms the basis for the possible strategies regarding the potential recyclability of multilayer packaging.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Multilayer-Verpackungen und ihre Recyclingeigenschaften	2
3. Modified Atmosphere Packaging (MAP)	4
4. Herstellungsverfahren	6
4.1 Extrusion	9
4.1.1 Foliengieß- / Castextrusionsverfahren	9
4.1.2 Blasextrusionsverfahren	10
4.2 Laminieren/Kaschieren	11
4.2.1 Extrusionslaminierung/-kaschierung	12
4.2.2 Klebstofflaminierung/Kaschierung (adhesive lamination)	13
5. Analyseprinzipien und –instrumente	18
5.1 Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC)	19
5.2 Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie (FTIR).....	23
5.3 Mikroskopie	25
5.4 Bestimmung des Massenanteils der jeweiligen Polymere	29
6. Überblick: analysierte Kunststoffe	29
6.1 Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH)	29
6.2 Polyethylen (PE)	31
6.2.1 stark verzweigte Polymerketten / low density polyethylene (LDPE)	31
6.2.2 lineares Polyethylen niederer Dichte / linear low density polyethylene (LLDPE).....	32
6.2.3 Polyethylen hoher Dichte / high density polyethylene (HDPE)	33
6.2.4 Vergleich: LDPE – LLDPE – HDPE	34
6.3 Polyethylenterephthalat (PET)	37
6.4 Polyamid (PA)	40
6.5 Polypropylen (PP)	41
6.6 Polystyrol (PS)	44
6.7 Haftvermittler (HV).....	44
6.8 Klebstoffe	47
6.8.1 Schmelzklebstoffe.....	48
6.8.2 Laminier-/Kaschierklebstoffe.....	49
6.8.3 Dispersionsklebstoffe	49
6.9 Primer	50
7. Auswertung	50
7.1 DSC-Auswertung: Deckelfolien	51
7.2 DSC-Auswertung: Untertassen	62
7.3 FTIR-Auswertung	69
7.4 Auswertung: prozentueller Massengehalt	70
8. Zusammenfassung	74
Anhang.....	VII
Tabellenverzeichnis	XLI
Literaturverzeichnis.....	XLII

Abkürzungsverzeichnis

MAP	Modified Atmosphere Packaging / Verpacken mit modifizierter Atmosphäre
EVOH	Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer
PE	Polyethylen
LDPE	Low-density polyethylene / stark verzweigte Polymerketten
LLDPE	Linear low-density polyethylene / lineares Polyethylen niedriger Dichte
HDPE	High-density polyethylene / schwach verzweigte Polymerketten
PET	Polyethylenterephthalat
CPET	kristallines Polyethylenterephthalat
APET	amorphes Polyethylenterephthalat
BOPET	biaxial orientiertes Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PP-it	isotaktisches PP
PP-st	syndiotaktisches PP
PP-at	ataktisches PP
CPP	cast polypropylene / ungerecktes Polypropylen
BOPP	biaxially oriented polypropylene / biaxial verstrecktes Polypropylen
OPP	oriented polypropylene / orientiertes Polypropylen
PA	Polyamid
HV	Haftvermittler
FTIR	Fourier-Transform-Infrarotspektrometer
DSC	differential scanning calorimetry / dynamische Differenzkalorimetrie
PS	Polystyrol
PVDC	Polyvinylidenchlorid
EVAC	Ethylen-Vinylacetat-Copolymere
UV	Ultraviolettstrahlung
EB	Elektronenstrahl
EVA	Ethylen-Vinylacetat-Copolymere
SiC	Siliciumcarbid
MAH	Maleinsäureanhydrid modifizierte Polyolefine

Danksagung

An dieser Stelle meiner Arbeit möchte ich mich recht herzlich bei meiner Betreuerin, Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki, bedanken, die mir nicht nur den Themenvorschlag dieser Arbeit gegeben hat, sondern auch einen wesentlichen Beitrag zu meinem Erfolg in der Form von unterstützenden Recherchearbeiten sowie der Bereitstellung wichtiger Informationen geleistet hat. Meinen Dank möchte ich auch an Hrn. Dipl.-Ing. Bernhard Mumelter richten, der – aufgrund seiner langjährigen Berufserfahrung in der Verpackungsindustrie – für die Richtigstellung der Begriffsdefinitionen bzgl. der Herstellungsverfahren und den damit erforderlichen haftvermittelnden Substanzen gesorgt hat.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Projektabwicklungsbeauftragten Hrn. Stefan Zellhofer, Hrn. Fachob.Insp Gerhard Kern und Fr. Univ.Bedienstete Edith Asiemo für deren ausführliche Einführung in die unterschiedlichen Messmethoden, die Bereitstellung der Geräte und deren unterstützende Tätigkeiten sowie Vertrauen. Weiterhin danke ich Hrn. Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Koch, ohne dessen Hilfe die Durchführung des Mikrotomschnittes nicht möglich gewesen wäre.

Für die Weitergabe firmeninterner Informationen zum Zweck der Unterstützung meiner Forschungsarbeit möchte ich mich bei den entsprechenden Unternehmen bedanken.

Zu guter Letzt möchte ich meinen besonderen Dank an meine Familie aussprechen. Einerseits an meine Eltern, die mich nicht nur in finanzieller, sondern auch in sozialer Hinsicht unterstützen und natürlich an meine Brüder, die mir stets eine wichtige Stütze im Leben sind und ohne deren Rückhalt ich höchstwahrscheinlich nicht fähig gewesen wäre, meine bisher erbrachten Leistungen zu erbringen.

1. Einleitung

Die nachfolgende Arbeit handelt von der Analyse von Mehrschicht-Verpackungen, um – mit Hilfe der eruierten Daten – einen geeigneten Recycling-Prozess durchführen zu können. Der Probenumfang umfasst 31 unterschiedliche Proben, welche aus Verpackungen von Wurstwaren stammen. Das vorrangige Ziel besteht darin, den prozentuellen Massengehalt der Kunststoffe zu bestimmen, welche für die Herstellung der Verbundfolien verwendet werden. Die zusätzliche Information über die einzelnen Schichtdicken innerhalb einer Verbundfolie soll im Weiteren die Frage der Notwendigkeit einer Trennung der Oberfolien von den Unterfolien im Recycling-Prozess beantworten. Da der Versuch, Auskünfte von den Wurstwaren- bzw. Verpackungsherstellern hinsichtlich des strukturellen Aufbaus und des Herstellungsprozesses zu erlangen, – bis auf ein paar wenige Ausnahmen – ergebnislos verlief, stand zunächst die Auswahl geeigneter Messinstrumente im Vordergrund.

Demnach werden zur Ermittlung der erforderlichen Kennwerte folgende Instrumente herangezogen:

- Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)
- Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (FTIR)
- Mikroskop

Da sich die Informationen über den Aufbau von Mehrschicht-Verpackungen zum Teil stark voneinander unterscheiden, ist ein weiteres Ziel dieser Arbeit, eindeutige und nachvollziehbare Messergebnisse bereitzustellen. Diese Wissensgrundlage soll im weiteren Schritt dazu dienen, mögliche Ansatzweisen und Strategien für einen potentiellen Recyclingprozess entwickeln zu können.

2. Multilayer-Verpackungen und ihre Recyclingeigenschaften

Bei der Betrachtung der jährlichen Mengen an Plastikverpackungsabfällen ist eine steigende Tendenz zu erkennen. Demnach werden heutzutage jährlich 49 Mio. Tonnen Plastik in Europa verbraucht, wovon rund 40 % in Form von Verpackungen anfällt. Somit landen von jeder/m EuropäerIn durchschnittlich 30 kg an Plastikverpackungen auf dem Müll, wovon nur ca. 30 % recycelt werden [1]. Unterschiede in der Recyclingfähigkeit von Lebensmittelverpackungen bestehen insbesondere wegen der Verwendung von Materialkombinationen, die für die Erfüllung der Konsumenten Anforderungen notwendig sind. Eine – aus mehreren Folien – zusammengesetzte Mehrschichtfolie, oder auch Multilayer-Folie genannt, sollte idealerweise folgende Eigenschaften erfüllen [2]:

- guter Schutz für den Inhalt
- ansprechendes Erscheinungsbild
- geringes Gewicht
- angenehme Haptik und Handhabung
- umweltschonend

Hinsichtlich des Umweltschutzes in der Verpackungsindustrie gibt es unterschiedliche Ansätze, wobei grundsätzlich zwischen der Wiederverwendung und dem Recycling von Verpackungsmaterial unterschieden wird. Im Gegensatz zur Wiederverwendung, wo Produkte in ihrer ursprünglichen Form wiederverwendet werden, wie z.B. bei Pfandflaschen, bedeutet Recycling, dass Materialien – nach der Wiederaufbereitung – zu neuen Produkten verarbeitet werden. Abbildung 1 zeigt jene grundlegenden Handlungen, welche mit dem Begriff *Recycling* zusammengefasst werden.

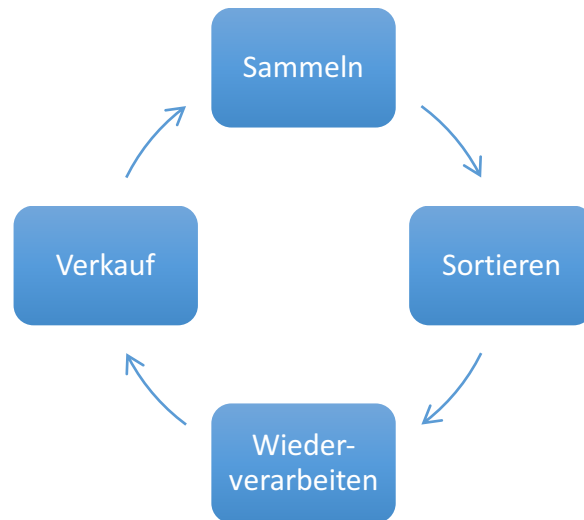


Abbildung 1: Recycling-Prozess, Eigene Darstellung (Quelle: [3])

Neben dem wirtschaftlichen Aspekt des Recyclings, stellt sich insbesondere bei Materialkombinationen die Frage der Realisierbarkeit. Die Schwierigkeit besteht vorrangig in der Trennung der einzelnen Werkstoffe voneinander, um sortenreine Regranulate mit vergleichbaren Eigenschaften – wie jene der neu hergestellten Polymere – erhalten zu können. Nachdem das mit den bisher vorhandenen mechanischen Recyclingverfahren nicht möglich gewesen ist, entwickelte das Unternehmen APK AG einen – auf Lösungsmittel basierenden – Recyclingprozess, der unter dem Namen *Newcycling* bekannt ist. Bislang ist nur die Trennung von PP, flexiblem PP sowie zwischen PE und PA möglich, wobei hierbei nach der Isolierung vom – im Lösungsmittel zersetzten – PE vom nicht gelösten PA eine separate Extrusion der beiden Phasen stattfindet [4], [5]. Im Rahmen eines Projektes hat der Verpackungshersteller Mondi die daraus entstandenen Regranulate bereits für die Herstellung einer koextrudierten PE-Folie verwenden können, indem die LDPE-Neuwaren-Granulate größtenteils durch APK-LDPE-Regranulate ersetzt wurden [6]. Zukünftig sollen weitere Verfahren entwickelt werden, womit das Recyceln von sämtlichen Multilayer-Verpackungen nicht nur ermöglicht, sondern auch wirtschaftlich lukrativ gestaltet werden soll [5]. Eine weitere Möglichkeit in Hinblick auf eine nachhaltige Produktion von Kunststoffverpackungen stellt die vom Unternehmen Danapak Flexibles – ausschließlich aus PET – bestehende Verpackung für Joghurts,

Süßwaren und Feinkost dar. Demnach kann beim Recyclingprozess auf eine Trennung von unterschiedlichen Materialien verzichtet werden [7].

3. Modified Atmosphere Packaging (MAP)

Bei der Betrachtung der Absatzzahlen von abgepackten Lebensmitteln kann innerhalb der vergangenen 50 Jahren ein erhebliches Wachstum festgestellt werden. Trotz des gestiegenen Bedarfs, ist die Anzahl an Lebensmittelhersteller bzw. –händler merklich gesunken. Geeignete und kostengünstige Verpackungen sind einerseits wegen der Konsumentenforderung nach frischen bzw. frisch aussehenden Lebensmitteln und andererseits aufgrund der – durch konzentrierte Lebensmittelproduktionsanlagen bedingten – längeren Distributionswege notwendig [8]. Nachdem diese Anforderungen mit Monofolien nur bedingt bis gar nicht erfüllt werden können, produzieren Verpackungshersteller so genannte Multilayer-Verpackungen, welche aus mind. 2 Schichten bestehen. Faktoren, die Verpackungen erfüllen sollten, sind bspw. spezifische Barriereigenschaften bzgl. Wasserdampf oder Sauerstoff, Siegelfähigkeit, optisches Erscheinungsbild, hohe Reißfestigkeit, Formbarkeit etc. [9]. Die Verpackungstechnologie *MAP* beschreibt jenes Verfahren, welches u.a. für die Verlängerung der Haltbarkeit von Wurstwaren verwendet wird. Hierbei wird durch die Zugabe von inerten, reaktionsträgen oder Schutzgasen der Sauerstoffgehalt in der Verpackung deutlich verringert, welcher einen wesentlichen Beitrag zur Verderblichkeit von Lebensmittel darstellt. Am häufigsten werden Stickstoff, Sauerstoff oder Kohlenstoffdioxid verwendet [2], [10].

Grundsätzlich können die einzelnen Schichten der MAP-Verpackungen aus reinem Kunststoff, Polymermischungen, recyceltem Material oder aus hohen Anteilen an Additiven bestehen [11].

Je nachdem, welche Kriterien an die geeignete Verpackung gestellt werden, kommen unterschiedliche Werkstoffe bzw. Kombinationen dieser zum Einsatz. Folgende Abbildung 2 soll einen Überblick über jene Polymere verschaffen, welche – mit Ausnahme von Polystyrol – für die Herstellung der – im Rahmen dieser Diplomarbeit untersuchten – Verpackungen verwendet wurden.

PET	• gute Gas- bzw. Feuchtigkeitsbarriere • transparent und biegsam
PE	• gute optische Eigenschaften und Kältezähigkeit • geringe Empfindlichkeit gegenüber Rissen oder Stoßeinwirkungen
EVOH	• gute Sperreigenschaften für Aromastoffe und Gase • glänzendes und glasklares Erscheinungsbild
PP	• gute Barriere für Wasserdampf sowie moderate Gas- und Geruchsdurchlässigkeit • hohe Steifigkeit
PA	• Barrierschicht für Sauerstoff, Feuchtigkeit und Aromen • gute Stabilität
PS	• relativ hohe Gasdurchlässigkeit • spröde sowie klares und funkelndes Erscheinungsbild

Abbildung 2: Überblick über untersuchten Polymere

Für die Trägerschicht (s. Abbildung 3) werden üblicherweise folgende Polymere eingesetzt: PET, PP, PA6, HDPE oder PS. EVOH, PVDC oder Aluminiumfolien finden häufig als Barriere- bzw. Sperrschicht Anwendung. Die Innenschutz- bzw. Heißsiegelschicht besteht in den meisten Fällen aus PE, PP oder EVAC [12].



Abbildung 3: Aufbau Mehrschichtverpackung, Eigene Darstellung (Quelle: [12])

Der Grund, weshalb anstatt einer einfach aufgebauten Folie, wie bspw. PET – KLEBER – PE, eine – aus mehreren Schichten bestehende – Folie, wie etwa PET – KLEBER – PE – HV – PE, verwendet wird, liegt u.a. in der potentiellen Steigerung der Barriereeigenschaft. Zudem könnte die innenliegende PE-Folie im Fall einer Beschädigung der äußeren PE-Schicht dennoch ausreichenden Schutz für den Inhalt bieten. Des Weiteren besitzen 2 dünne Schichten eine bessere Barriereeigenschaft als eine Folie mit der gleichen Gesamtdicke [13]. Anhand nachfolgender Tabelle 1 soll ein grober Überblick von den unterschiedlichen Eigenschaften der untersuchten Polymere gegeben werden:

Tabelle 1: Eigenschaften der untersuchten Kunststoffe, Quelle:[8]

Polymer	Dichtheit	Tie-Layer adhäsiv	Barriere	Strukturschicht
LDPE	X	X		X
LLDPE	X			X
HDPE			X	X
PP	X		X	X
PET	X			X
PA			X	X
EVOH			X	
PS				X

4. Herstellungsverfahren

Da die Definitionen der einzelnen Herstellungsmethoden teilweise unterschiedlich in die deutsche Sprache übersetzt werden bzw. im englischen Sprachgebrauch, übergeordnete Begriffe für unterschiedliche Bezeichnungen verwendet werden, erweist sich nicht nur die Gliederung der einzelnen Verfahren, sondern auch die Bestimmung der Klebstoffe, welche für die jeweiligen Prozesse verwendet werden, als schwierige Angelegenheit. In dem – von Dipl. Ing. Manfred-Werner Römer verfassten – Beitrag zum Thema der Verwendung von Kaschierklebstoffen in der Lebensmittelindustrie erfolgt die Gliederung der – zur Herstellung von Verbundfolien – unterschiedlichen Verfahren folgendermaßen: Es wird grundsätzlich

zwischen der Mehrlagenextrusion und der Kaschierung unterschieden, wobei bei letzterer zwischen lösemittelfreier und lösemittelhaltiger differenziert wird. Des Weiteren werden folgende Beispiele für das lösemittelhaltige Kaschieren genannt: Nasskaschierung, Trockenkaschierung und Extrusionskaschierung [14]. Gerd Habenicht (2008) unterteilt die Kaschierverfahren in Abhängigkeit von den verwendeten Klebstoffen in 6 verschiedene Verfahren: Nasskaschierung, Trockenkaschierung, Extrusionskaschierung, Hotmelt-Kaschierung, Thermokaschierung und Kaschieren mit strahlungshärtenden Klebstoffen [15]. M. Kaßmann (2014) definiert das Kleberkaschieren, Extrusionskaschieren, Extrusionsbeschichten/Coextrusionsbeschichten und die Koextrusion als die bedeutendsten Verfahren [16]. In dem von R. Heiss (2013) veröffentlichtem Buch werden für die Unterteilung weitestgehend andere Begriffe verwendet: Dispersionskaschierung, Wachskaschierung, Extrusionskaschierung und Heißkaschierung [17]. Die Problematik setzt sich insofern fort, als selbst die Beschreibung der einzelnen Verfahren – trotz identer Bezeichnungen – voneinander abweichen. In diesem Zusammenhang erläutern H. F. Giles, E. M. Mount, and J. R. Wagner (2014) bspw. das Verfahren „Koextrusion“, welches eher dem – von A. Mieth, E. Hoekstra, and C. Simoneau (2016) beschriebenen – Herstellungsprozess der Hotmelt-Kaschierung entspricht. Das Verfahren Extrusionsbeschichtung, welches in der Literatur teilweise wiederzufinden ist, wird im Folgenden aufgrund der relativ geringen Bedeutung nicht behandelt.

Da die Vielfältigkeit der Begriffsdefinitionen an dieser Stelle bereits eindeutig erkennbar ist, wird auf die Anführung weiterer Beispiele verzichtet und stattdessen jene Gliederung angeführt, welche überwiegend mit der Unterstützung eines – in der Verpackungsindustrie tätigen – Experten entstanden ist und die – für die Industrie bedeutendsten – Verfahren wiedergibt.

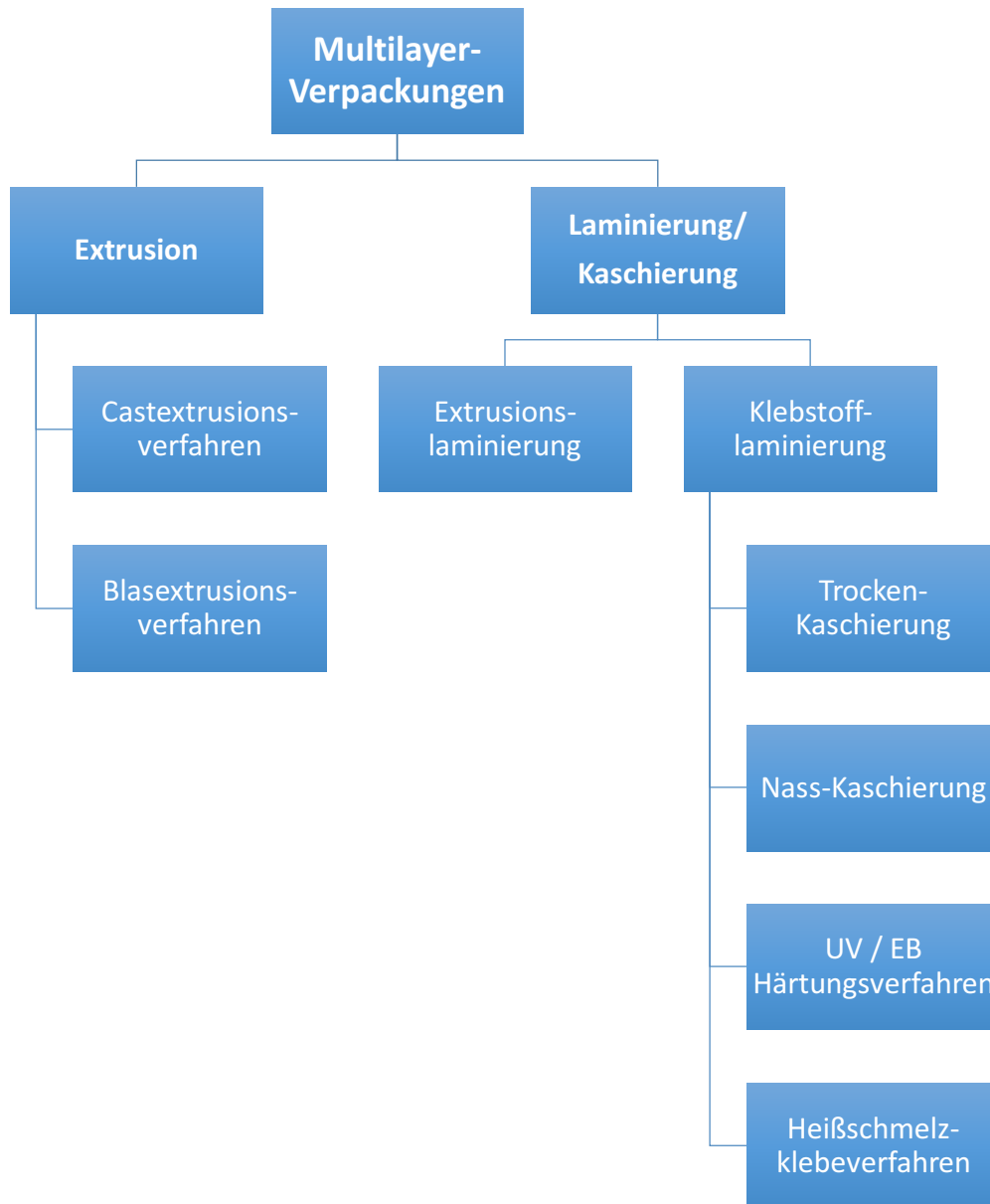


Abbildung 4: Einteilung Herstellungsverfahren, Eigene Darstellung (Quelle:[15], [18])

Es folgt eine Beschreibung der einzelnen Verfahren mitsamt den hierfür eingesetzten Klebstoffen. Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt, ist die Problematik der unterschiedlichen Begriffsdefinitionen auch bei den Adhäsionsmitteln wiederzufinden.

So verwenden H. F. Giles, E. M. Mount, and J. R. Wagner (2014) bspw. den allgemeinen Begriff „tie layer“, ohne dabei eine Unterscheidung zwischen haftvermittelnden Schichten, Primern oder Kleberschichten vorzunehmen. Um diesbezüglich Klarheit zu schaffen, wird in

den nachfolgenden Kapiteln 6.8 und 6.9 näher auf die einzelnen Begriffserklärungen eingegangen.

4.1 Extrusion

Die Begriffe Koextrusion und Extrusionslaminierung stellen 2 unterschiedliche Verfahren dar. Beim Koextrudieren kann – unter Zuhilfenahme von Haftvermittlern, wie etwa EAA oder MAH – die Verbindung zwischen PE und EVOH hergestellt werden, wobei dieser Prozess nicht als Kaschieren bezeichnet wird. In Abhängigkeit von der Foliendicke beträgt die Koextrusions-Geschwindigkeit ca. $20 - 120 \text{ m/min}$ [18]. Zusammenfassend handelt es sich bei der Koextrusion um ein Verfahren, bei welchem anstatt von Klebstoffen, nur Haftvermittler zum Einsatz kommen. So wird diese Produktionsart bspw. für die Herstellung einer – aus PE/HV/EVOH/HV/PE bestehenden – Verbundfolie verwendet.

4.1.1 Foliengieß- / Castextrusionsverfahren

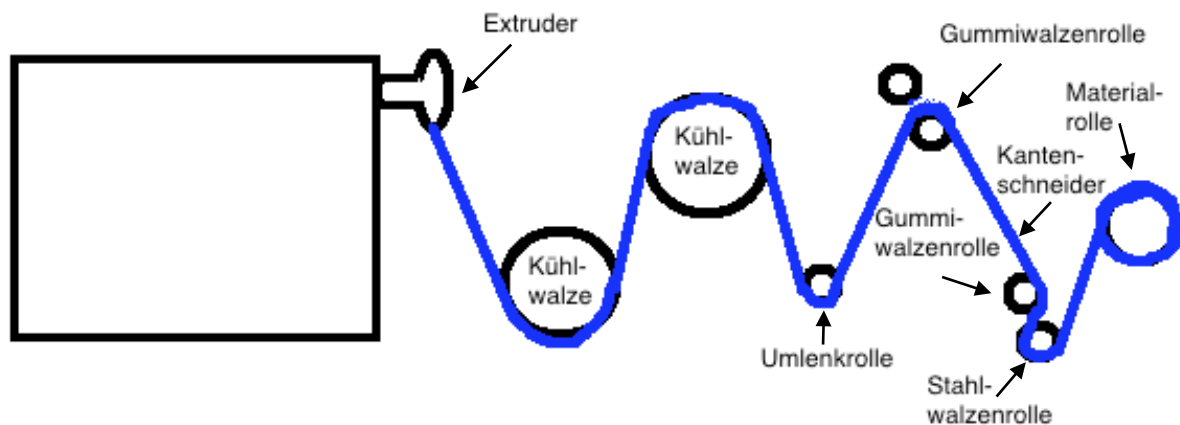


Abbildung 5: Castextrusionsverfahren, Eigene Darstellung (Quelle: [19])

Wie in Abbildung 5 ersichtlich, wird beim Castextrusionsverfahren die koextrudierte Folie über Kühlwalzen abgekühlt.

4.1.2 Blasextrusionsverfahren

Im Gegensatz zum Foliengießverfahren laufen beim Blasextrusionsverfahren 2 Prozesse simultan ab [20]:

- Urformen mittels einer Vorformlingsextrusion und
- Umformen zufolge der – im Werkzeug zugeführten – Blasluft

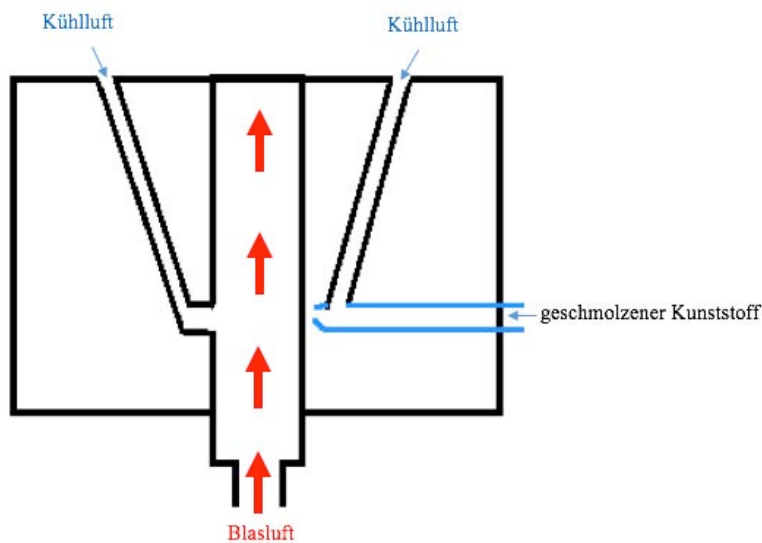


Abbildung 6: Blasextrusionsverfahren, Eigene Darstellung (Quelle: [20])

Durch die Variation folgender Faktoren kann die Schichtdicke beeinflusst werden [8]:

- Durchlaufgeschwindigkeit des Extruders
- Umlaufgeschwindigkeit der Kühlwalze
- Webprofil

Je nachdem, welche Polymere für die Folienherstellung eingesetzt werden, eignet sich das Foliengießverfahren besser als die Blasextrusionstechnik. Werden bspw. PA, PET oder PP verwendet, so ist – in den meisten Fällen – die Foliengießextrusion vorzuziehen, wohingegen die Blasextrusion generell besser für die Verarbeitung von PE ist. Ein weiteres Entscheidungskriterium stellt die Schichtdicke dar, welche bei der Verwendung des

Blasextrusionsverfahrens nicht dünner als 30 μm , aber auch nicht dicker als 200 μm sein sollte [8]. Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Blasextrusionstechnik gegenüber der Castextrusion vorzuziehen [21].

Bei der Multilayer-Extrusion werden anstelle von Klebstoffen, folgende Substanzen als Bindemittel eingesetzt [22]:

- lösungsmittelhaltige Primer (z.B. Polyurethan Kleber o.ä.)
- wässrige-Primer (Ethylen-Acryl-Säure Dispersionen)
- Primer aus der Schmelze (Ethylen-Acryl-Säure)
- Maleinsäure

4.2 Laminieren/Kaschieren

Im Gegensatz zum Koextrudieren, bei welchem 2 oder mehrere Polymere in Form von Granulaten oder Pellets zu einer homogenen Folie vereint werden, ist es beim Laminieren bzw. Kaschieren möglich, 2 oder mehrere Materialien in Folienform zu einer mehrschichtigen Folie zu verarbeiten [8].

Einen entscheidenden Vorteil dieses Herstellungsverfahrens stellt die Möglichkeit dar, unterschiedlichste Materialien miteinander kombinieren und diese zugleich so anordnen zu können, dass sie nicht nur als Schutz für den Inhalt, sondern auch als Schutz für die Druckfolie dienen.

Der Unterschied zwischen Kaschieren und Laminieren besteht darin, dass der Begriff Lamination für die Anwendung bei dickeren Füge teilen, wie bspw. für Holz- oder Polymerplatten, verwendet wird. Beide Begriffe beschreiben das kontinuierliche Verbinden von großen Flächen. Die Auswahl der hierfür verwendeten Klebstoffe ist v.a. auf die Eigenschaft des gleichmäßigen und kontinuierlichen Applizierens einer möglichst dünnen Klebeschicht beschränkt. Als Adhäsionsmittel werden überwiegend lösungsmittelfreie Klebstoffe verwendet [15].

4.2.1 Extrusionslaminierung/-kaschierung

Der Herstellungsprozess dieser – in der Verpackungsindustrie angewandten – Laminierungsart wird in 2 Stufen unterteilt, wobei in der 1. Phase unterschiedliche Polymere in einem eigenen Extruder geschmolzen werden, welchen sie im Anschluss wieder verlassen. In der 2. Phase wird dieser – üblicherweise auf PE basierende – Haftvermittler zwischen 2 Folien aufgetragen, welche anschließend unter Druck mit Hilfe von Kühl- und Primärwalzen miteinander verbunden werden [23].

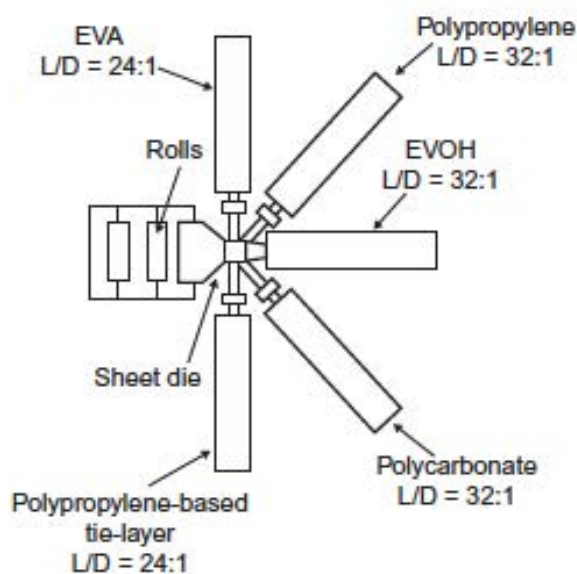


Abbildung 7: Extrusionslaminierung I, Quelle: [17]

Dieses kontinuierliche Verfahren kommt dann zum Einsatz, wenn eine Folie – zwar ohne Zuhilfenahme eines Klebstoffes, jedoch mit einem Primer, der für eine Aktivierung der Oberfläche und somit für bessere Haftung sorgt – auf eine bereits – beliebig vorgefertigte – Verbundfolie koextrudiert wird. Demnach kann bei der Extrusionskaschierung die Haftung zwischen den Folien mit einem beispielsweise auf EAA basierenden Primer durch eigene Kaschieranlagen erzeugt werden; und nicht durch den Werkstoff PUR [18]. Zusammenfassend lautet der Aufbau einer – mittels Extrusionskaschierung hergestellten – Verbundfolie wie folgt:

Trägerfolie / Primer / Extruder / Kaschierfolie.

Die Bindekraft zwischen den einzelnen Schichten hängt von verschiedenen Kriterien, wie etwa der Durchlaufgeschwindigkeit, der Temperatur, der Schichtdicken und der chemischen Kompatibilität der verwendeten Polymere ab [8], [23].

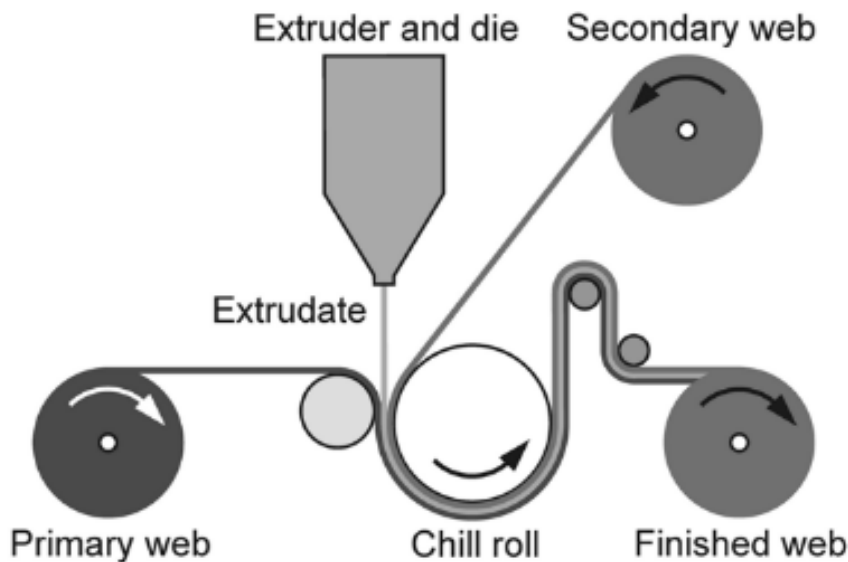


Abbildung 8: Extrusionslaminierung 2, Quelle: [8]

Abhängig von den verwendeten Substraten, beträgt die Prozessgeschwindigkeit bis zu ca. 600 m/min [18].

4.2.2 Klebstofflaminierung/Kaschierung (adhesive lamination)

Diese Herstellungsart hat im Allgemeinen eine Prozessgeschwindigkeit von bis zu 600 m/min [18] und kann in 4 verschiedene – für die Industrie bedeutsame – Methoden unterteilt werden [15]:

- Trocken-Kaschierung
- Nass-Kaschierung
- UV / EB Härtungsverfahren
- Heißschmelzklebeverfahren

Grundsätzlich beruht die Klebstoffkaschierung in den meisten Fällen auf der Verbindung mit Hilfe eines Zweikomponenten-Klebstoffes, wie etwa Diol mit Isocyanat, was der Verbindung von Polyurethan mit einem Haftmechanismus entspricht. Demnach handelt es sich hierbei um einen chemisch-physikalischen Haftmechanismus [18]. Eine – mittels Klebstoffkaschierung hergestellte – Multilayer-Verpackung ist folgendermaßen aufgebaut:

Trägerfolie / Kleber (Dispersion oder Hotmelt) / Kaschierfolie

4.2.2.1 Trocken-Kaschierung

Nachfolgende Abbildung 9 zeigt die Funktionsweise des Trocken-Klebeverfahrens. Nachdem der – auf Wasser oder Lösungsmittel basierende – Haftvermittler auf die Primärfolie aufgebracht ist, wird diese durch einen Ofen geführt, um eine Trocknung und Erwärmung des Klebstoffes herbeizuführen. Anschließend findet eine Zusammenführung mit einer weiteren Folie statt, so dass eine resultierende Multilayer-Verpackung entsteht [8], [23]. Als Bindemittel werden meistens lösungsmittelhaltige PUR-Klebstoffe eingesetzt [24].

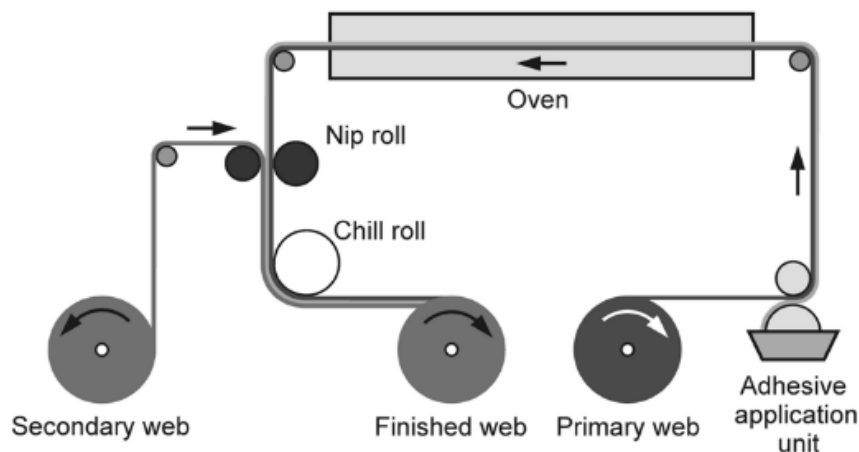


Abbildung 9: Trocken-Klebeverfahren, Quelle: [8]

Im Gegensatz zu der oben genannten Beschreibung, welche die Anwendung von lösungsmittelhaltigen Haftvermittlern, die erst aufgrund einer Wärmezufuhr lösungsmittelfrei gemacht werden, umfasst, handelt es sich beim Trocken-Kaschieren lt. Habenicht (2008) um

ein Verfahren, bei welchem ausschließlich lösungsmittelfreie Zweikomponenten-Klebstoffe, v.a. PUR, zum Einsatz kommen. Zudem wird dezidiert auf die – im Vergleich zu anderen Verfahren – hohe Ersparnis an Lösungsmittelmengen hingewiesen [15].

4.2.2.2 Nass-Kaschierung

Abbildung 10 und Abbildung 11 stellen den schematischen Verlauf bzw. ein mögliches Produkt der Nass-Kaschierung dar. Bei diesem Verfahren werden ausschließlich lösungsmittelhaltige Klebstoffe bzw. Dispersionen verwendet, welche vor der Zusammenführung der einzelnen Folien nicht getrocknet werden [15], [24]:

- Poly(vinyl acetate) Emulsion (oder Copolymer von Vinyl Acetaten und Ethylen oder acrylische Ester)
- vernetzte acrylische Vinyl Acetate Copolymer Emulsionen
- acrylische drucksensitive Klebstoffe
- Polyurethan Dispersionen

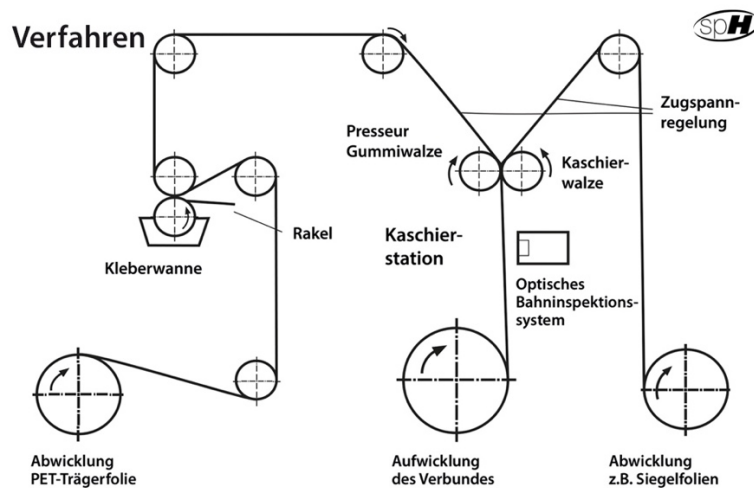


Abbildung 10: Nass-Kaschierung, Quelle: [25]

Folienverbund

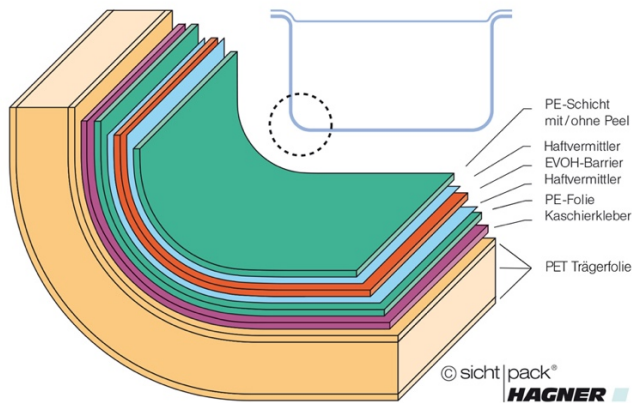


Abbildung 11: Aufbau Mehrschicht-Verpackung (Nass-Kaschierung), Quelle: [26]

4.2.2.3 UV / EB Härtingsverfahren

Dieses – zur Herstellung von flexiblen Kunststoffverpackungen – verwendete Verfahren, kann nur unter der Voraussetzung, dass mind. 1 Folie transparent ist, angewandt werden. Folgende Adhäsionsmitteln werden eingesetzt [24]:

- Acryl und Acrylate
- Epoxide
- Polyurethane
- Polyester
- Silikone
- Vinyl und Vinylester

Folgende Abbildung 12 zeigt die vereinfachte Darstellung des Wirkungsprinzips des UV/EB Härtingsverfahrens.

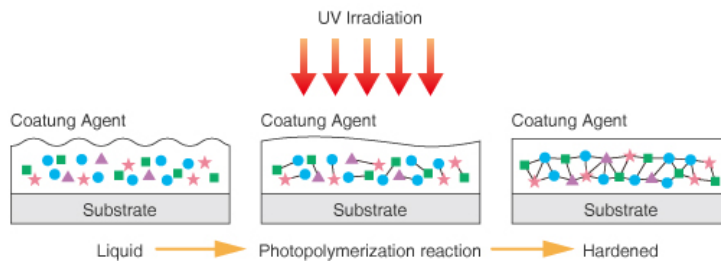


Abbildung 12: Mechanismus UV Härtingsverfahren, Quelle: [27]

4.2.2.4 Hotmelt-Kaschierung

Wie die Bezeichnung dieses Verfahrens bereits vermuten lässt, wird bei dieser – auf einen physikalischen Haftmechanismus basierenden – Herstellungsart der Klebstoff im geschmolzenen Zustand auf eine der – zu verbindenden – Folien aufgetragen [15].

Die für dieses Verfahren eingesetzten Klebstoffe können aus den folgenden Kunststoffen bestehen [24]:

- Ethylen-Vinylacetat-Copolymere
- Ethylen-Butyl Acrylate
- LDPE
- Blockcopolymer aus Styren, Butadien oder Isopren
- feuchtigkeitshärtende PUR-Schmelzklebstoffe

Die oben genannten Werkstoffe stimmen weitestgehend mit jenen, die Hr. Dipl.-Ing. Mumelter erwähnt hat, überein:

„Das in der Schmelzkaschierung verwendete Material ist abhängig von den Kaschiersubstraten. Dies kann reines LDPE, reines LLDPE aber auch eine Abmischung oder sogar eine Mehrschicht-Koextrusion dieser Materialien sein“.

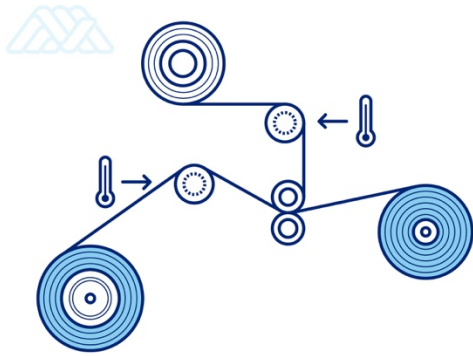


Abbildung 13: vereinfachte Darstellung Hotmelt-Kaschierung, Quelle: [28]

5. Analyseprinzipien und –instrumente

Die – im Rahmen dieser Diplomarbeit – untersuchten Multilayer-Verpackungen von Wurstwaren wurden mit Hilfe folgender Messinstrumente analysiert:

- Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC)
- Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie (FTIR)
- Mikroskopie

Untersuchungen mit der dynamischen Differenz-Thermoanalyse ermöglichten die Bestimmung der – in den jeweiligen Verbundfolien – eingesetzten Werkstoffe. Messungen mit der Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie wurden durchgeführt, um analysieren zu können, welche Werkstoffe für die Innen- bzw. Außenseite der Mehrschichtfolien verwendet wurden. Die abschließende mikroskopische Untersuchung diente zur Bestimmung des strukturellen Aufbaus der Verbundfolien, der Schichtdicken der einzelnen Folien sowie der weiterführenden Berechnung der prozentuellen Massengehalte der verwendeten Kunststoffe.

5.1 Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC)

Die Dynamische Differenz-Thermoanalyse (engl. Differential Scanning Calorimetry) oder auch DSC genannt, ist ein thermisches Verfahren, welches zur Ermittlung der Wärmemenge, bedingt durch chemische oder physikalische Umwandlungen, dient. Die Messergebnisse liefern einige wichtige Werkstoffkennwerte:

- Glasübergangs- und Kristallitschmelztemperatur
- Wärmekapazität
- spezifischer Wärmefluss
- Kristallinität und Kristallinitätsgrad
- Nachweis von Temper- und Aushärtungsvorgängen

In weiterer Folge können Rückschlüsse auf die Vorgeschichte des Werkstoffes gezogen werden.

Die zu messende Größe ist der Wärmefluss zur Probe verglichen mit jenem zum Referenzmaterial. Die Veränderung der Wärmemenge bedeutet, dass sich die innere Energie (Enthalpie bei konstantem Druck) des Stoffes ändert. Je nachdem, ob die Enthalpie erhöht oder verringert wird, spricht man von endothermen oder exothermen Vorgängen [29], [30].

Man unterscheidet 2 Verfahren, wobei beide auf das gleiche Endergebnis führen. Beim Leistungskompensationsprinzip werden die zu untersuchende Probe und die Referenzprobe gleichzeitig in zwei voneinander getrennten Öfen linear mit gleicher Geschwindigkeit erhitzt bzw. abgekühlt. Bei einer Temperaturdifferenz zwischen Probenmaterial und Referenzprobe, bedingt durch die Änderung der spezifischen Wärmekapazität einer Probe, wird diese ausgeglichen, indem mehr (endotherme Vorgänge) oder weniger (exotherme Vorgänge) Probenheizleistung zugeführt wird. Aus der erforderlichen Wärmemenge können die Enthalpie und die spezifische Wärme berechnet werden.

Beim Wärmestromprinzip werden das Referenzmaterial und die Probe gemeinsam in einem zylindrischen Ofen nach einem vordefinierten linearen Temperaturprogramm aufgeheizt bzw. abgekühlt. Aus dem ermittelten Temperaturunterschied lässt sich die spezifische

Wärmekapazität der Probe bestimmen, sofern sie proportional zum Temperaturunterschied ist [29], [31].

Ermittlung der Glasübergangstemperatur:

In amorphen Polymeren bzw. in den amorphen Teilen eines teilkristallinen Kunststoffes bezeichnet der Glasübergang den Übergang vom energie- oder glaselastischen zum entropie- oder gummielastischen Zustand, da oberhalb der Glasübergangstemperatur die Kettensegmentbeweglichkeit uneingeschränkt ist. Diese Segmentbewegung hat, wie in nachfolgender Abbildung 14 ersichtlich, eine stufenweise Änderung der spezifischen Wärmekapazität zu Folge. Amorphe Thermoplasten weisen i.d.R. große sprunghafte Eigenschaftsänderungen im Glasübergang auf, da keine Behinderung durch noch nicht aufgeschmolzene kristalline Bereiche besteht. Bei welcher Temperatur der Glasübergang eintritt, hängt von der verarbeitungsbeeinflussten Gestalt, daher von den Orientierungen, Kristallisation, Eigenspannungen und der Vernetzung, ab [29], [32].

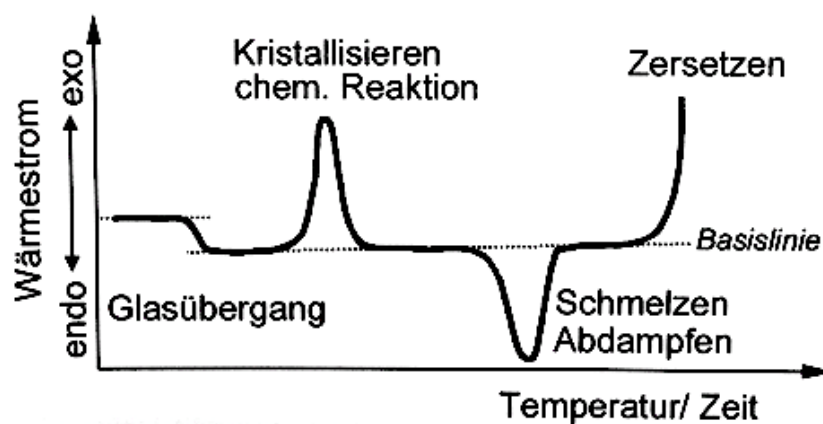


Abbildung 14: mögliche Effekte einer DSC-Kurve, Quelle: [29]

Ermittlung der Schmelztemperatur:

„Schmelzen“ bezeichnet den Übergang vom kristallinen in den amorphen Zustand. Die Masse und die chemische Zusammensetzung bleiben konstant. Den wesentlichen Parameter für den Schmelzbereich stellt, wie beim Glasübergangsbereich, die Morphologie der Polymere dar.

Aus den ermittelten Kennwerten können Rückschlüsse auf die thermische und mechanische Vorgeschichte gezogen werden. Zu Beginn des Schmelzvorganges werden die dünnen oder weniger perfekten Kristallite aufgeschmolzen. An jener Stelle, wo der Schmelzpeak das Maximum erreicht (s. Abbildung 14), schmilzt die höchste Anzahl an Kristalliten. Die Erklärung für das Abflauen der Kurve am Ende des Schmelzvorganges ist bis dato noch ungeklärt [29].

Ermittlung des Kristallinitätsgrades:

Die Höhe des Anteils an Kristalliten ist von der chemischen Morphologie und der thermischen Vorgeschichte abhängig. Der Kristallinitätsgrad kann aus dem Verhältnis der gemessenen Schmelzenthalpie des Probenmaterials und der theoretischen Schmelzenthalpie ermittelt werden [29].

Messvorgang:

Die Werkstoffe wurden jeweils 2 Heizdurchläufen unterzogen. Der 1. Aufheizvorgang dient dem Informationserhalt über den Ist-Zustand der Probe, der auf die thermische und mechanische Vorgeschichte zurückzuführen ist. Das anschließende Abkühlen schafft eine neue, jedoch bereits bekannte Probenvorgeschichte. Schlussendlich liefert der 2. Aufheizvorgang materialspezifische Kennwerte.

In den nachfolgenden DSC-Diagrammen sind folgende Werte gekennzeichnet:

- Glasübergangstemperaturen, sofern ersichtlich
(unter der Voraussetzung der Messung eines teilkristallinen bzw. kristallinen Kunststoffes)
- Schmelztemperaturen
- Kristallisationstemperatur
- Enthalpieänderung ΔH je Aufheizvorgang; diese beschreibt jene Energie, die notwendig ist, um die vorhandenen kristallinen Anteile aufzuschmelzen

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

- Waage: Sartorius LE 225 D (Genauigkeit 0,01 *mg*)
- Probeneinwaage: 5 *mg* +/-10%
- Wiegepresse: Tzero Press
- DSC – Gerät: TA Instruments DSC Q2000
- Kühlsystem: TA Instruments Liquid Nitrogen Cooling Accessory (LNCS)
- Tiegel: Standard Pan bzw. Standard Lid (Material: Aluminium)
- Referenzmaterial: Luft
- Spülgas: 50 *ml* Stickstoff
- Heizrate: 10 *K/min* für teilkristalline bzw. kristalline Kunststoffe
20 *K/min* für amorphe Kunststoffe
- Abkühlrate: 10 *K/min* für teilkristalline bzw. kristalline Kunststoffe
20 *K/min* für amorphe Kunststoffe
- Software: TA Instruments Explorer Advantage v5.4.0
- Auswertung: Universal Analysis

Die analysierten Lebensmittelverpackungen wurden folgender Prozedur unterzogen¹:

1. Abkühlung auf eine Temperatur von -20 °C
2. Aufheizvorgang bis 280 °C
3. 10 min bei der Temperatur von 280 °C halten
4. Abkühlen auf eine Temperatur von -20 °C
5. Aufheizvorgang bis 280 °C
6. 10 min bei der Temperatur von 280 °C halten
7. Abkühlen auf Raumtemperatur

¹ Abkühl- bzw. Heizrate von jeweils 10 *K/min*

5.2 Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie (FTIR)

Mit dem Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer können Wechselwirkungen zwischen der Infrarotstrahlung und einem festen Körper untersucht werden. Die Wechselwirkung besteht aus der Emission und Absorption von Strahlung bei einer bestimmten Wellenlänge.

Eine ausführliche Analyse von Schwingungsspektren bringt wichtige Daten über das Bindungsverhalten und die Struktur von Molekülen hervor. Die einzelnen funktionellen Gruppen organischer Moleküle (somit auch Polymere) lassen sich mit charakteristischen Banden identifizieren. Weiterführend sind die Symmetrie, Bindungswinkel, Abstände, Kraftkonstanten und der Potentialverlauf der Bindung bestimmbar. Aus diesem Grund ist die Infrarot-Spektroskopie bei vielatomigen Molekülen eine besonders wichtige Methode zur Strukturaufklärung.

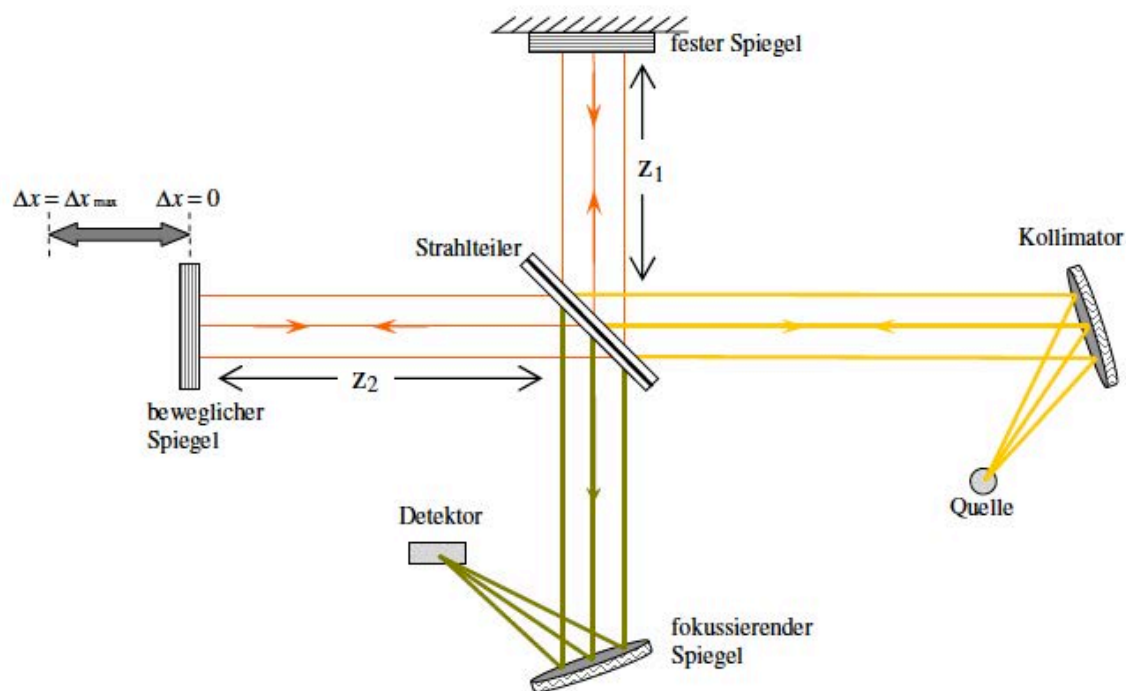


Abbildung 15: prinzipieller Aufbau eines Interferometers, Quelle: [33]

Die Funktionsweise des FTIR beruht auf einem Interferometer, bestehend aus einem beweglichen Spiegel, einem Laser zur Bestimmung dessen Position sowie einem Strahlenteiler.

Ein Strahl, der von einem erhitzten schwarzen Körper emittiert wird, trifft auf einen Strahlenteiler, welcher im Idealfall den Strahl in 2 gleich große Anteile aufspaltet (s. Abbildung 14). Während ein Anteil auf einen beweglichen Spiegel trifft, wird der 2. Anteil auf einen fest gelagerten Spiegel umgelenkt. Nach der Reflexion beider Strahlen an den jeweiligen Spiegeln werden beide Anteile wieder zusammengeführt und abhängig vom Strahlenweg und von der im Strahl enthaltenen Frequenz entsteht eine Interferenz.

Eine Überlagerung der beiden Strahlen tritt auf, wenn beide Anteile den gleichen Weg zurücklegen. In diesem Fall erreicht die Intensität ihr Maximum, da beide Anteile addiert werden.

Aufgrund der hohen Zahlenwerte, welche die Frequenz im Infrarotbereich aufweist, ist es üblich, Infrarotspektren in Abhängigkeit der so genannten Wellenzahl k anzugeben:

$$k = \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

mit $\lambda = \text{Wellenzahl } [m^{-1}]$

Nach der Umwandlung des Interferogramms mittels Fourier-Transformation entsteht ein Spektrum, welches zur weiteren Analyse herangezogen wird.

Dies geschieht mit Hilfe von Bandenkatalogen, welche die charakteristischen Frequenzen enthalten. Dies erlaubt bei gewisser Vorkenntnis Rückschlüsse auf die Molekülstruktur ziehen zu können. Typische Absorptionsbanden bei organischen Molekülen sind im Bereich von $4000 - 500 \text{ cm}^{-1}$ zu finden [33], [34].

In Abbildung 15 sind charakteristische Frequenzen wichtiger chemischer Gruppen dargestellt.

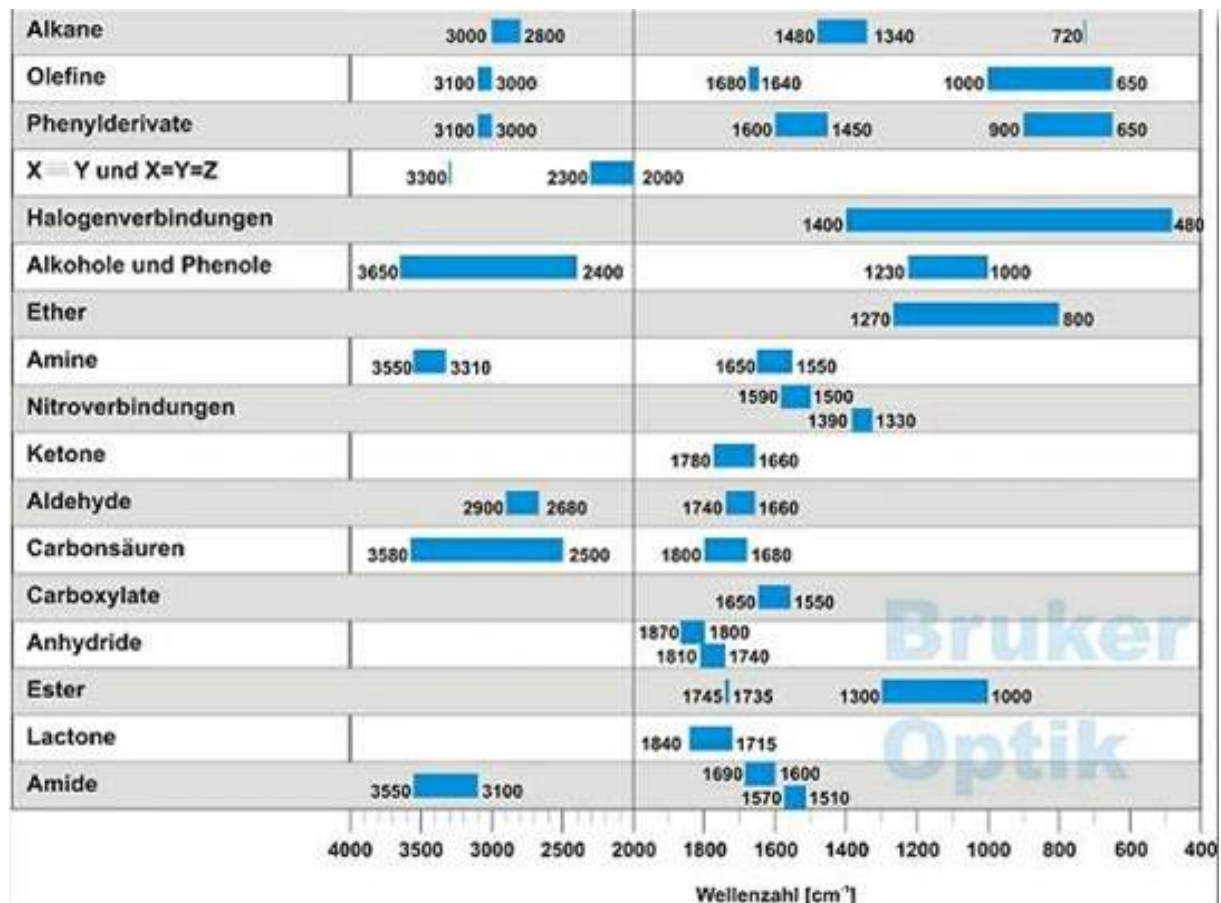


Abbildung 16: charakteristische Banden, Quelle: [35]

Die Auswertung der FTIR-Messungen erfolgte mit folgenden Programmen:

- OPUS Version 6.0
- OriginPro 8.5.1

5.3 Mikroskopie

Die Schwierigkeit der mikroskopischen Analyse bestand in der geeigneten Wahl der Einbettvorrichtung und Präparation der Proben. Aufgrund der teilweise sehr dünnen und gebogenen Ausschnitte der Multilayer-Verpackungen, war hohe Sorgfältigkeit, Genauigkeit und Geduld geboten, um so störende Faktoren wie bspw. Blasenbildung, Verbiegung oder ein Aufschwimmen der Proben verhindern zu können.

1. Probenentnahme mittels Skalpell ($2,2 \times 1 \text{ cm}$) und anschließende Reinigung mit Aceton und Ultraschallgerät
2. Platzierung der Proben in Probenhalter (s. Abbildung 17)
3. Auffüllen der Probenhalter mit einer Mischung aus Araldite® *AY 103-1* und einem Härter der Marke Huntsman mit der Bezeichnung *Ren™ HY 956* bis zu einer Höhe von max. 3 mm und anschließendes Aushärten (24h).
4. erneutes Auffüllen der Probenhalter bis zur gänzlichen Bedeckung der Proben, Verwendung einer Vakuumpumpe zur Vermeidung von Blasen und anschließendes Aushärten
5. Entnahme der Proben aus Form, Anbringen von Fasen und Gravur (s. Abbildung 18)
6. Nach gründlicher Reinigung, Einspannung in Schleif bzw. Polierprobenhalter und Durchlauf des – speziell auf die Folienanalyse – kreierten Programms (s. Tabelle 3). Hierfür wurde folgende Maschine verwendet: Struers TegraForce-31
7. Nach jedem Schleif- bzw. Poliervorgang fand eine Ultraschallreinigung der Proben mitsamt Probenhalter statt.
8. Die mikroskopischen Untersuchungen wurden mit folgendem Gerät bzw. Software durchgeführt:
 - *Zeiss Axio Imager M2m*
 - Software: *AxioVision*

Tabelle 2: Schleif- bzw. Polierprogramm Probenpräparation

Stufe	Körnung	Kraft (Einzelproben/Probenhalter) [N]	Prozesszeit [min]	Scheiben- geschwindigkeit [UpM]	Lubrikant	Suspension
1	SiC-Papier #320	15 / 90	1	300	Wasser	-
2	SiC-Papier #500	10 / 60	1	300	Wasser	-
3	SiC-Papier #1000	10 / 60	2	150	Wasser	-
4	SiC-Papier #2400	10 / 30	2	150	Wasser	-
5	SiC-Papier #4000	10 / 30	2	300	Wasser	-
6	MD-Dur	10 / 30	5	150	Schmiermittel Rot	DP-Suspension, P 3 μm
7	MD-Chem	10 / 60	3	150		OP-U
8	MD-Chem	10 / 60	0,5	150		OP-U
9	MD-Plan	10 / 30	0,08	150	Schmiermittel Blau	DP-Suspension, P 9 μm

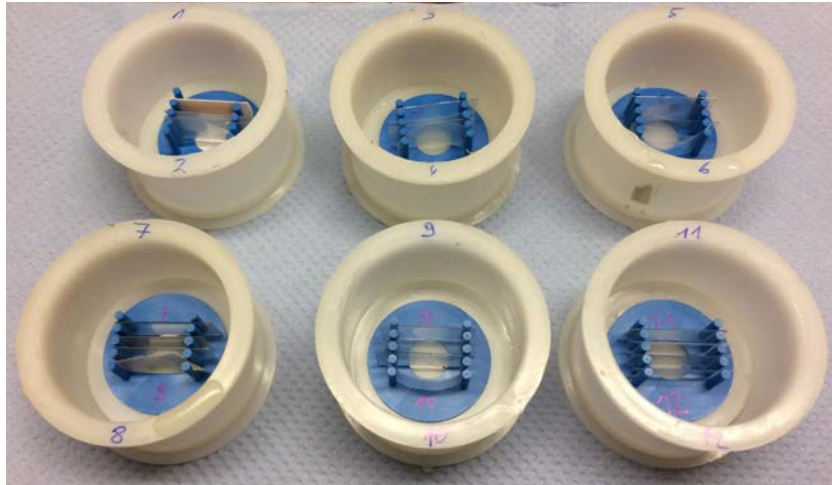


Abbildung 17: Proben in Probenhalter

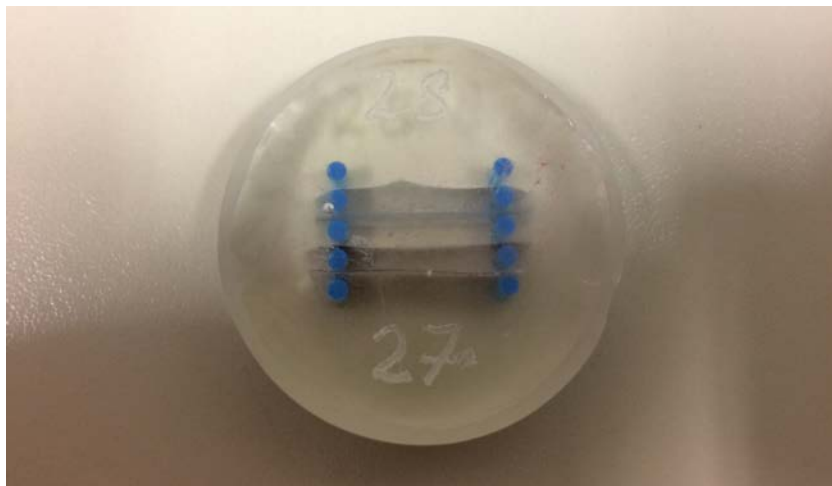


Abbildung 18: Oberseite einer fertig präparierten Probe

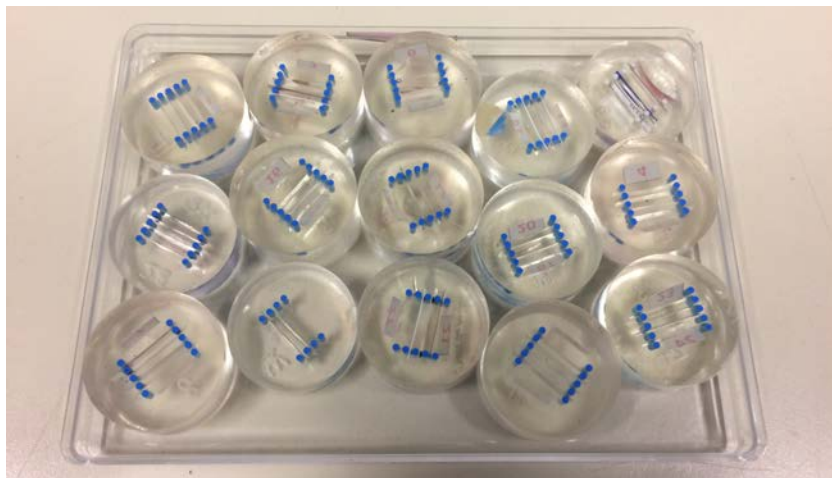


Abbildung 19: Überblick über alle untersuchten Proben

5.4 Bestimmung des Massenanteils der jeweiligen Polymere

Tabelle 3: Dichtewerte der untersuchten Kunststoffe

Kunststoff	Dichte [g/cm^3]	Quellenangabe
LDPE	0,915 – 0,935	[20]
LLDPE	0,90 – 0,93	[20]
HDPE	0,94 – 0,97	[20]
EVOH	1,14 – 1,19	[36]
PET		
<i>amorph</i>	1,34	[20]
<i>Mylar-Folie 6 μm</i>	1,40	[20]
PP	0,90 – 0,915	[16]
PA 6 ($T_g = 230\text{ °C}$)	1,12 – 1,15	[20]
PA 11 ($T_g = 180\text{ °C}$)	1,03 – 1,05	[20]
PA 12 ($T_g = 175\text{ °C}$)	1,01 – 1,04	[20]
PS	1,05	[37]

6. Überblick: analysierte Kunststoffe

Im Folgenden werden jene Kunststoffe näher erläutert, welche in den – im Rahmen dieser Diplomarbeit – untersuchten Multilayer-Verpackungen verarbeitet wurden. Dies soll Aufschluss darüber geben, weshalb der jeweilige Werkstoff verwendet wurde.

6.1 Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH)

Aufgrund der Tatsache, dass EVOH aus stark polaren und unpolaren Segmenten besteht, wird es u.a. als Faserrohstoff verwendet [20]. Auch wenn es sich hierbei um ein Copolymer, bestehend aus Materialien, die aus Ölquellen stammen, handelt, ist dieses nicht nur biologisch abbaubar, sondern auch biologisch verträglich [38]. Aufgrund der Hydrophilität von EVOH-Folien, welche ein glänzendes und glasklares Erscheinungsbild aufweisen, ist die

Durchlässigkeit dieser einerseits von der Temperatur und andererseits vom Feuchtigkeitsgehalt abhängig [20].

Dieses Copolymer ist die Kombination aus der hydrophoben Eigenschaft des Ethylens und dem hydrophilen Charakter des Vinylalkohols. Aufgrund der Struktur von –OH Substituten kommt es wegen der Wasserstoffbrücken zur starken Wechselwirkung zwischen den Ketten. Das erhöht einerseits die intermolekulare Kohäsion und andererseits wird das – für den Gasaustausch zur Verfügung stehende – Volumen reduziert, was der Grund für die bemerkenswerten Barriereigenschaften ist [39]. Reine EVOH-Folien werden üblicherweise für die Verpackung von Textilien herangezogen, während sie in Form von Verbundfolien mit der Kombination von PP, PA, PET und LDPE aufgrund ihrer bemerkenswerten Sperreigenschaften für Aromastoffe und Gase u.a. als Verpackungsmaterial für Wurstwaren verwendet werden. Die Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer-Folie wird hierbei als Kernschicht verwendet [20]. Grundsätzlich gilt: Je niedriger der Ethylengehalt in EVOH, desto starrer und folglich schwieriger ist es zu verarbeiten [39].

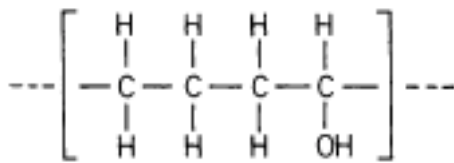


Abbildung 20: Strukturformel EVOH, Quelle: [20]

Insbesondere die Barriereigenschaften gegen molekularen Sauerstoff (O_2), Kohlenstoffdioxid (CO_2) und molekularen Stickstoff (N_2) machen diese Folien zu einem vielfach eingesetztem Material für Mehrschicht-Verpackungen von Lebensmittel [40]. Sollte EVOH in feuchter Umgebung eingesetzt werden, so muss es mit adäquaten Wasserdampfbarriereschichten kombiniert werden, da mit steigendem relativen Feuchtigkeitsgrad, die Sauerstoffbarriere des Polymers bedeutend abnimmt. Eine Möglichkeit, die Sauerstoffbarriere – trotz feuchter Umgebung – aufrecht erhalten zu können, besteht darin, Polyethylen in der Form von PE/HV/EVOH/HV/PE einzusetzen [20].

Folgende Tabelle 4 zeigt die unterschiedlichen Werte der Kristallitschmelztemperatur von EVOH in Abhängigkeit von dessen mol.-%-Gehalt. Nachdem das – im Rahmen dieser

Diplomarbeit – vorkommende EVOH eine Schmelztemperatur von ca. 180 °C aufweist, deutet dies auf den EVOH-Typ mit 32 mol.-%-Gehalt hin.

Tabelle 4: Kristallitschmelztemperatur EVOH

	Messergebnis [°C]	Referenzwert Literatur [°C][41]
EVOH-Type 32 mol.%	ca. 180	ca. 183
EVOH-Type 38 mol.%	-	ca. 172
EVOH-Type 44 mol.%	-	ca. 165

6.2 Polyethylen (PE)

Der thermoplastische Kunststoff, Polyethylen, gehört zur Gruppe der Polyolefine und ist durch seine hohe Anzahl an Typen mit unterschiedlichen Charakteristiken gekennzeichnet. Diese Vielfalt ist einerseits auf den angewandten Herstellungsprozess und andererseits auf den strukturellen Aufbau zurückzuführen [20], [42].

Die strukturellen Unterschiede sind mitunter in der Länge und der Menge an Seitenverzweigungen wiederzufinden, was maßgebend für die Distanz zwischen den Makromolekülketten und somit für die Kristallinität und Dichte des Polyethylen-Typs ist [20].

Nachfolgend werden die – für die Herstellung von Mehrschicht-Verpackungen – verwendeten Typen des Polyethylens näher beschrieben [43]:

6.2.1 stark verzweigte Polymerketten / low density polyethylene (LDPE)

Durch die hohe Anzahl an Verzweigungen in den Polymeren können die Kristallisationsprozesse nicht ungehindert stattfinden, was eine relativ geringe Dichte zur Folge hat [44]. In Westeuropa gehen rund 75% des LDPE Verbrauchs auf die Folienproduktion zurück. Bspw. wird Polyethylen bei der Herstellung von Koextrusionsfolien in Kombination mit anderen Polymeren als Siegelschicht und als Hindernis für Wasserdampf eingesetzt. Ein weiteres Anwendungsgebiet von LDPE-Copolymeren und Ionomeren stellen Haftvermittler zwischen den einzelnen Schichten von Mehrschichtfolien dar [20].

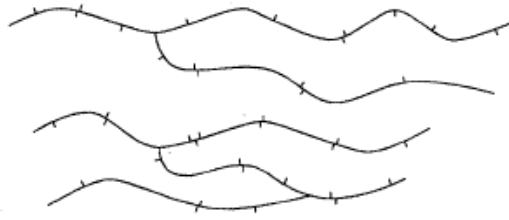


Abbildung 21: schematischer Aufbau LDPE, Quelle: [44]

Tabelle 5: Kennwerte LDPE

	Messergebnis [°C]	Referenzwert Literatur [°C]
Kristallitschmelztemperatur	111,71	111 [20]
Kristallisationstemperatur	103,40	108,56 [45]

6.2.2 lineares Polyethylen niederer Dichte / linear low density polyethylene (LLDPE)

Die Namensgebung LLDPE ist auf die Moleküle, die einen linearen Aufbau des Polyethylens aufweisen und woran kurze Alkylgruppen in zufälligen Abständen gebunden sind, zurückzuführen [44]. LLDPE wird wie LDPE vorzugsweise für die Herstellung von Folien verwendet, wobei LLDPE generell schwierigere Verarbeitungseigenschaften als LDPE hat [46]. Dafür weist LLDPE im Vergleich zu LDPE gute optische Eigenschaften, eine bessere Kältezähigkeit sowie eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Rissen oder Stoßeinwirkungen auf [47].



Abbildung 22: schematischer Aufbau LLDPE, Quelle: [44]

Tabelle 6: Kennwerte LLDPE

	Messergebnis [°C]	Referenzwert Literatur [°C] [9]
Kristallitschmelztemperatur	ca. 118	122
Kristallisationstemperatur	ca. 108	110

6.2.3 Polyethylen hoher Dichte / high density polyethylene (HDPE)

Obwohl diese Art des Polyethylens nicht zur Herstellung der – im Rahmen dieser Diplomarbeit – untersuchten Multilayer-Verpackungen verwendet wurde, sei dieses Polymer dennoch der Vollständigkeit wegen hier angeführt.

Im Vergleich zu LDPE besitzt HDPE eine höhere Stärke, Dicke und Sprödigkeit sowie eine geringere Flexibilität und hat aufgrund seiner geringeren Verzweigungen eine höhere Kristallinität (60 – 80 %). Des Weiteren ist die Gas- und Feuchtigkeitsdurchlässigkeit geringer und die Schmelztemperatur liegt mit einem Wert zwischen 130 und 135 °C höher als bei LDPE [2], [20]. Im Bereich der Lebensmittelindustrie wird HDPE vor allem für die Verpackung von trockenen Lebensmittel wie bspw. Cerealien oder Keksen verwendet.

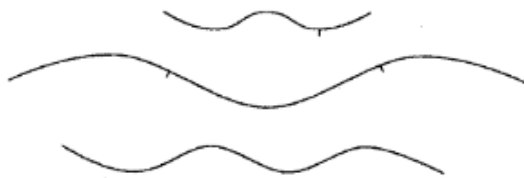


Abbildung 23: schematischer Aufbau HDPE, Quelle: [10]

Tabelle 7: Kennwerte HDPE

	Messergebnis [°C]	Referenzwert Literatur [°C][9]
Kristallitschmelztemperatur	-	135
Kristallisationstemperatur	-	125

6.2.4 Vergleich: LDPE – LLDPE – HDPE

FTIR-Analyse

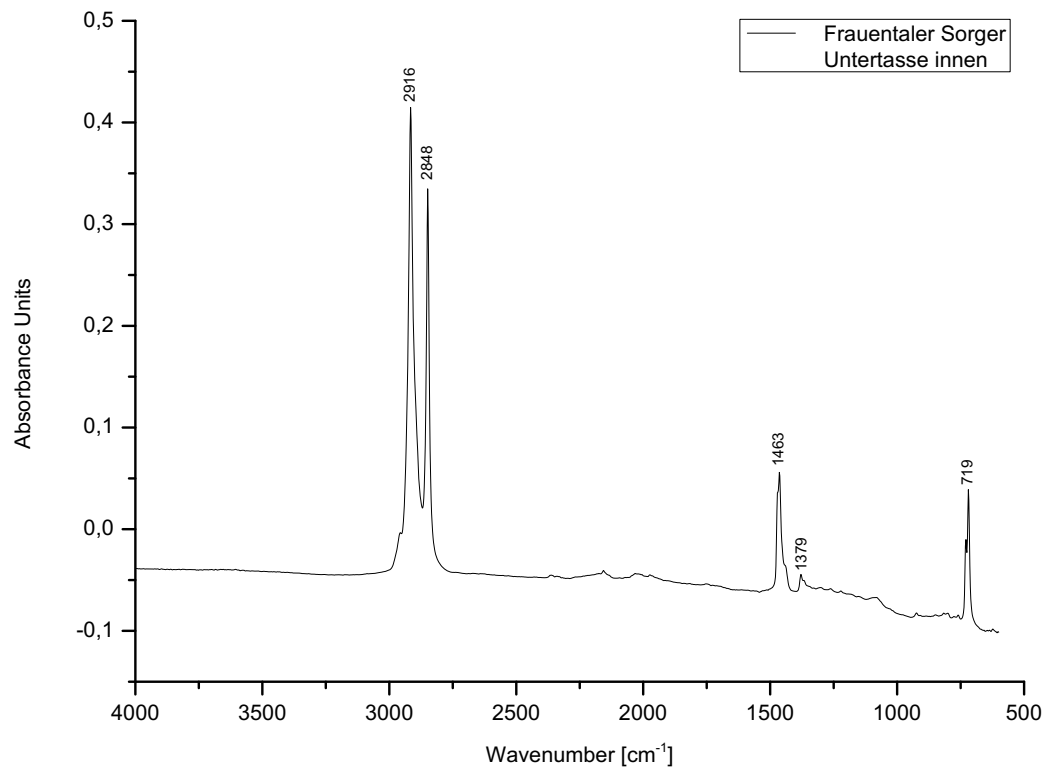


Abbildung 24: FTIR: Probe Nr. 13 Deckelinnenseite

Abbildung 24 zeigt das – mittels der FTIR Mikroskopie – ermittelte Spektrum der Deckelinnenseite von Probe Nr. 13.

Tabelle 8: Analyse FTIR-Spektrum PE, Quelle: [48], [49]

Frequenz [cm ⁻¹]	Zuordnung	Intensität
2919 / 2914	asymmetrische CH ₂ Dehnung	stark
2851	symmetrische CH ₂ Dehnung	stark
1473 & 1463	Biegeverformung	stark
1377	symmetrische CH ₃ Verformung	schwach
1366 & 1351	Winkeldeformation	mittel
1306	Verdrehungsdeformation	schwach
1176	Winkeldeformation	sehr schwach
731-720	Schaukeldeformation	mittel

J. Gulmine et al. belegten in einer Studie, dass es im Rahmen der FTIR-Messung unter bestimmten Bedingungen, wie etwa der Variation der Auflösung, Apodisierung, Akkumulationszahl (Anzahl der Scans) und der Vakuumbedingungen, möglich sei, zwischen den 3 Typen des Polyethylens zu unterscheiden [48]. A. Prasad (1996) versuchte ebenfalls mit Hilfe der DSC sowie FTIR, LDPE von LLDPE zu unterscheiden. Abbildung 25 zeigt, dass es unter Zuhilfenahme der FTIR-Methode – zumindest bei einem Teil der gemessenen Proben – gelungen ist, eine Verlagerung des Peaks von einer Wellenzahl in der Höhe von 889 cm^{-1} (LDPE) zu 908 cm^{-1} (LLDPE) festzustellen.

Eine detailliertere Auswertung der FTIR-Spektrographie ist in Tabelle 9 zu sehen.

Tabelle 9: detaillierte Analyse FTIR-Spektrum PE, Quelle: [50]

Frequenz [cm^{-1}]	Zuordnung	Intensität
2959	CH_3 Dehnung	schwach
2925	CH_2 Dehnung	sehr stark
2874	CH_3 Dehnung	sehr schwach
2853	CH_2 Dehnung	stark
2640		schwach
2500	CO_2 [42]	
2295		sehr schwach
2130		äußerst schwach
2010		sehr schwach
1890		sehr schwach
1805		äußerst schwach
1710		sehr schwach
1470	CH_2 Biegeverformung	stark
1460	CH_2 Biegeverformung	stark
1456	CH_3 Biegeverformung	sehr schwach
1375	CH_3 Biegeverformung	mittel
1369	CH_2 Winkeldeformation	schwach
1353	CH_2 Winkeldeformation	schwach
1303	CH_2 Winkeldeformation	schwach

1170		äußerst schwach
1150		äußerst schwach
1110		äußerst schwach
1080	CC Dehnung	sehr schwach
1065	CC Dehnung	sehr schwach
965		äußerst schwach
888	CH ₃ Schaukeldeformation	sehr schwach
731	CH ₂ Schaukeldeformation	mittel
721	CH ₂ Schaukeldeformation	stark
600		sehr schwach
543		schwach
200		sehr schwach

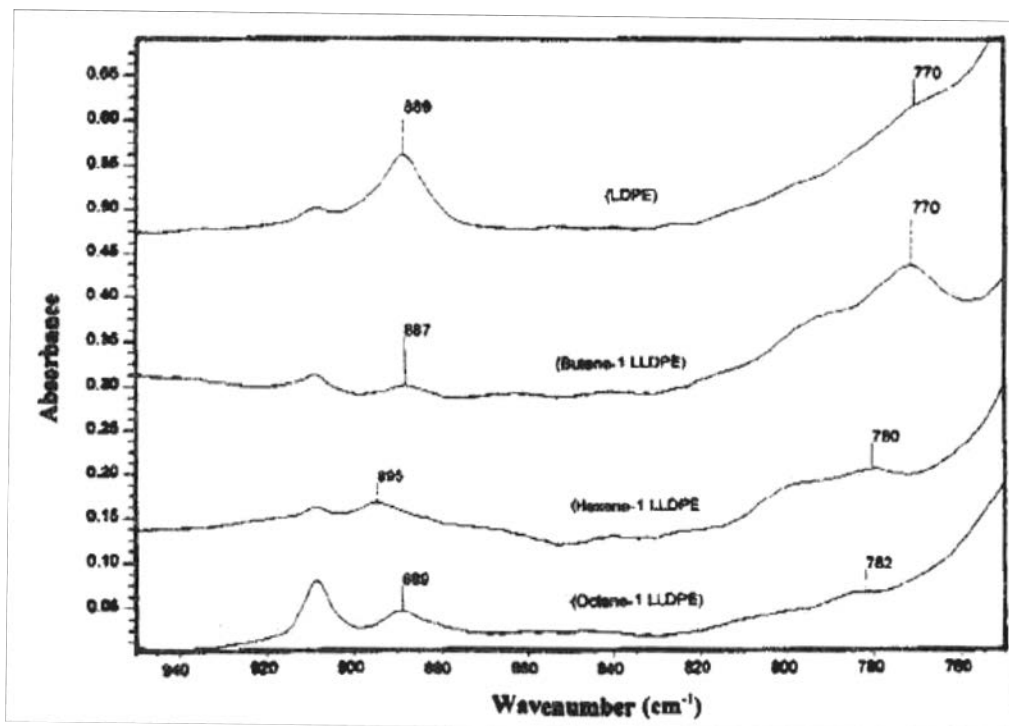


Abbildung 25: Vergleich FTIR-Spektrum LDPE und LLDPE, Quelle: [51]

DSC-Analyse

Wie folgende Abbildung 26 zeigt, kann mit Hilfe der DSC-Methode zwischen den verschiedenen Typen des Polyethylens unterschieden werden.

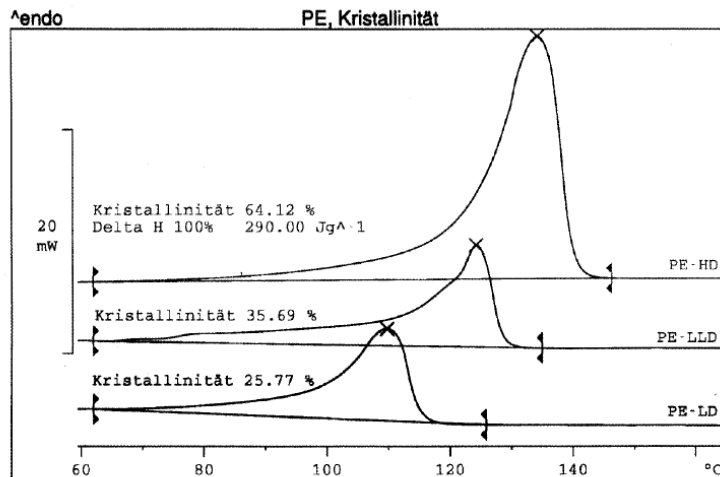


Abbildung 26: Vergleich DSC-Kurven LDPE, LLDPE, HDPE, Quelle: [52]

6.3 Polyethylenterephthalat (PET)

Unabhängig davon, ob PET in biaxial orientierter (BOPET), amorpher (APET) oder in kristalliner Form (CPET) vorliegt, handelt es sich hierbei um einen relativ formstabilen Kunststoff, der eine gute Barriere gegen Feuchtigkeit und Gase vorzuweisen hat [2].

Wird bei der Herstellung von Folien APET verwendet, so wird dieses schnell abgeschreckt, um den amorphen Zustand beibehalten zu können. Das Ergebnis ist eine transparente und biegsame Folie mit einer – im Vergleich zum CPET – relativ schlechten Temperaturbeständigkeit, die insbesondere für die Verpackung von gekühlten Lebensmitteln eingesetzt wird. Bei der Verwendung von CPET bedarf es für die Kristallisation einer Hinzugabe eines Keimbildners, wodurch es zur Bildung großer Sphärolite kommt. Dadurch wird das Licht gebrochen, was zu einem opaken Erscheinungsbild führt. Die Temperaturbeständigkeit bzw. die Hitzefestigkeit sind i.A. höher als bei APET-Folien, weshalb diese häufig für die Herstellung mikrowellen-geeigneter Verpackungen verwendet werden [2], [53].

Auch wenn die Gas- bzw. Feuchtigkeitsbarriere von CPET i.A. höher als jene von Polyethylen bzw. Polypropylen ist, wird kristallines PET häufig in Kombination mit dem Polymer EVOH eingesetzt, um eine noch bessere Isolation zu schaffen [54].

Tabelle 10: Kennwerte APET, BOPET, Quelle: [55]

	Glasübergangstemperatur [°C]	Kristallitmelztemperatur [°C]
APET	60-70	-
BOPET	80-120	260

FTIR PET

Bei der Betrachtung von Abbildung 27 sind folgende charakteristischen Absorptionspeaks zu erkennen: Während die Spitze bei 1714 cm^{-1} auf die Präsenz von C=O-Bindungen hindeutet, sind die Peaks bei 1408, 1016, 871 und 723 cm^{-1} Indizien für eine Vibration des aromatischen Rings. Die Peaks bei 1238 und 1091 cm^{-1} weisen auf Streckschwingungen von C-O-Bindungen hin, wobei letzterer aufgrund der amorphen sowie kristallinen Strukturen des BOPET verursacht wird [56], [57].

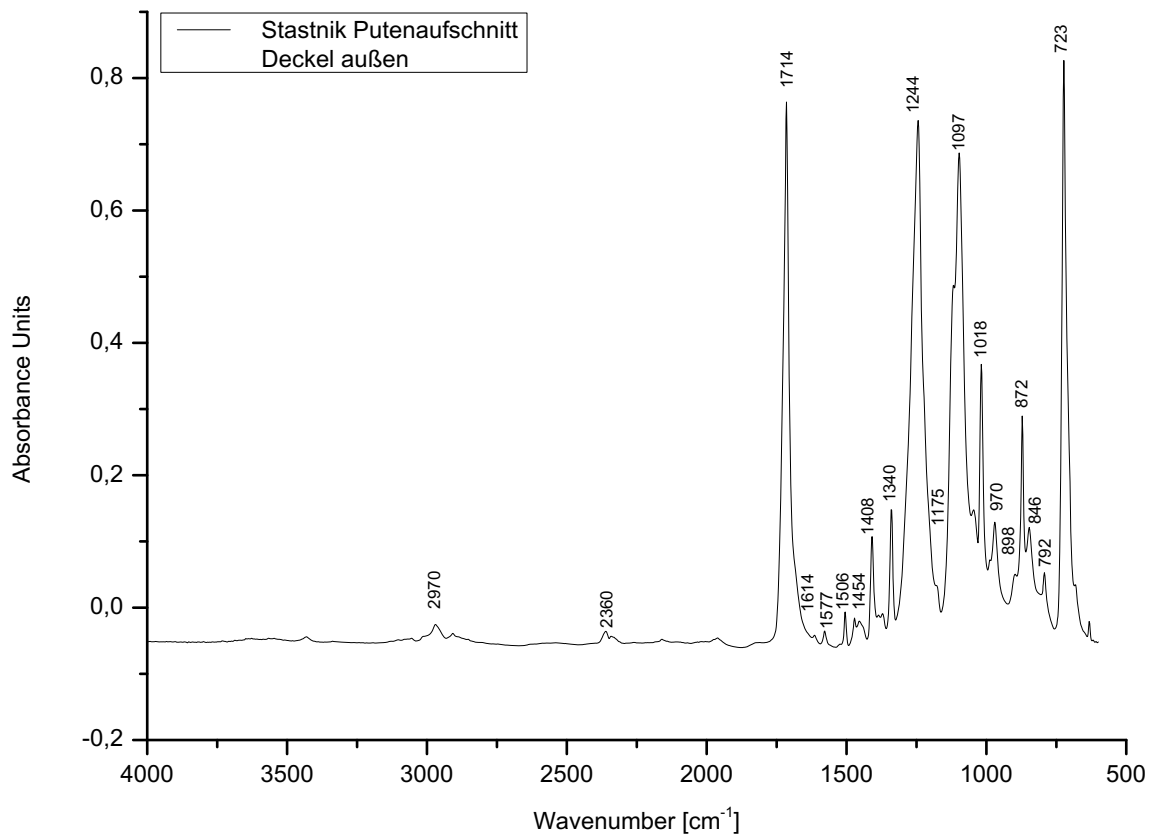


Abbildung 27: FTIR: Probe Nr. 11 Untertassenaußenseite

Tabelle 11: Analyse FTIR-Spektrum PET, Quelle: [56]

Frequenz [cm^{-1}]	Zuordnung
1370	CH_2 Wackelbewegung von Glykol
1340	CH_2 Wackelbewegung von Glykol
1230 (breites Band)	haupts. wegen Ester $\text{C} = \text{O}$ Dehnung
1090 (breites Band)	haupts. wegen Ester $\text{C} = \text{O}$ Dehnung
1017	„in-plane-Schwingung“ von Benzen
970	$\text{C} - \text{O}$ Dehnung von Glykol
897	CH_2 Schaukelbewegung von Glykol
870	aus der Ebene der Benzolgruppe
845	CH_2 Wackelbewegung von Glykol
722	aus der Ebene der Benzolgruppe

6.4 Polyamid (PA)

Dieses stark polare und teilkristalline Polymer kann aufgrund von verschiedenen langen Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Amidgruppen sehr unterschiedliche chemische Strukturen aufweisen [13], [14]. Die Anzahl der Amidgruppen ist indirekt proportional zur Länge der Zwischenglieder sowie zur Wasseraufnahmefähigkeit, jedoch direkt proportional zur Höhe der Glasübergangstemperatur sowie der Formbeständigkeit bei Wärmezufuhr [30]. Demzufolge kann PA6 im Vergleich zu PA12 mehr Wasser aufnehmen (bis zu 9 %) und weist eine höhere Glasübergangstemperatur und Wärmeformbeständigkeit auf. Wird Polyamid in Verbindung mit LDPE koextrudiert, so überwiegt der Anteil an PA6. Der entscheidende Vorteil dieser Art des Polyethylens liegt in der Elastizität, welche im Gegensatz zu den anderen PA-Typen, mit der Zeit nicht abnimmt [20]. Aufgrund dieser Werkstoffeigenschaften werden Polyamide in Kombination mit anderen Polymeren auch im Verpackungsbereich verwendet. Es wird vor allem als Barrierschicht für Sauerstoff, Feuchtigkeit und Aromen, aber auch aus Stabilitätsgründen eingesetzt [59], [20]. Tabelle 12 zeigt jene Polyamid-Typen, welche in der Verpackungsindustrie häufig verwendet werden.

Tabelle 12: Übersicht PA-Typen

Werkstoff	Schmelztemperatur (S.635)	Strukturformel
PA6	220 [20]	$\left[\text{NH} \text{---} \text{CH}_2 \text{CH}_2 \text{CH}_2 \text{CH}_2 \text{CH}_2 \text{C}(=\text{O}) \right]_n$ [60]
PA6/66	192-194 [61]	$\left[\text{C}(=\text{O}) \text{---} (\text{CH}_2)^4 \text{---} \text{C}(=\text{O}) \text{NH} \text{---} (\text{CH}_2)^6 \text{NH} \right]_n$ [62]
PA11	185 [20]	$\left[\text{NH} \text{---} (\text{CH}_2)_{10} \text{C}(=\text{O}) \text{NH} \text{---} (\text{CH}_2)_{10} \text{C}(=\text{O}) \right]_n$ [63]
PA12	180 [20]	$\left[\text{NH} \text{---} (\text{CH}_2)_{11} \text{C}(=\text{O}) \text{NH} \text{---} (\text{CH}_2)_{11} \text{C}(=\text{O}) \right]_n$ [63]

6.5 Polypropylen (PP)

Dieser teilkristalline Werkstoff kann aufgrund seiner Abhängigkeit vom molekularen Aufbau, dem angewandten Herstellungsverfahren sowie der Vorgeschichte des Polymers sehr unterschiedliche Charakteristiken aufweisen. Einen weiteren Einfluss auf die Diversität in den Werkstoffeigenschaften stellt die Taktizität der Molekülkette dar, welche in isotaktischer, syndiotaktischer oder ataktischer Form auftreten kann und insbesondere für die unterschiedliche Kristallisationsfähigkeit bzw. Kristallinitätsgrad verantwortlich ist [20].

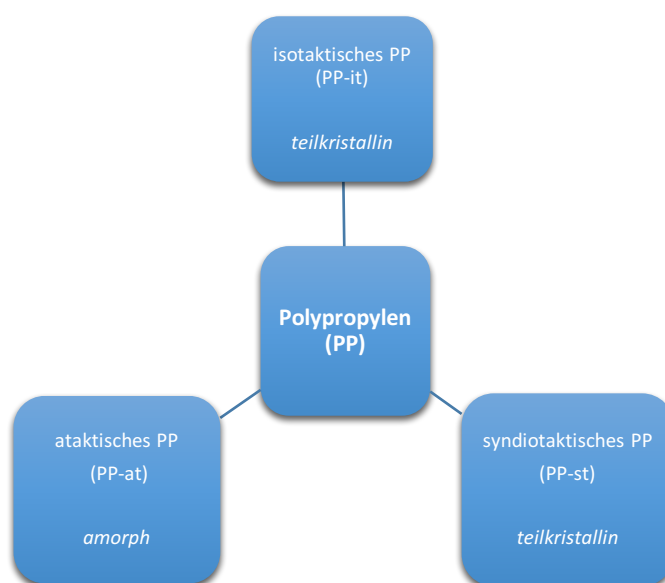
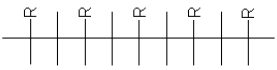
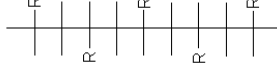
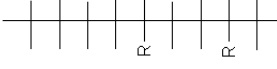


Abbildung 28: schematische Gliederung von PP

Der am häufigsten verwendete PP-Typ hat einen isotaktischen Aufbau, welcher aufgrund seiner regelmäßigen Struktur einen hohen Kristallisationsgrad aufweist. Dies impliziert nicht nur höhere Festigkeits- und Steifigkeitswerte, sondern auch höhere Schmelz- und Gebrauchstemperaturbereiche, als bspw. der Kunststoff HDPE. Syndiotaktisches PP hat zwar – gegenüber PP-it – eine höhere Schlagzähigkeit, dafür aber eine geringere Steifigkeit. Ataktisches PP hat eine amorphe Struktur, weist allerdings bei Raumtemperatur einen klebrigen Aggregatzustand auf [64].

Tabelle 13: Übersicht PP-Typen

	Kristallitschmelztemperatur [°C] [65]	Strukturformel [66]
isotaktisches PP	184	
syndiotaktisches PP	160	
ataktisches PP	-	

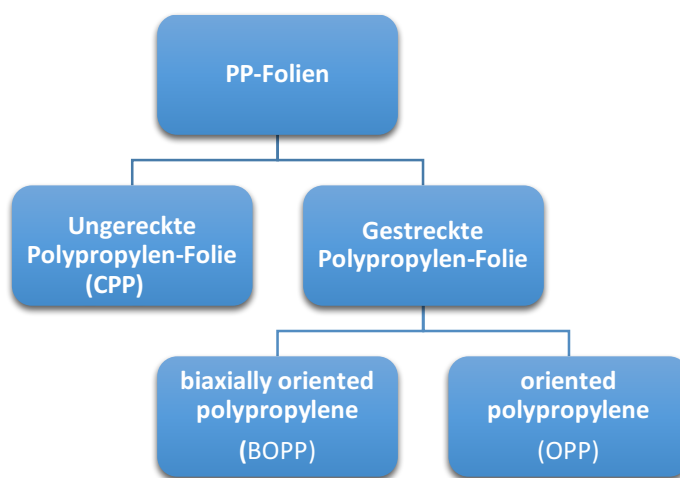


Abbildung 29: Einteilung der PP-Folien

Cast Polypropylen (CPP) hat eine sehr hohe Transparenz und Steifigkeit, weshalb es gemeinsam mit OPP zu den am häufigsten verwendeten Kunststoffen in der Verpackungsindustrie zählt [67].

Orientiertes Polypropylen (OPP) weist neben einer hohen Zug- und Durchstoßfestigkeit – selbst bei niedrigen Temperaturen – eine gute, von Feuchtigkeitsänderungen unabhängige, Barriere für Wasserdampf sowie eine moderate Gas- und Geruchsdurchlässigkeit auf [2]. Wie die Bezeichnung schon vermuten lässt, wird beim biaxial orientierten PP nicht nur in Längsrichtung, sondern auch in Querrichtung verstreckt, um so maximale Festigkeitswerte erreichen zu können [54].

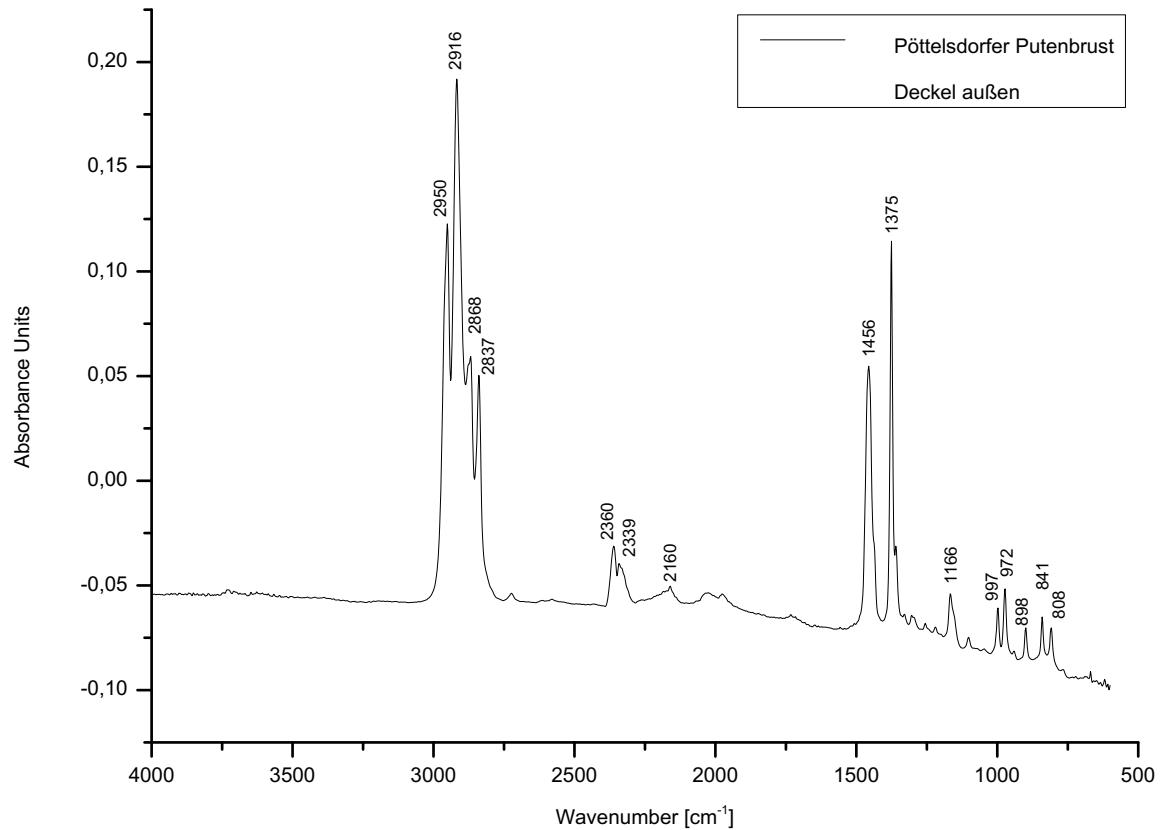
FTIR PP

Abbildung 30: FTIR: Probe Nr. 15 Deckelfolienaußenseite

Tabelle 14: Analyse FTIR-Spektrum PP, Quelle: [49]

Frequenz [cm^{-1}]	Zuordnung
2950	CH Dehnung
2916	CH Dehnung
2868	CH Dehnung
1456	CH ₂ Verformung
1375	symmetrische CH ₃ Verformung
997	isotaktisches Polypropylenband
972	isotaktisches Polypropylenband
841	isotaktisches Polypropylenband
722	isotaktisches Polypropylenband

6.6 Polystyrol (PS)

Polystyrol ist ein amorpher Kunststoff, dessen Kristallisation durch die sperrige Phenylgruppe (Benzolring) verhindert wird. PS weist ein klares und funkelndes Erscheinungsbild auf, und findet aufgrund seiner – bei Raumtemperatur vorherrschenden – relativ hohen Steifigkeit häufig in tiefgezogenen Bechern und Trays Anwendung. Einen weiteren Einsatzbereich dieses Polymers stellt der Einsatz in Form von Schaumstoff dar, welcher für die Herstellung von Kartons für frisches Obst, Eier oder Take-away Speisen verwendet wird. Trotz seiner Sprödigkeit wird PS auch in Form von Folien angeboten, dessen biaxiale Orientierung zu einer Verbesserung der Barriereigenschaften und Festigkeit führt. Nichtsdestotrotz bleibt die Gasdurchlässigkeit im Vergleich zu den Verpackungsfolien aus anderen Polymeren relativ hoch. Aus diesem Grund wird es u.a. mit EVOH oder PVC koextrudiert, um so die Herstellung von halbsteifen Behältern und Flaschen ermöglichen zu können.

Wird PS durch Gummi elasticum (Kautschuk) modifiziert, so entsteht HIPS (High Impact Polystyrene). Dadurch wird zwar die Problematik der Sprödigkeit beseitigt, jedoch ist HIPS nicht für den Einsatz von MAP-Verpackungen geeignet [2], [53].

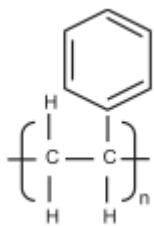


Abbildung 31: Strukturformel PS, Quelle: [53]

Tabelle 15: Kennwerte PS, HIPS

	Glasübergangstemperatur [°C]	Kristallitschmelztemperatur [°C]
PS	100, [53]	-
HIPS	95, [68]	235, [68]

6.7 Haftvermittler (HV)

Werden bei der Herstellung von Mehrschicht-Verpackungen bestimmte Polymere kombiniert, wie bspw. bei der Verwendung von Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) in Verbindung mit Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH), verlangen diese den Einsatz einer

Bindeschicht (engl. tie layer) [69]. Folgende Abbildung 32 zeigt einen möglichen schematischen Aufbau einer Multilayer-Verpackung, die in der Wurstwarenindustrie in Form einer mehrschichtigen Deckelfolie verwendet wird. Die – jeweils zwischen der EVOH- und PE-Schicht liegenden – Haftvermittler werden aufgrund einer chemisch bedingten Anziehungskraft, wie etwa der – während der Schmelzphase an der Oberfläche der PE-Schicht auftretenden – Molekularkettenverstrickung, i.e. Van-der-Waals-Kräfte und Ko-Kristallisation, verwendet. Zwischen der EVOH- und der HV-Schicht treten unterschiedliche Verbindungsarten, wie etwa eine Wasserstoffbindung oder eine Dipol-Dipol-Wechselwirkung, auf, um den Adhäsionsmechanismus ermöglichen zu können [70].

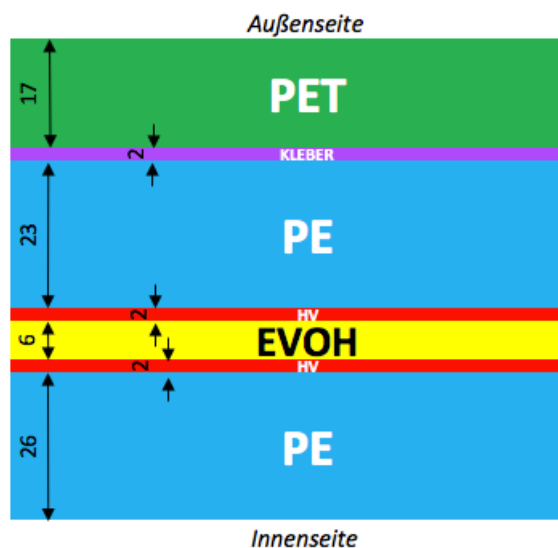


Abbildung 32: PET/KLEBER/PE/HV/EVOH/HV/PE

Abgesehen von den bereits erwähnten Bindungsarten spielt auch die chemische Bindung zwischen dem funktionalisierten Teil des PE-Moleküls und dem polaren Material eine entscheidende Rolle [71].

Tabelle 16 zeigt eine Übersicht über die Adhäsionsfähigkeit der – in der Verpackungsindustrie verwendeten – Polymere.

Tabelle 16: G: Gut, M: Mittel, S: Schlecht, Quelle: [9]

	EVOH	PP	PA	HDPE
LDPE	G	S	S	G
LLDPE	S	G	S	G
EVA	S	G	S	G

Grundsätzlich hängt das Adhäsionspotential während des Koextrusionsvorganges von folgenden Faktoren ab [72], [73]:

- Klebeschichtdicke
- erhöhte Funktionalität in der HV-Schicht
- Schmelztemperatur
- Kontaktzeit

Die für die jeweiligen Schichten als Bindeschicht eingesetzten Materialien lassen sich wie folgt einteilen:

Tabelle 17: Haftpartner Klebstoffe, Quelle: [9]

Funktionalität	haftet an
Säure	PA, Aluminium-Folie
Anhydrid	PA, EVOH
VA-Edelstahl	PVDC, PP, PET
Acrylat	verschiedene Tinten
Epoxy	PET
Silane	Glas

Demnach kommen folgende Materialien als Haftvermittler zum Einsatz [71]:

- Ethylenvinylacetat (EVA)
- Maleinsäureanhydrid modifiziertes LDPE
- Maleinsäureanhydrid-modifiziertes HDPE
- Maleinsäureanhydrid-modifiziertes LLDPE
- Maleinsäureanhydrid-modifiziertes PP
- Säuremodifiziertes Ethylenacrylat
- Maleinsäureanhydrid-modifiziertes Ethylenacrylat
- Anhydrid modifiziertes EVA
- Säureacrylat-modifiziertes EVA
- Ethylenmethylacrylat
- Ethylenethylacrylat

Aufgrund des theoretischen Hintergrundes bzgl. des Einsatzes von Haftvermittlern wurde bei der Analyse der Schichtdicken angenommen, dass – auch wenn es in den Mikroskopie-Aufnahmen teilweise nicht ersichtlich war – bei den Kombinationen von PP bzw. PE mit EVOH und PP mit PE jeweils eine haftvermittelnde Bindschicht vorhanden ist.

Theoretisch wäre es zwar – durch die Verwendung von sehr dünnen EVOH-Schichten – möglich, auf eine Klebeschicht zu verzichten, allerdings wurde dieses Verfahren bei den – im Rahmen dieser Arbeit – untersuchten Lebensmittelverpackungen nicht angewandt [74].

6.8 Klebstoffe

Eine weitere Variante, um bei der Herstellung von Mehrschicht-Verpackungen Adhäsion zwischen den einzelnen Folien fördern zu können, ist – abhängig vom jeweiligen Herstellungsverfahren – der Einsatz von Klebstoffen, welche folgendermaßen eingeteilt werden können [15]:

- Schmelzklebstoffe
- Laminier-/Kaschierklebstoffe
- Dispersionsklebstoffe

6.8.1 Schmelzklebstoffe

Schmelzklebstoffe finden in unzähligen vielen verschiedenen Industriezweigen Anwendung. Folgende Abbildung 33 zeigt, welche unterschiedlichen Substanzen hierbei zum Einsatz kommen:

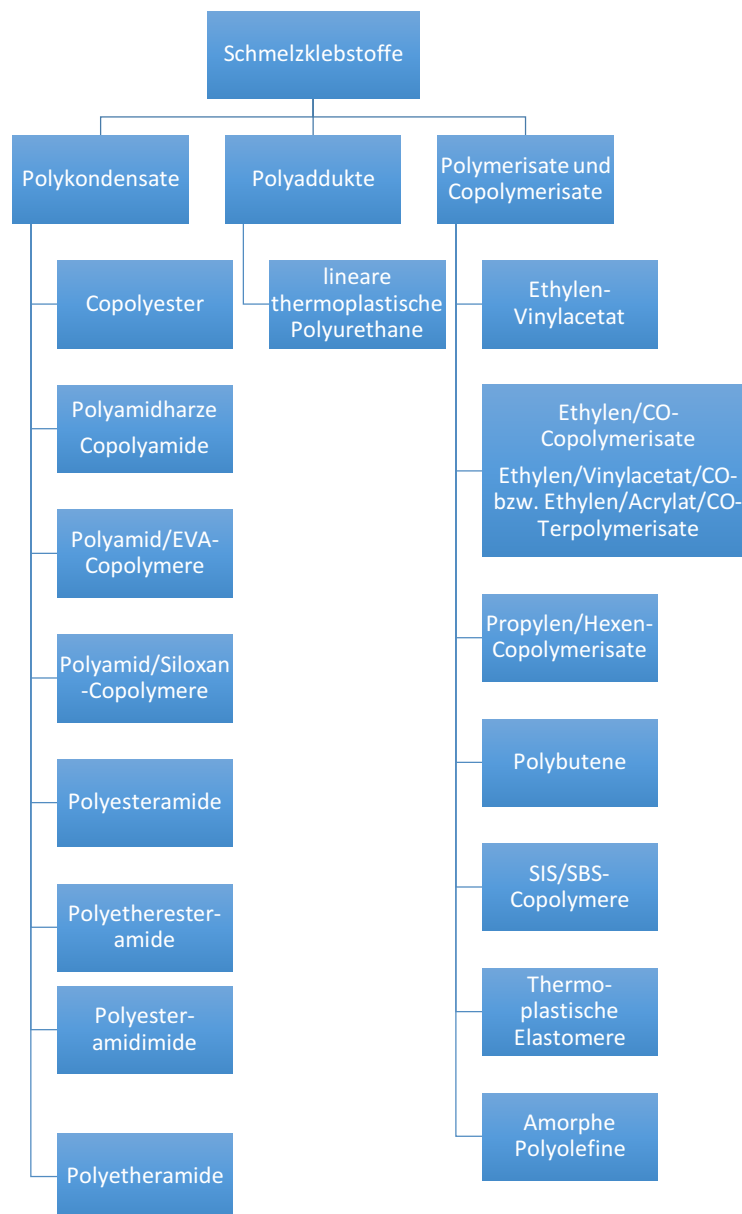


Abbildung 33: Basissubstanzen für Hotmelt-Klebstoffe, Eigene Darstellung (Quelle:[15])

6.8.2 Laminier-/Kaschierklebstoffe

Bei den Laminier- bzw. Kaschierklebstoffen wird zwischen folgenden grundlegenden Arten unterschieden [15]:

- Lösungsmittelfreie Einkomponentenreaktionsklebstoffe:
Die hierfür am häufigsten verwendeten Kunststoffe sind Isocyanatprepolymere und der Härtungsmechanismus basiert auf Feuchtigkeit.
- Lösungsmittelfreie Zweikomponentenklebstoffe:
Zum Einsatz kommen hierbei meistens niedrigmolekulare Prepolymere, insbesondere Isocyanate und Di-/Triole, die bei Raumtemperatur einen flüssigen Aggregatzustand aufweisen. Die Komponenten müssen aufgrund ihrer hohen Reaktionsgeschwindigkeit, welche durch zusätzliche Erhitzung verkürzt werden kann, bereits vor dem Auftragen miteinander vermischt werden.
- Lösungsmittelfreie strahlungshärtende Klebstoffe:
Bei diesen Klebstoffen bildet die Kombination aus – in unterschiedlichsten Variationen vorkommenden – Acrylate mit reaktiven Lösungsmitteln die Basis. Als Bestandteile dieser Klebstoffart werden sowohl reine Acrylate als auch auf Polyestern, Epoxiden oder Polyurethanen basierende acrylierte Systeme verwendet. Der Härtungsmechanismus basiert auf Elektronen- und UV-Strahlung.

6.8.3 Dispersionsklebstoffe

Um die – für die Haftung verantwortlichen – Polymere in einen flüssigen Aggregatzustand überführen zu können, wird bei dieser Klebstoffart in den meisten Fällen Wasser verwendet. Im Gegensatz zu Lösungsmittelklebstoffen, bei welchen die Polymere im aufgelösten Zustand wiederzufinden sind, erfolgt bei den Dispersionsklebstoffen keine Vermischung der beiden Phasen miteinander, weshalb auch der Begriff Dispersion verwendet wird. Der Härtevorgang liegt der Abscheidung der flüssigen Phase (meistens Wasser) – infolge von bspw. Verdunstung – zugrunde [75], [76]. Die Grundbestandteile von Dispersionsklebstoffen sind meistens Copolymere, Polyvinylacetat oder Polyacrylat [77].

6.9 Primer

Obwohl Primere und Haftvermittler unterschiedliche chemische Reaktionsweisen haben, wird in der Literatur oftmals kein Unterschied zwischen den beiden Begriffen gemacht. Die Funktionsweise von Haftvermittlern geht auf die Bifunktionalität der Moleküle zurück. Diese unterbindet jegliche intramolekulare Reaktion der Monomere oder Prepolymere.

Im Gegensatz dazu, stellen Primere chemisch reaktive Systeme dar, welche spezielle Polymerschichten auf Basis von Vernetzungsreaktionen auf den – zu verbindenden – Oberflächen ausbilden.

Primere werden für folgende Zwecke eingesetzt:

- Verbesserung der Haftbedingung
- Verbesserung der Alterungsbeständigkeit
- Korrosionsschutz der – zu fügenden – Oberflächen
- Konservierung bereits behandelter bzw. aktivierter Oberflächen, falls diese erst zu einem späteren Zeitpunkt weiterverarbeitet werden können

Die Bestandteile von Primern sind meistens verdünnte Lösungen von Klebstoffgrundstoffen. Demnach werden Epoxid oder Mischpolymerisate häufig als Basis verwendet [15]. Primere kommen v.a. bei der Extrusionskaschierung zum Einsatz, wo sie in Form von sehr dünnen Schichten (ca. 1 g/m^2) als Vorbehandlung für die Fügeoberflächen verwendet werden [78]. Primere können demzufolge als Aktivatoren der Oberflächen angesehen werden, auf welche dann der eigentliche Haftvermittler aufgetragen wird [79].

7. Auswertung

Die nachfolgenden Unterkapitel 7.1 und 7.2 behandeln die detaillierte Auswertung und Interpretation der Messergebnisse der untersuchten Untertassen- bzw. Deckelfolien. Hierbei können Übereinstimmungen bzw. Ähnlichkeiten zwischen einigen Verpackungen festgestellt werden, was ggbs. durch die Überlagerung der ermittelten DSC-Kurven verdeutlicht werden soll.

7.1 DSC-Auswertung: Deckelfolien

Folgende Abbildung 34 zeigt die mikroskopische Aufnahme eines untersuchten Deckels, wobei hier – im Vergleich zu anderen Proben – der schematische Aufbau relativ gut zu erkennen ist.

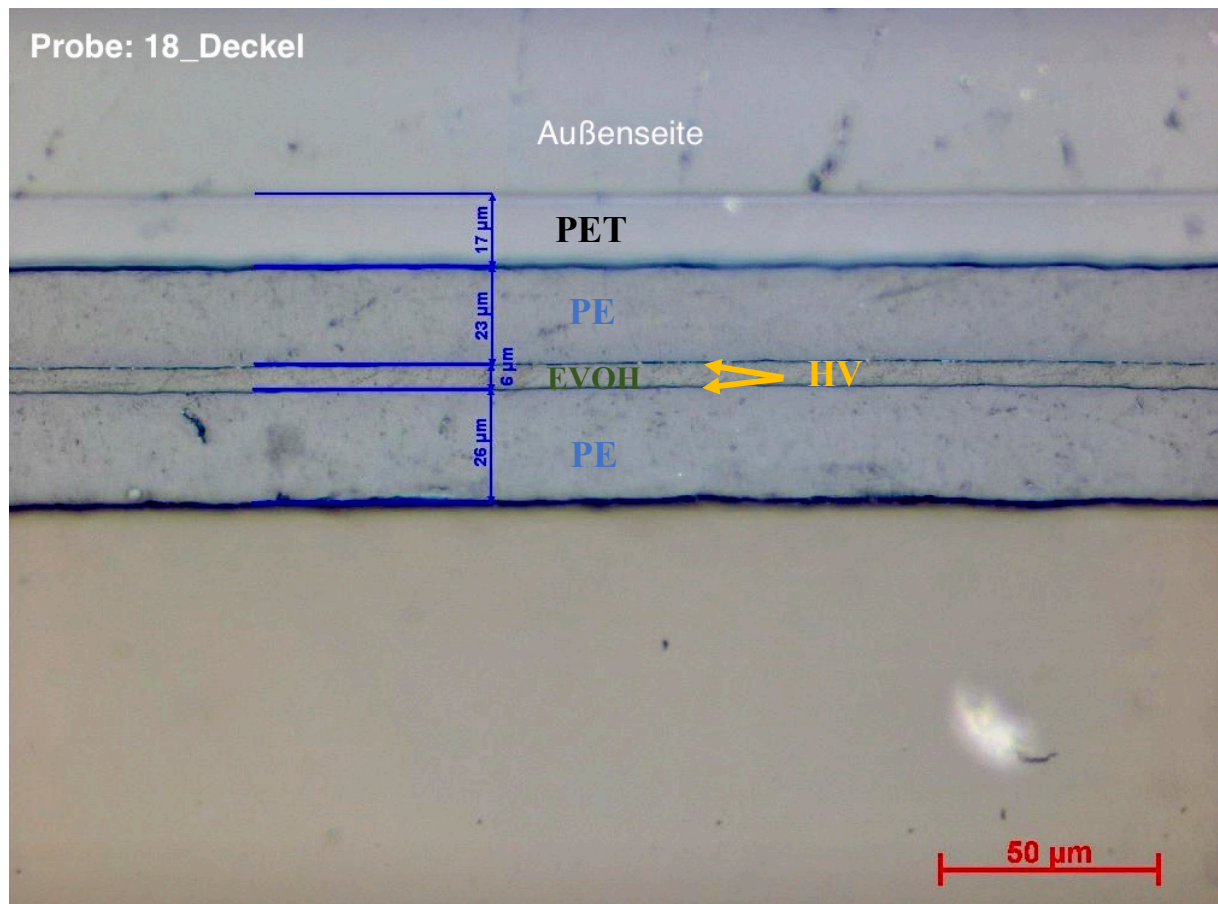


Abbildung 34: Probe Nr. 18: PET/KLEBER/PE/HV/EVOH/HV/PE

Eine weitere Mikroskopie-Aufnahme einer Oberfolie ist in Abbildung 35 zu sehen. Die zusätzliche Analyse mit Hilfe der dynamischen Differenzkalorimetrie und des Fourier-Transformations-Infrarotspektrometers ermöglichten – neben der Schichtdickenmessung – auch die Bestimmung der – in der Multilayer-Verpackung – eingesetzten Polymere.

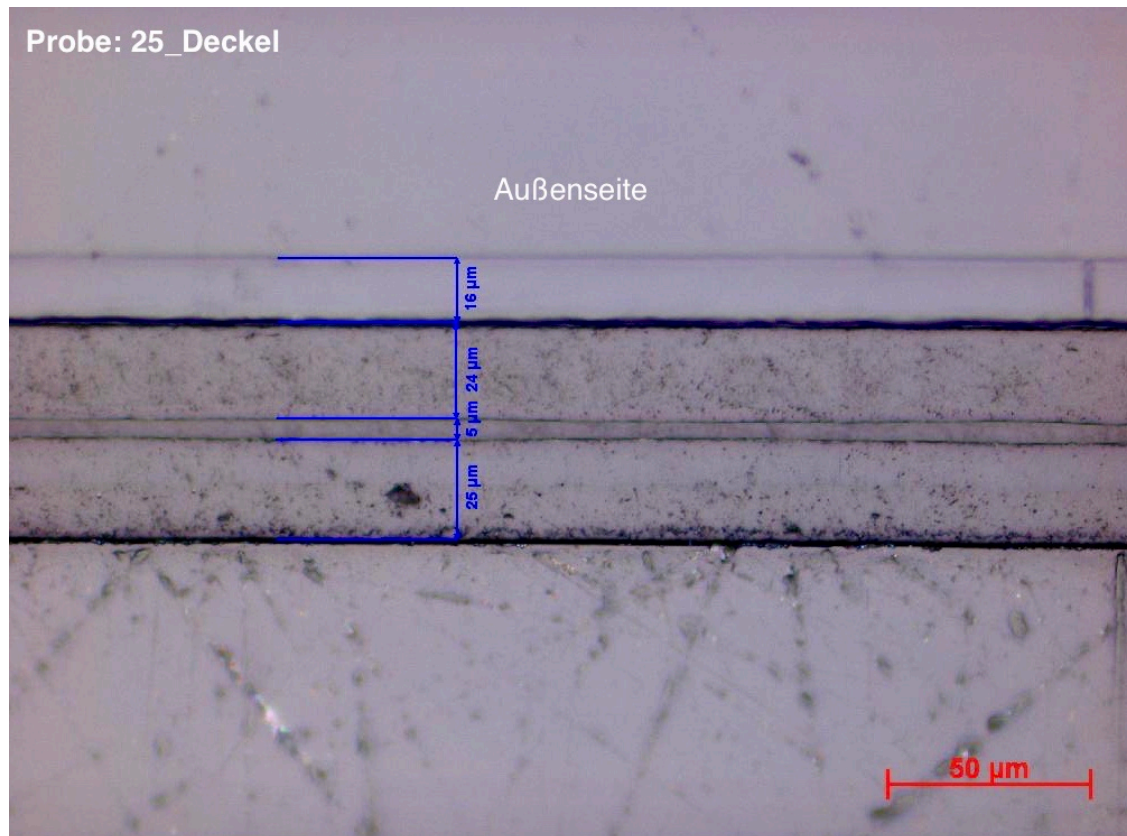


Abbildung 35: Mikroskopie-Aufnahme: Probe Nr. 25 Deckelfolie

Der bei etwa 40 °C auftretende Schmelz- bzw. Rekristallisationspeak, welcher in Abbildung 36 zu sehen ist, erscheint in nahezu jeder untersuchten Mehrschicht-Verpackung. Die geringe Höhe des Ausschlages ist auf sehr dünne Kristalle zurückzuführen [80]. Die weiteren Peaks bei den Temperaturen von rund 108 sowie 117 °C deuten auf die Werkstoffe LDPE bzw. LLDPE hin. Die 5 µm dünne Schicht (s. Abbildung 35) ist bei der DSC-Kurve bei etwa 180 °C zu sehen. Hierbei handelt es sich um das Polymer EVOH, welches für seine überaus guten Barriereigenschaften – insbesondere gegen O_2 , CO_2 und N_2 – bekannt ist. Die – in den meisten Fällen aus PET bestehende – Außenschicht hat ihren Schmelzpunkt bei ca. 250 °C und ihren Kristallisationspeak bei rund 210 °C.

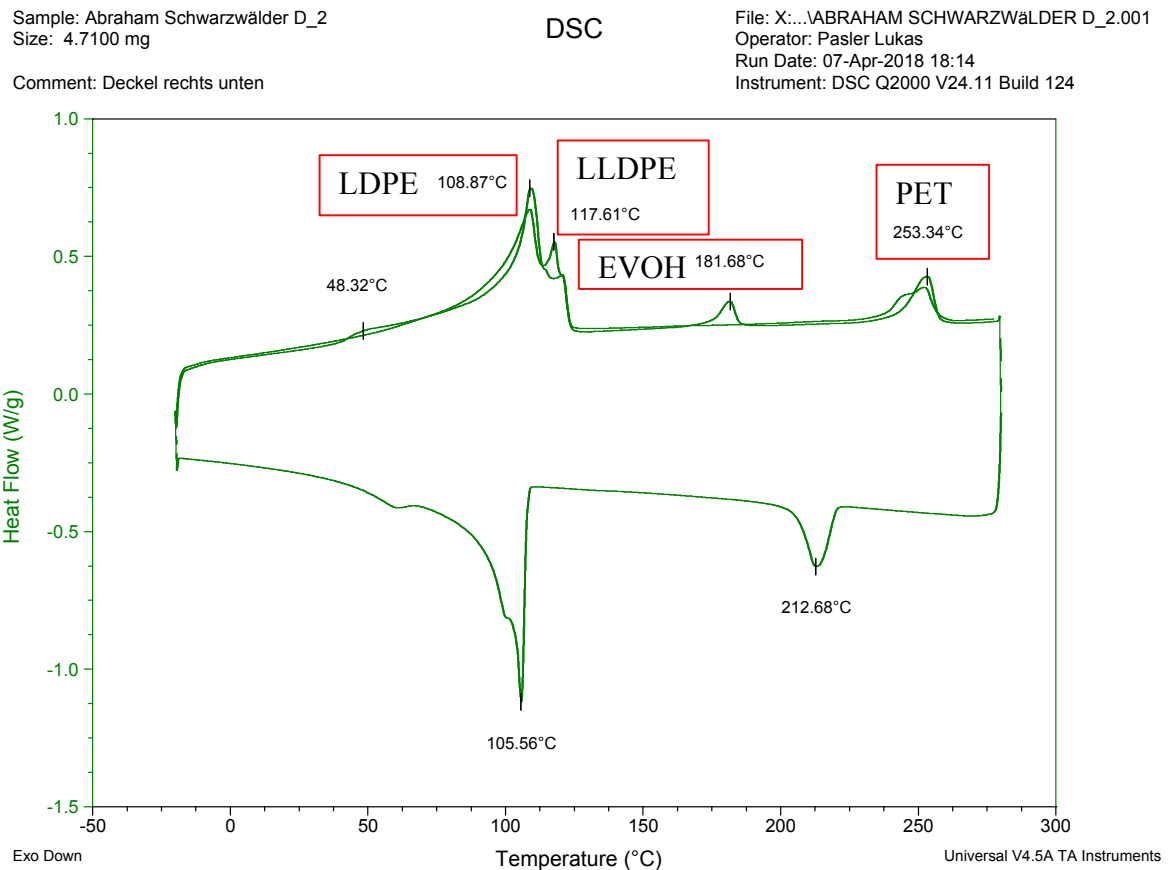


Abbildung 36: DSC-Kurve: Probe Nr. 25 Deckelfolie

Abbildung 36 zeigt eine untersuchte Deckelfolie, die u.a. aus LDPE und LLDPE besteht. Die unterschiedliche Höhe der Peaks weist auf einen geringen Anteil des LLDPE im Vergleich zu LDPE hin. Die eingesetzte Menge an PET ist verhältnismäßig gering, was sich in der geringen Höhe des Schmelzpunktes widerspiegelt. Ein weiteres Merkmal wäre der – bei ca. 70 °C auftretende – Glasübergang, welcher in diesem Fall nicht ersichtlich ist.

Des Weiteren zeigt Abbildung 37 die – mittels der DSC – ermittelte thermische Analyse zweier PET-haltigen Proben mit unterschiedlichem Kristallisationsgrad, welcher im Höhenunterschied der beiden Peaks bei einer Temperatur von 250 °C erkenntlich ist. Bemerkenswert ist, dass die Peak-Höhe in diesem Fall offensichtlich unabhängig von der – in den untersuchten Proben – enthaltenen Menge von PET ist, worauf nachfolgende Abbildung 38 schließen lässt. Im linken Bild, welches die Mikroskopie-Aufnahme der Probe Nr. 2, i.e. Deckelfolie der Verpackung „Arlberger Leichter Schinken“, zeigt, ist zu erkennen, dass die

PET-Schicht sogar dünner als jene der Vergleichsprobe ist, obwohl ein höherer Peak in der DSC-Kurve zu sehen ist.

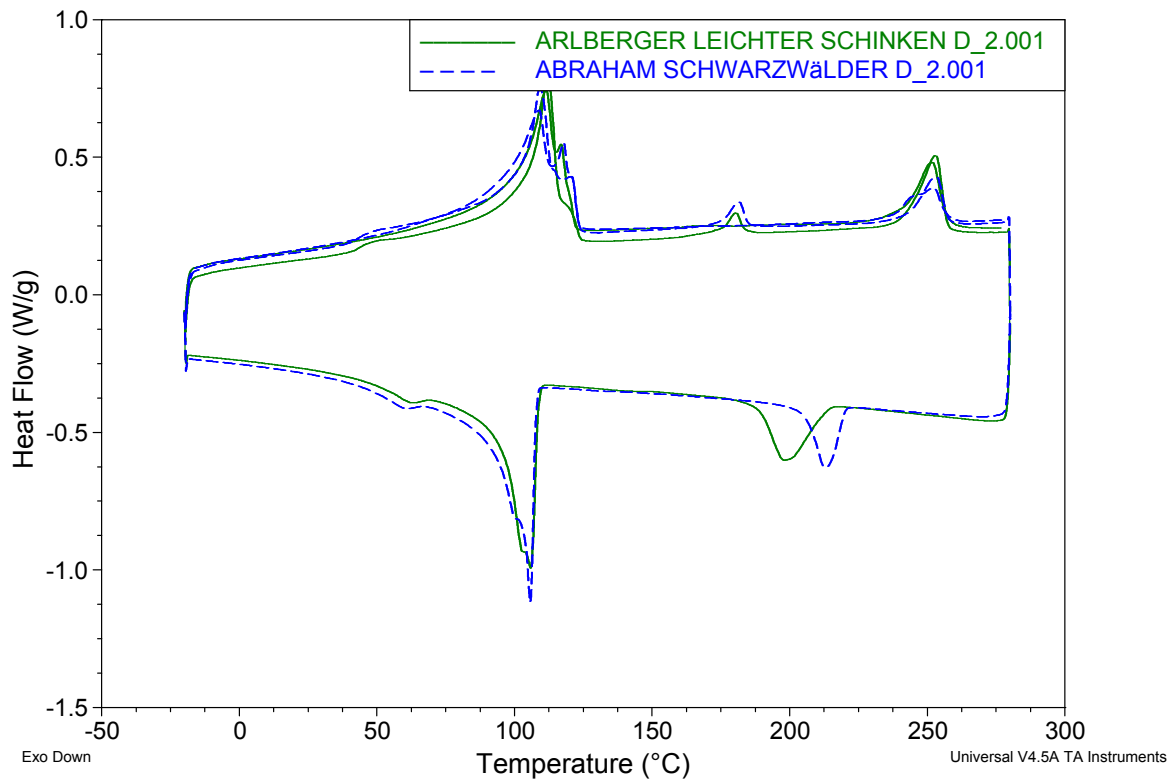


Abbildung 37: Overlay DSC Kurven: Probe Nr. 2 (grün) und Probe Nr. 25 (blau)

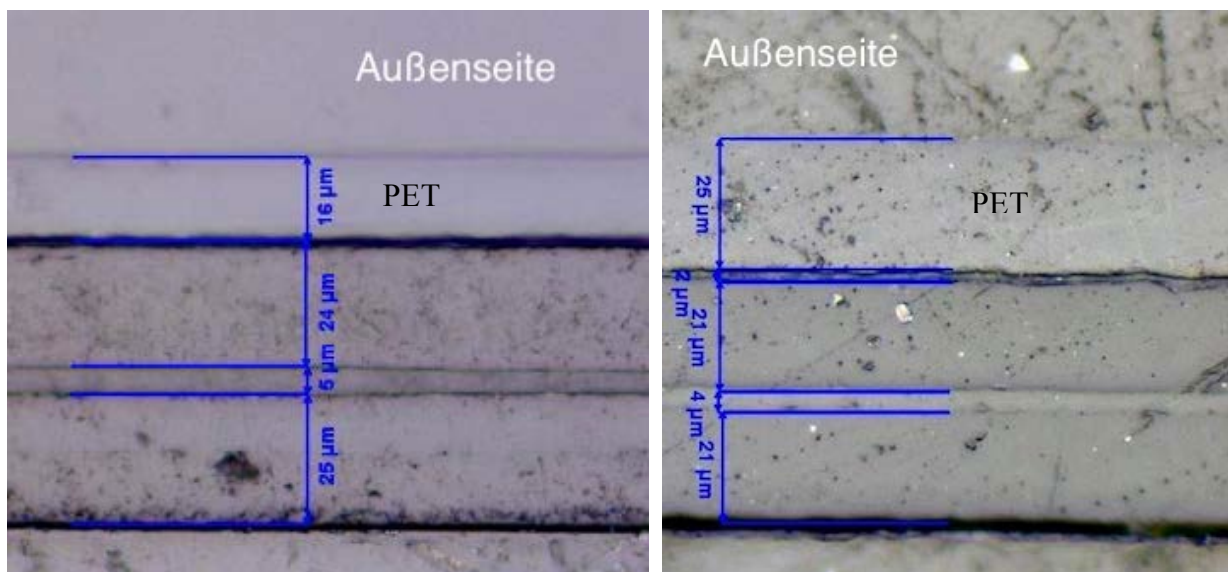


Abbildung 38: Vergleich bei Vergrößerung x 50: li. Probe Nr. 2, r. Probe Nr. 25

Folgende Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen Overlays von 10 Deckelfolien, welche folgende Merkmale aufweisen:

- Glasübergang bei etwa 70 °C
- Schmelzpeak von LDPE bei ca. 110 °C
- Schmelzpeak von LLDPE bei ca. 118 °C
- Schmelzpeak von EVOH bei ca. 180 °C
- Schmelzpeak von PET bei ca. 240 °C
- Kristallisationspeak von PET bei ca. 200 °C
- Kristallisationspeak von LDPE bei ca. 100 °C
- Kristallisationspeak von LLDPE bei ca. 108 °C

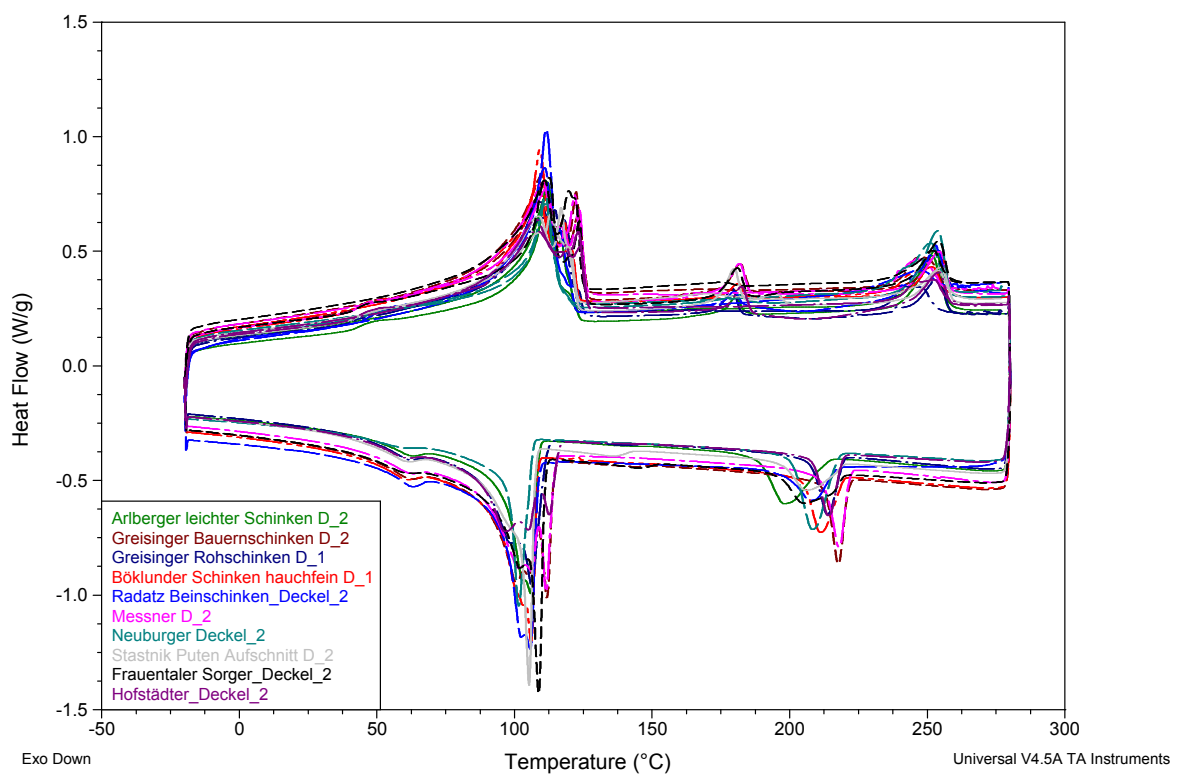


Abbildung 39: Overlay DSC-Kurven: Deckelfolien

Auffallend ist hierbei, dass – im Gegensatz zu den untersuchten Untertassen (s. Abbildung 49 und Abbildung 50) – keine Rekristallisation des amorphen PET bei der Temperatur von ca. 125 °C stattfindet. Dies ist – wie in Abbildung 41 ersichtlich – auf die geringe Menge des eingesetzten amorphen PET zurückzuführen.

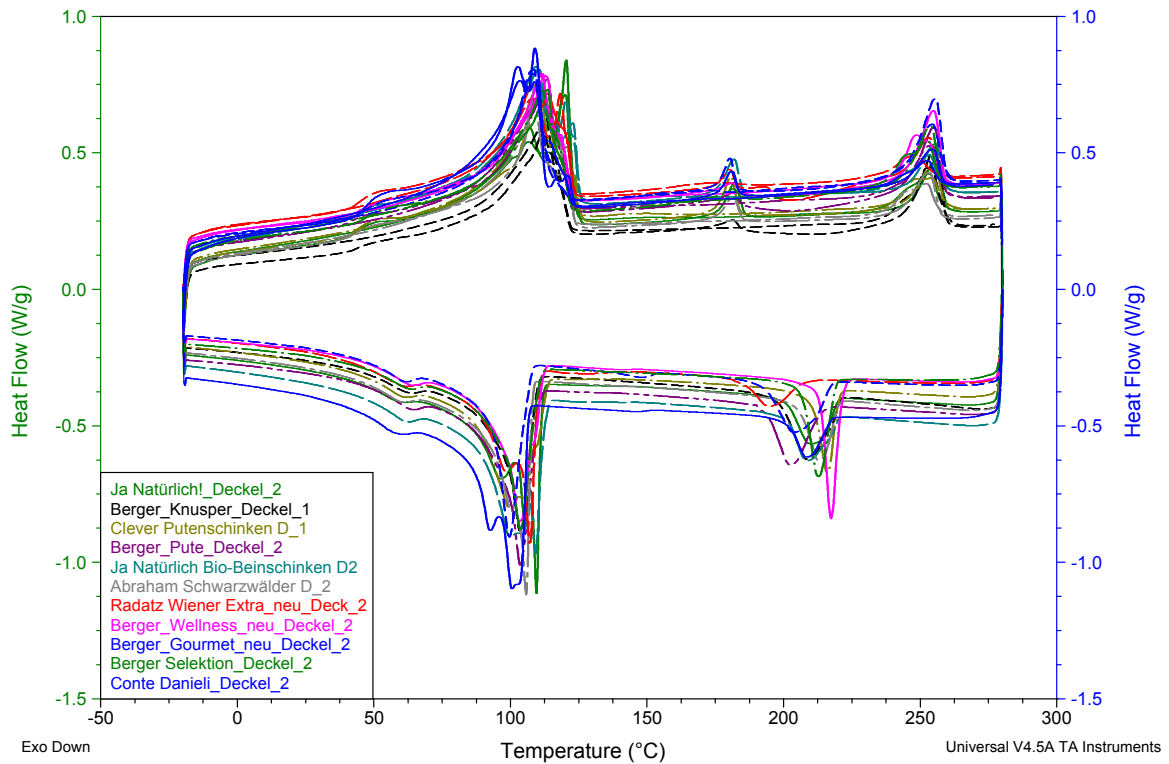


Abbildung 40: Overlay DSC-Kurven: Deckelfolien

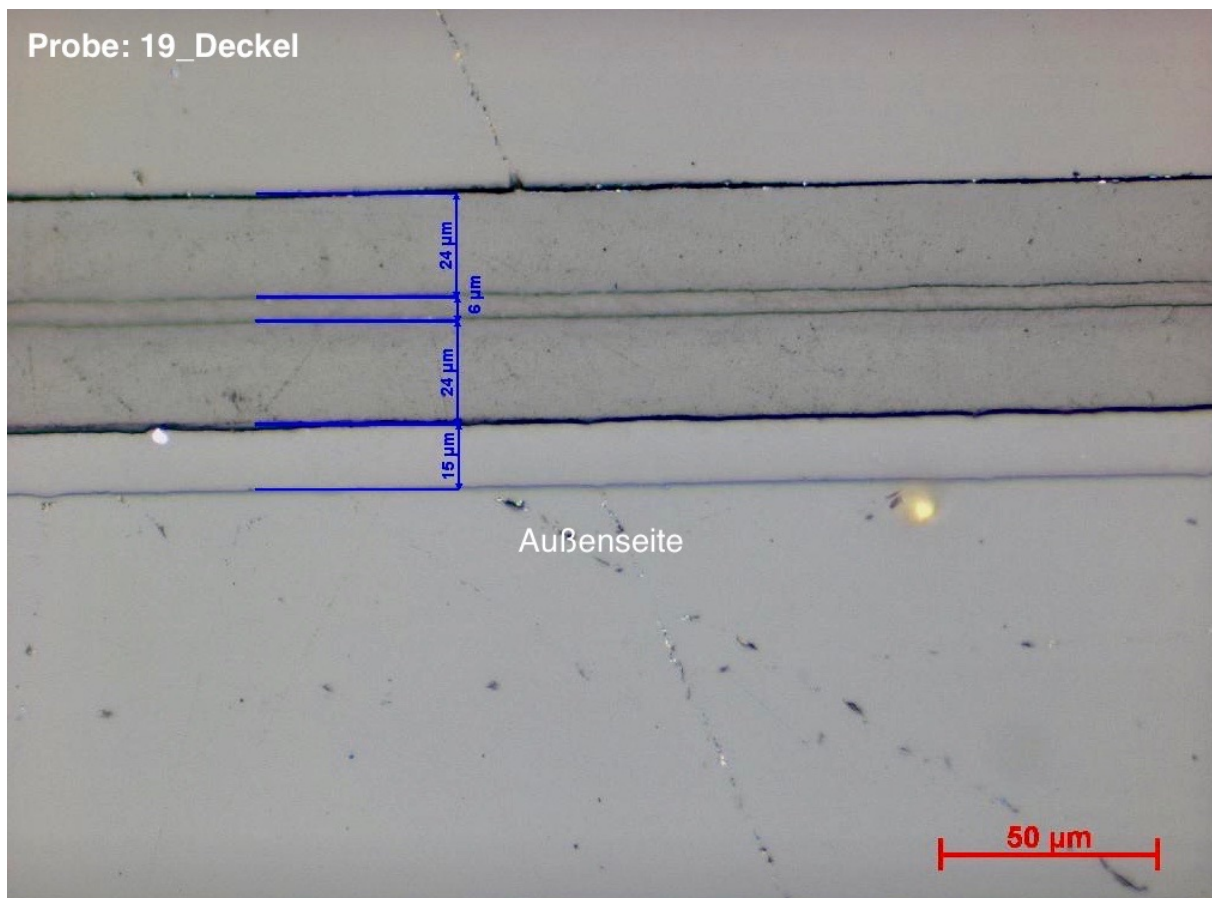


Abbildung 41: Mikroskopie-Aufnahme: Probe Nr. 19 Deckelfolie

Abbildung 42 zeigt die Überlagerung jener DSC-Kurven, welche – im Gegensatz zu den zuvor erwähnten Proben – einen Schmelzpeak bei 191 °C aufweisen, was ein Indiz für den Einsatz von PA6/66 ist [81].

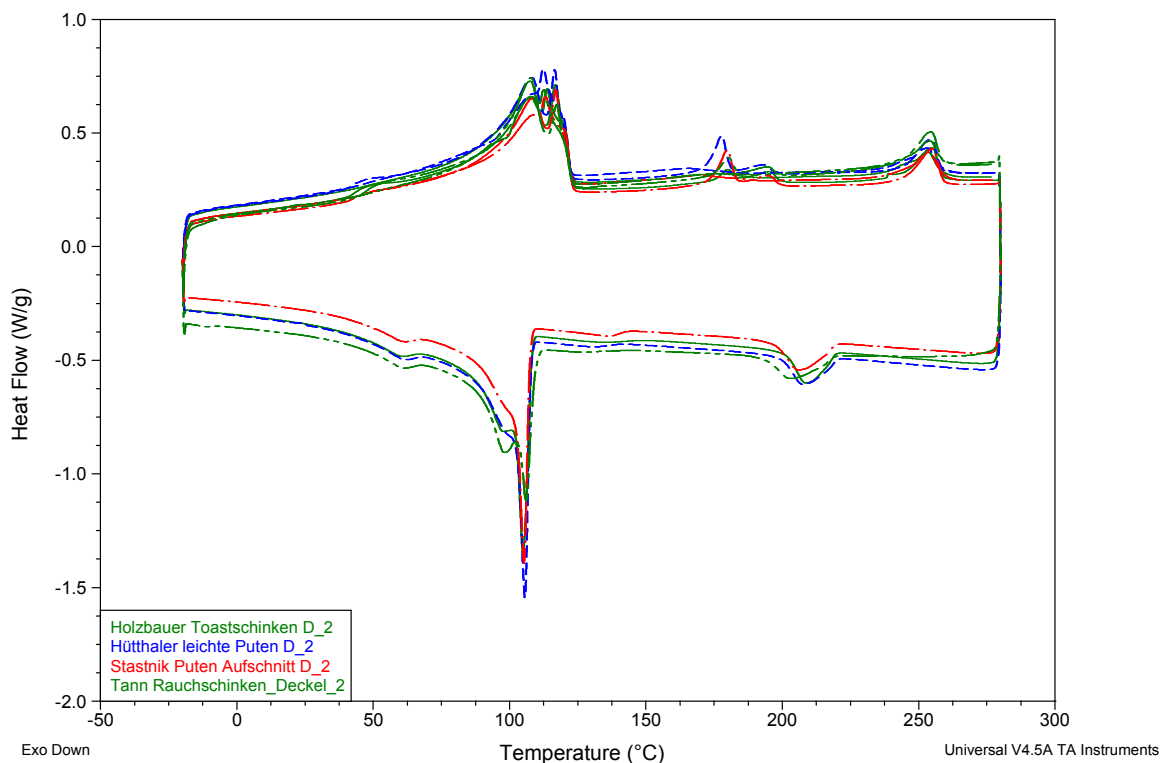


Abbildung 42: Overlay DSC-Kurven: Deckelfolien

Die Untersuchung mit Hilfe des Mikroskops gibt Aufschluss über den strukturellen Aufbau der Deckelfolie. Anhand dieser Aufnahme kann eine relativ dünne PET-Schicht (15 μm) festgestellt werden, was zum Ausbleiben eines Rekristallisationspeaks bei ca. 125 °C führt. Der Schmelzpunkt bei der Temperatur von rund 190 °C weist auf das Copolyamid PA6/66 hin [81]. Die zusätzliche Analyse der Proben mittels der FTIR-Methode sowie unter Berücksichtigung des theoretischen Hintergrundes bzgl. des Einsatzes von haftvermittelnden Schichten ermöglichte gänzliche Gewissheit über den schichtweisen Aufbau zu erlangen. Dieser lautet – von außen nach innen – wie folgt:

PET – KLEBER – PE – HV – PA6/66 – EVOH – PA6/66 – HV – PE

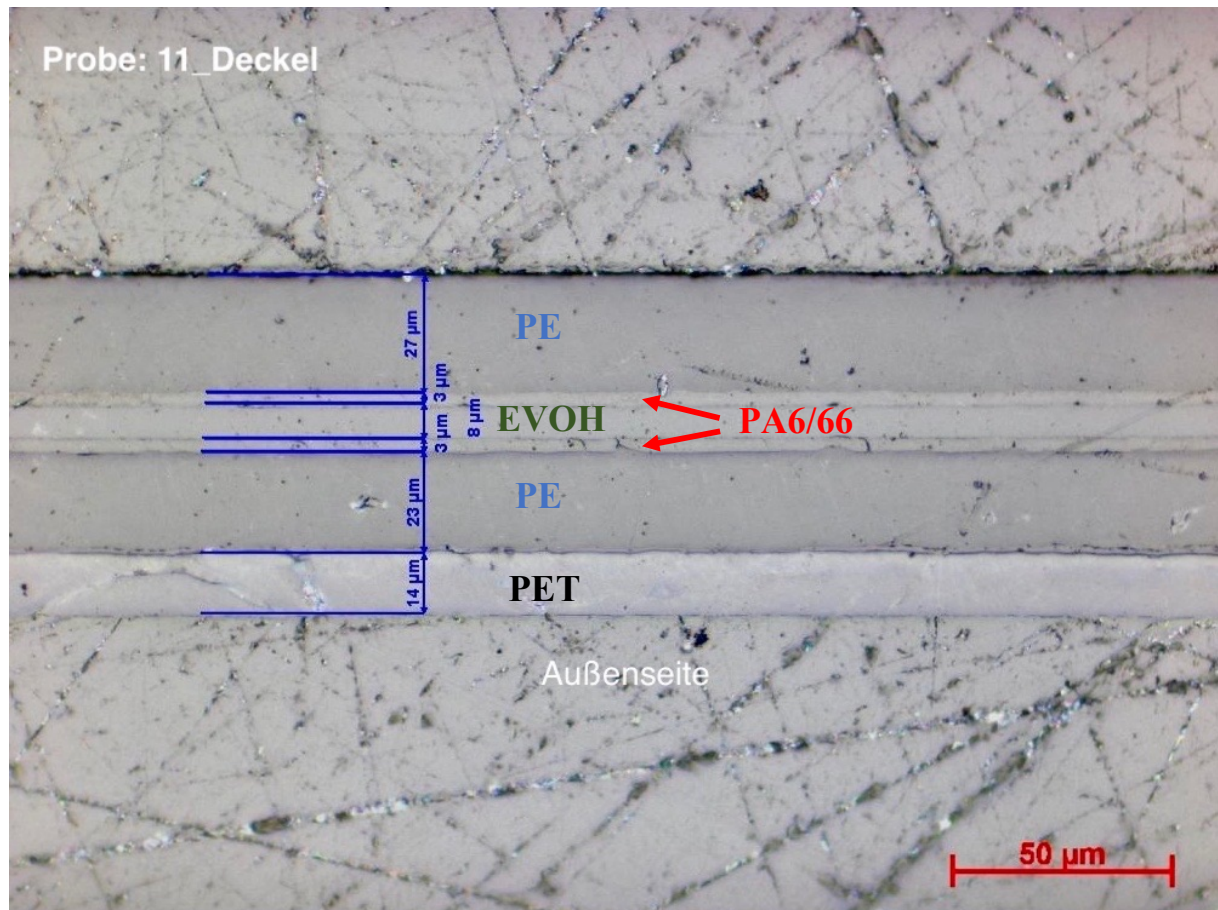


Abbildung 43: Mikroskopie-Aufnahme: Probe Nr. 11 Deckelfolie

Eine weitere Materialkombination, welche bei der Herstellung von Deckelfolien angewendet werden kann, ist in Abbildung 44 zu sehen:

- Schmelz- bzw. Rekristallisationspeak bei ca. 50 °C aufgrund sehr dünner Kristalle
- Schmelzspitzen bei 106 bzw. 122 °C aufgrund von PE
- Schmelzpeak des EVOH bei 182 °C
- Schmelzpeak des syndiotaktischen PP bei 166 °C

Sample: Pöttelsdorfer Putenbrust D_2
Size: 4.8500 mg

DSC

File: X:\...PÖTTELSDORFER PUTENBRUST D_2.001
Operator: Pasler Lukas
Run Date: 09-Apr-2018 08:23
Instrument: DSC Q2000 V24.11 Build 124

Comment: Deckel rechts oben

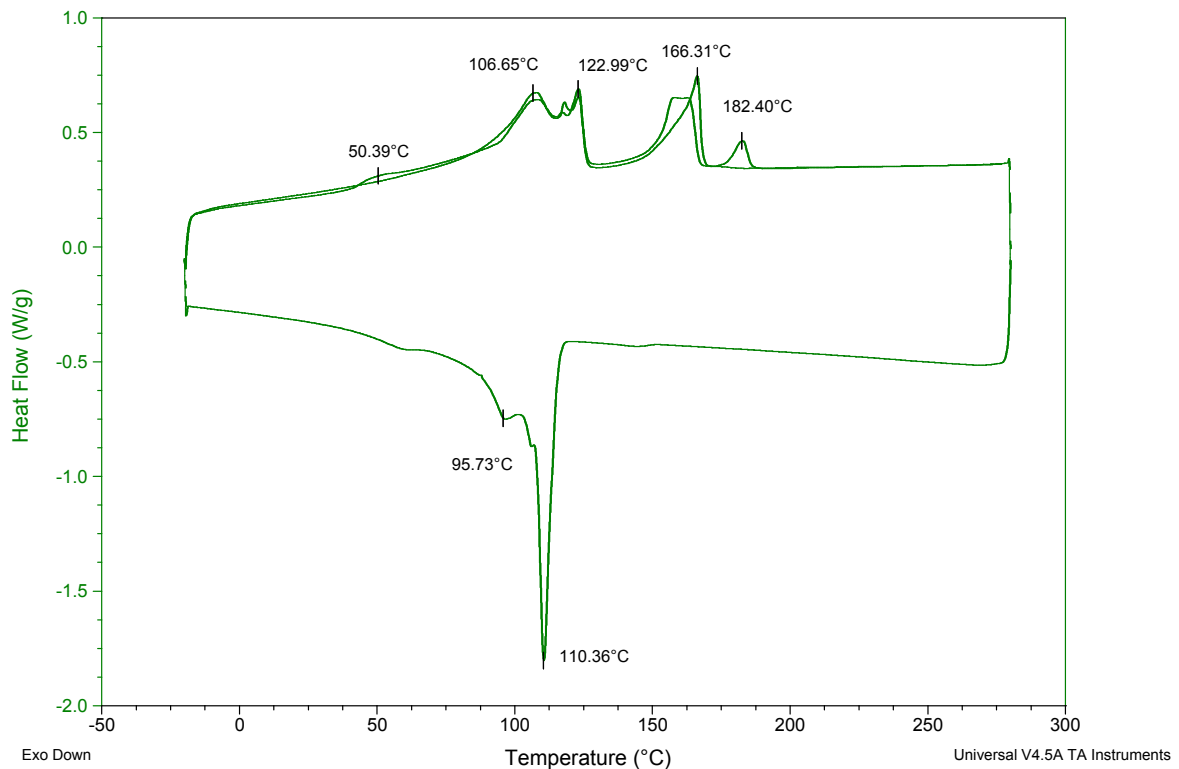


Abbildung 44: DSC-Kurve: Deckelfolie Probe Nr. 15

Abbildung 45 zeigt die DSC-Kurven von 2 Deckelfolien, welche – im Vergleich zu den anderen analysierten Verpackungsfolien – einen bemerkenswerten Aufbau aufweisen. Die zusätzliche Information über die Verpackungszusammensetzung seitens des Herstellers erleichterte die Analyse des komplexen Aufbaus (s. Abbildung 46) bis zu einem gewissen Grad.

Bei diesen Verpackungsfolien wurden folgende Polymere eingesetzt [82]:

- biaxial orientiertes Polyester
 - Kaschierkleber
 - EVOH
 - PA
 - PE
 - PP
- } koextrudiert

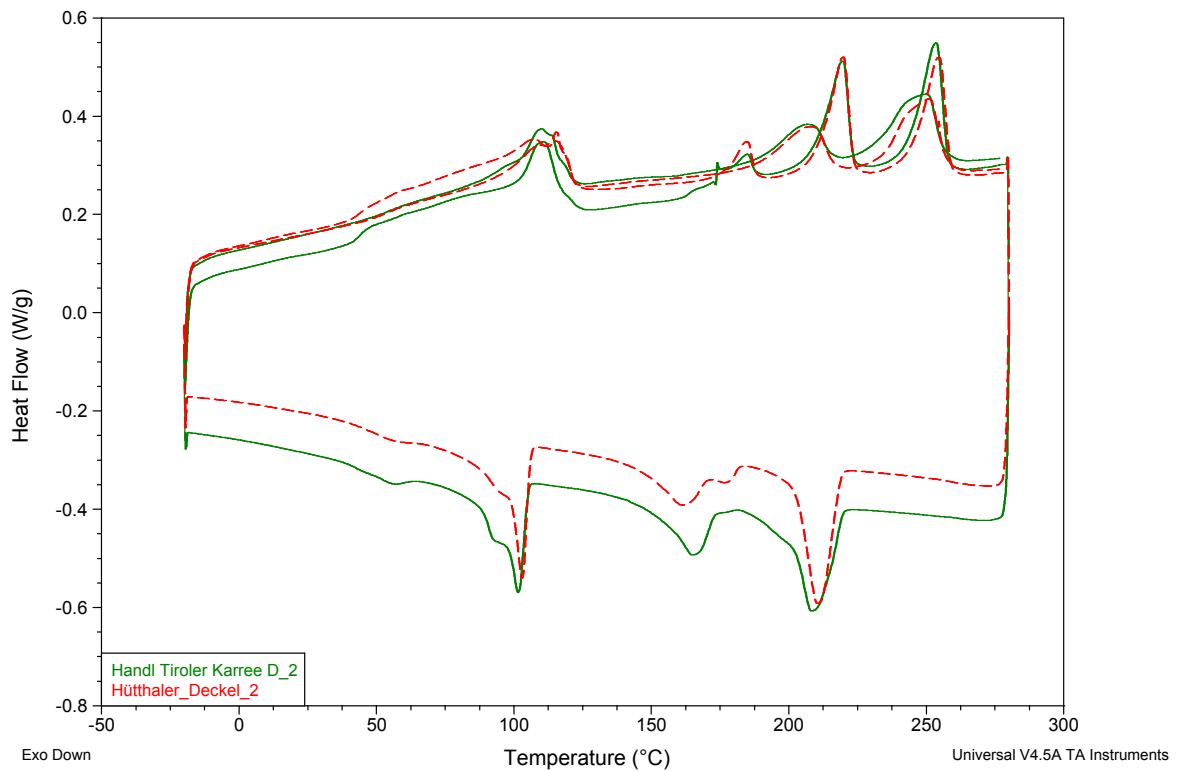


Abbildung 45: Overlay DSC-Kurven: Deckelfolien

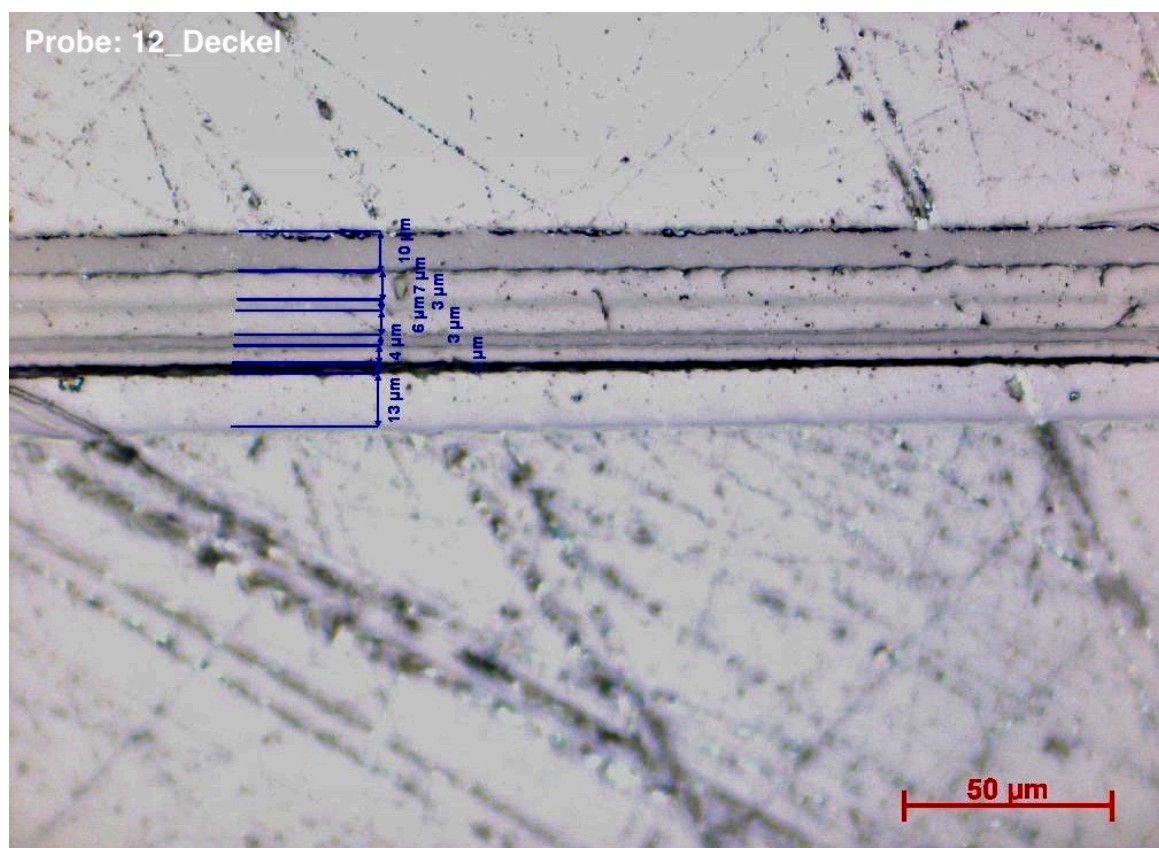


Abbildung 46: Mikroskopie-Aufnahme: Probe Nr. 12 Deckelfolie

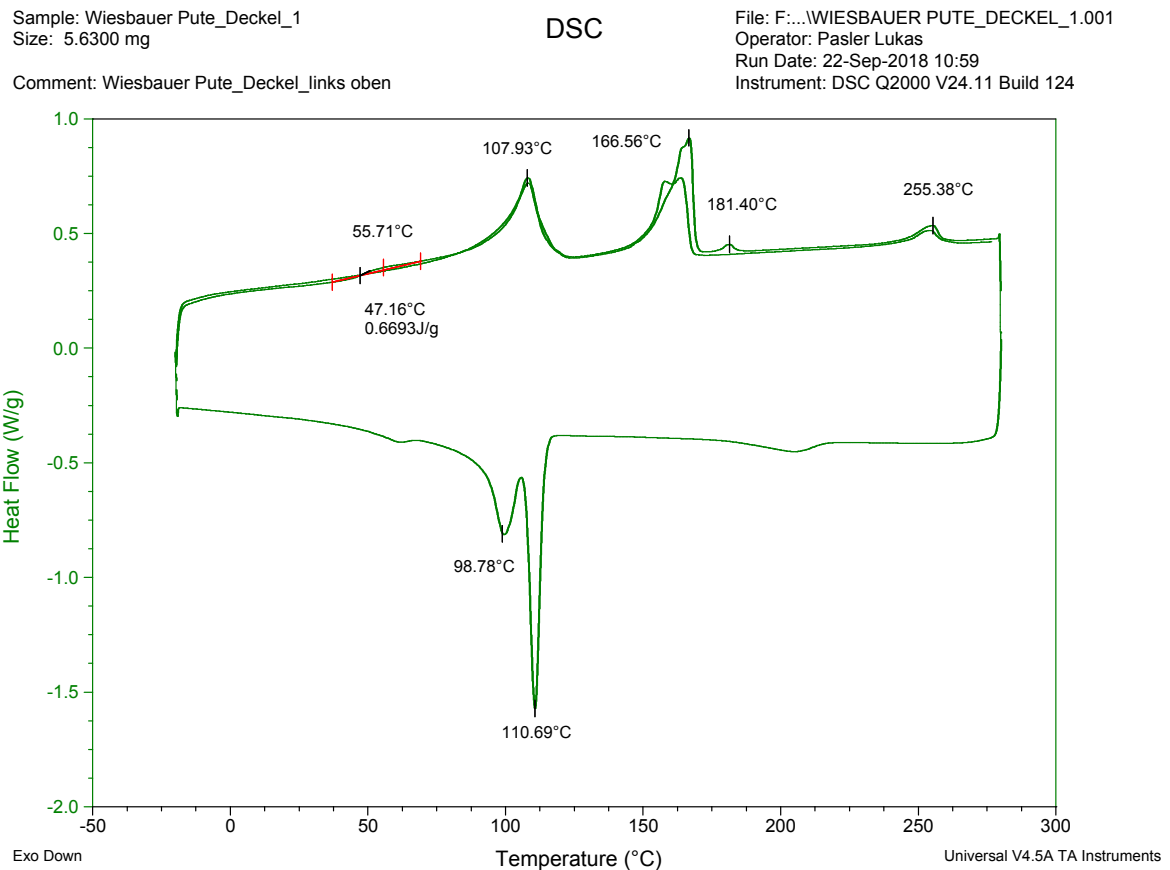


Abbildung 47: DSC-Kurve: Deckelfolie Probe Nr. 10

Die oben abgebildete DSC-Kurve zeigt, dass diese Deckelfolie – im Gegensatz zu den meisten anderen gemessenen Proben – den Kunststoff Polypropylen mit einer Kristallitschmelztemperatur von rund 167 °C beinhaltet. Auffallend ist hierbei einerseits, dass PE nur in der Form von LDPE eingesetzt wurde und andererseits der verhältnismäßig kleine Peak des amorphen PET bei der Kristallitschmelztemperatur von ca. 255 °C, was auf die geringe Schichtdicke von 16 μm zurückzuführen ist (s. Abbildung 48). Die zusätzliche Analyse der Probe mittels der FTIR-Methode sowie unter Berücksichtigung des theoretischen Hintergrundes bzgl. der haftvermittelnden Substanzen führte – hinsichtlich des schichtweisen Aufbaus der Probe – zu folgender Erkenntnis (von außen nach innen):

PET – KLEBER – PE – HV – EVOH – HV – PP – HV – PE

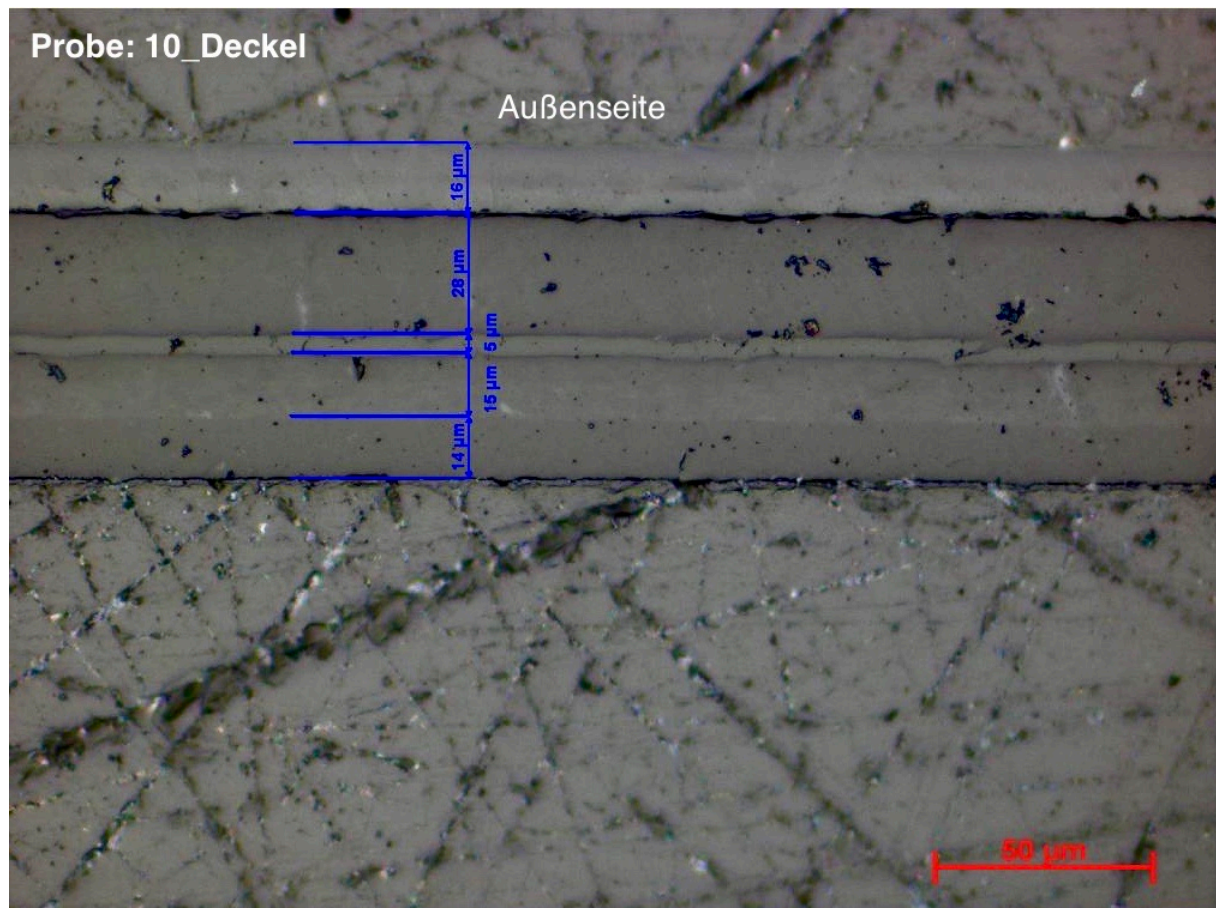


Abbildung 48: Mikroskopie-Aufnahme: Probe Nr. 10 Deckelfolie

7.2 DSC-Auswertung: Untertassen

Nachfolgende Abbildung 49 und Abbildung 50 zeigen Overlays jener analysierten Untertassenfolien, welche die gleichen Werkstoffe beinhalten wie die Mehrheit der zuvor erwähnten Deckelfolien (s. Abbildung 39 und Abbildung 40). Diese lauten wie folgt: PET, KLEBER, PE, EVOH und HV.

Diese Multilayer-Verpackungen weisen demnach folgende Übereinstimmungen auf:

- Glasübergang bei etwa 70 °C
- Schmelzpeak von PE bei ca. 110 °C
- Rekristallisationspeak bei Aufheiztemperatur von ca. 125 °C bedingt durch amorphes PET
- Schmelzpeak von EVOH bei ca. 180 °C

- Schmelzpeak von PET bei ca. 240 °C
- Kristallisationspeak von PET bei ca. 200 °C
- Kristallisationspeak von PE bei ca. 100 °C

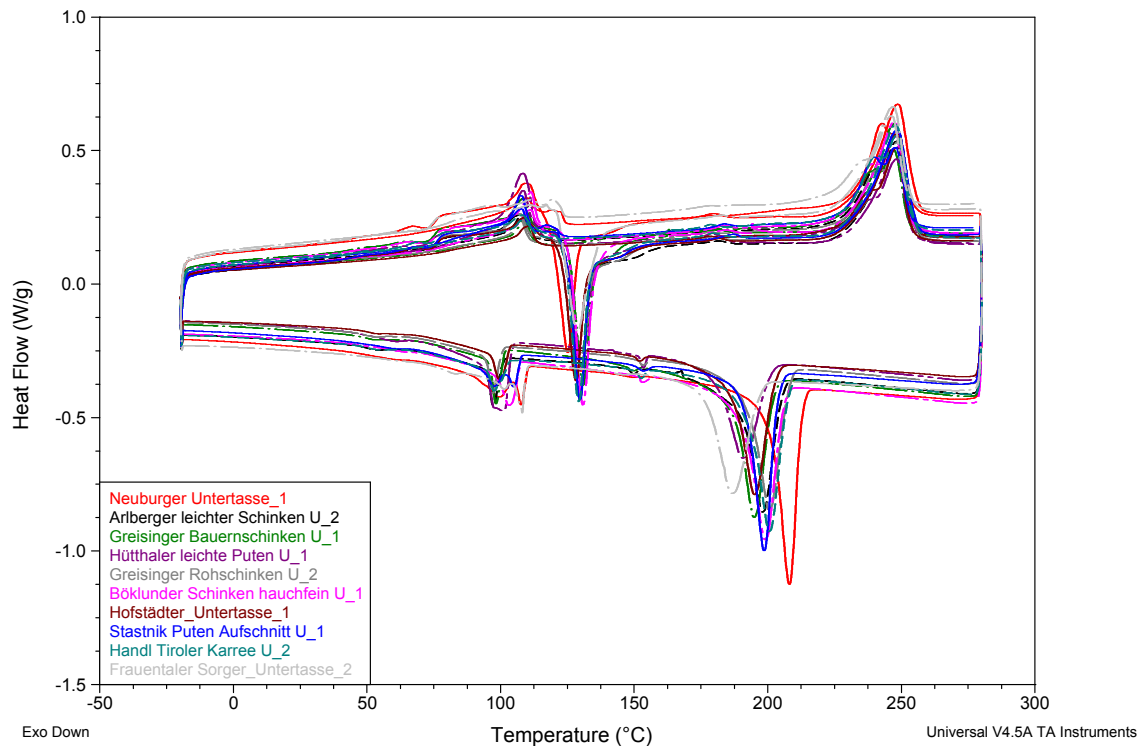


Abbildung 49: Overlay DSC-Kurven: Untertassenfolien

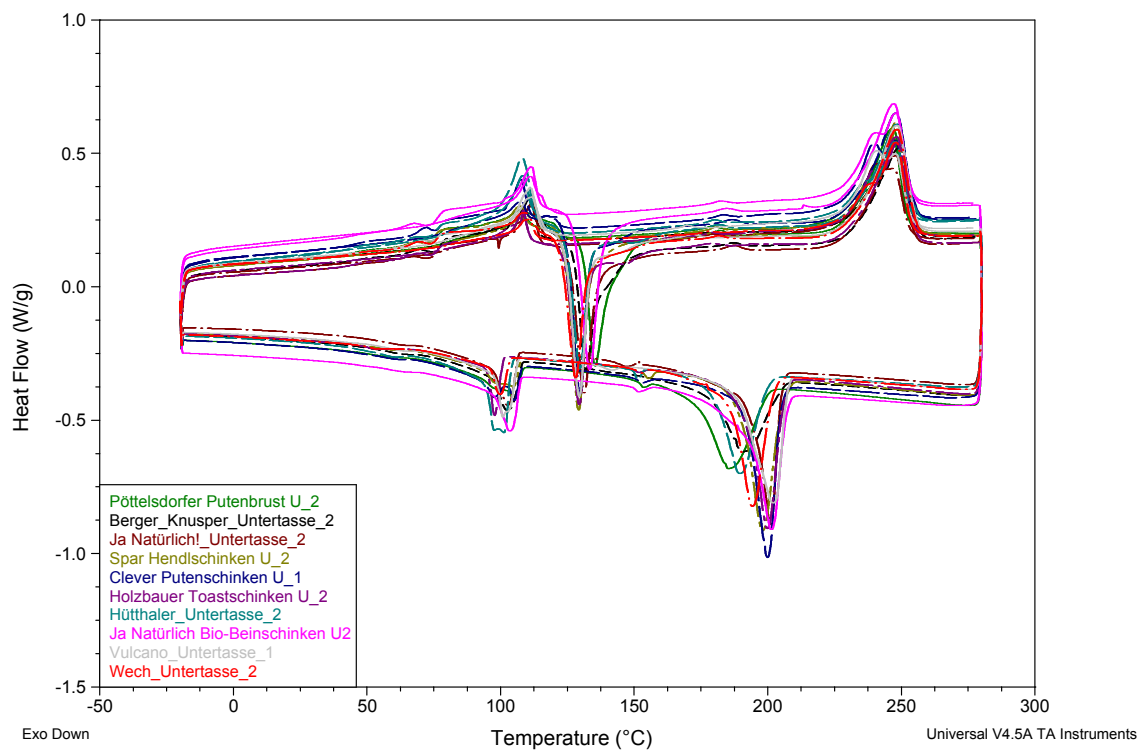


Abbildung 50: Overlay DSC-Kurven: Untertassenfolien

Die ausgeprägten Schmelzpeaks von PET bei der Temperatur von ca. 240 °C sind ein Indiz für den hohen Kristallinitätsgrad des eingesetzten Polymers. Wie bspw. nachfolgende Abbildung 51 zeigt, ist der hohe Materialanteil, der zu den Rekristallisationspeaks bei ca. 125 °C führt, in den Mikroskopie-Aufnahmen gut ersichtlich.

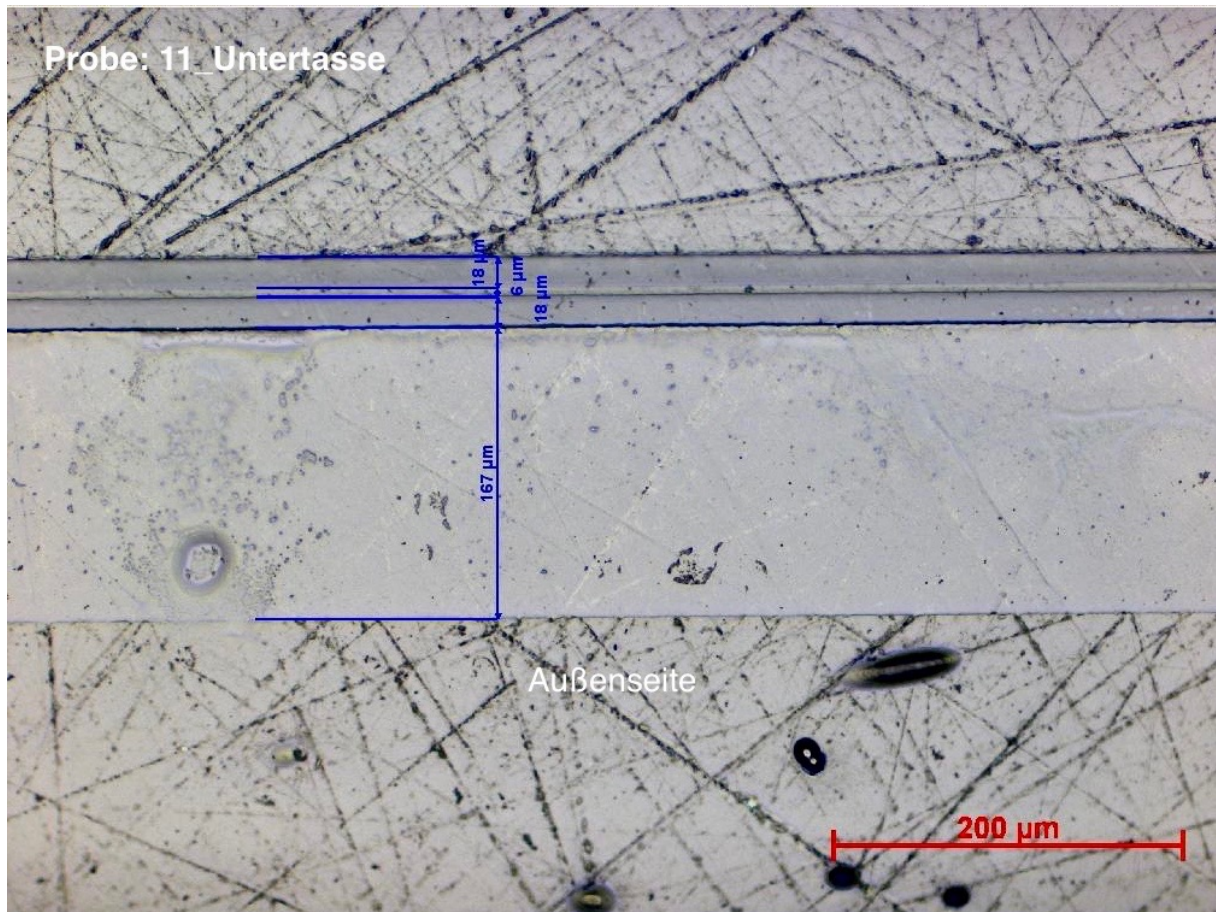


Abbildung 51: Mikroskopie-Aufnahme: Probe Nr. 11 Untertassenfolie

Abbildung 52 zeigt jene DSC-Kurven von Untertassen, bei welchen ein ausgeprägter Glasübergang des PET bei einer Temperatur von etwa 70 °C zu sehen ist.

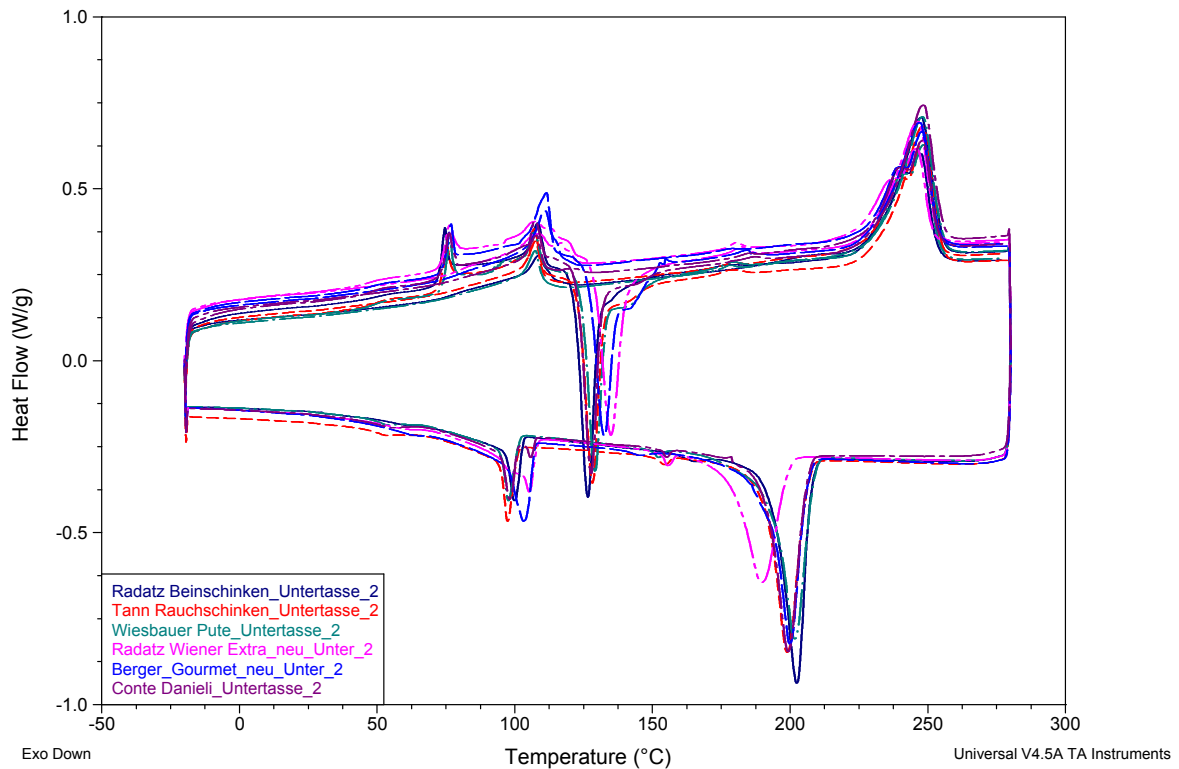


Abbildung 52: Overlay DSC-Kurven: Untertassenfolien

Trotz wiederholten Messungen konnte der EVOH-Anteil anhand der DSC-Kurven bei den folgenden 2 Proben (s. Abbildung 53) nicht bestimmt werden. Hierfür gibt es mehrere plausible Erklärungen:

- Überlagerung der endo-/exothermen Effekte
- geringer EVOH Anteil in Kombination mit kleiner Probengröße
- Probe möglicherweise nicht flach auf Tiegelboden aufgelegt

Die Gründe, weshalb von dem Einsatz des EVOH ausgegangen werden kann, liegen zum einen in der Sichtbarkeit der Schicht in den Mikroskopie-Aufnahmen, welche den gleichen Aufbau wie jene Untertassen desselben Wurstherstellers zeigen, und zum anderen in der Notwendigkeit dieses Polymers zwecks der guten Sperreigenschaften gegenüber Gasen und Aromen.

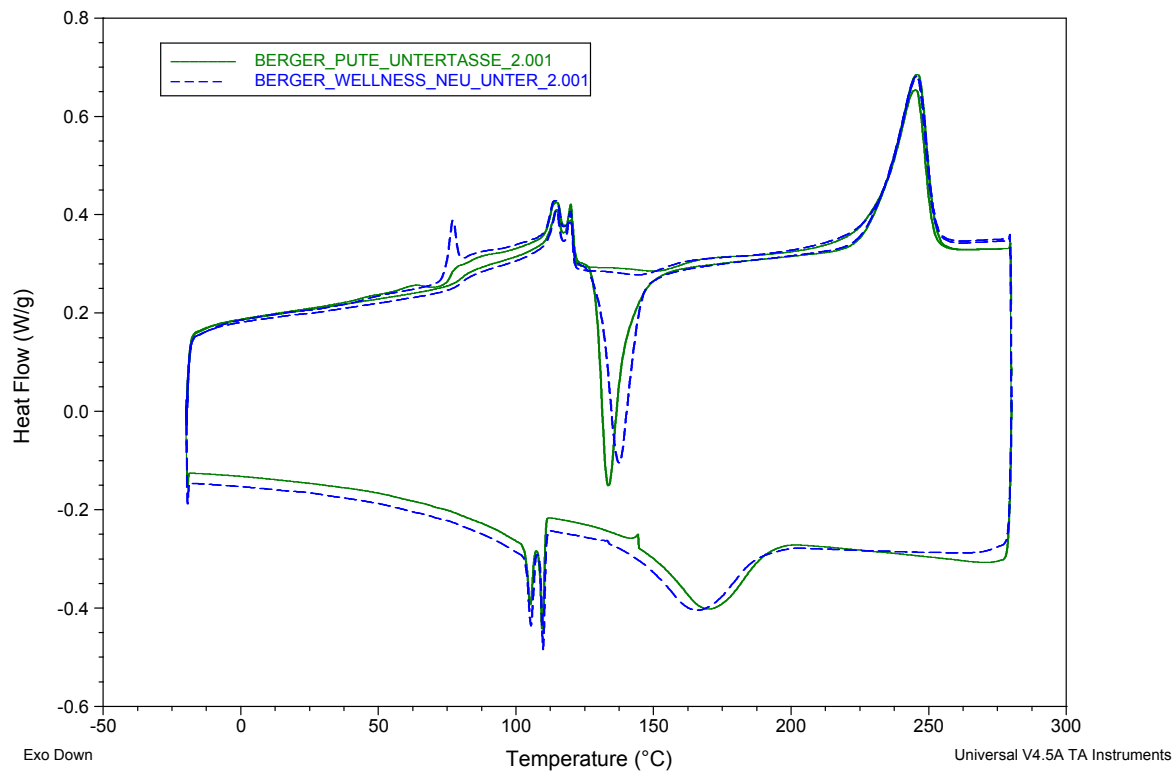


Abbildung 53: Overlay DSC-Kurven: Untertassenfolien

Bezugnehmend auf die Bestimmung des angewandten Herstellungsprozesses, zeigt Abbildung 54 die Mikroskopie-Aufnahme einer Probe, welche mit Hilfe des Verfahrens *Nass- oder Trockenkaschierung* hergestellt wurde. Hierbei ist die Kleberschicht mit einer Dicke von $8\ \mu\text{m}$ deutlich zu erkennen. Sie liegt zwischen der $234\ \mu\text{m}$ dicken PET-Folie und der aus PE/HV/EVOH/HV/PE bestehenden Verbundfolie.

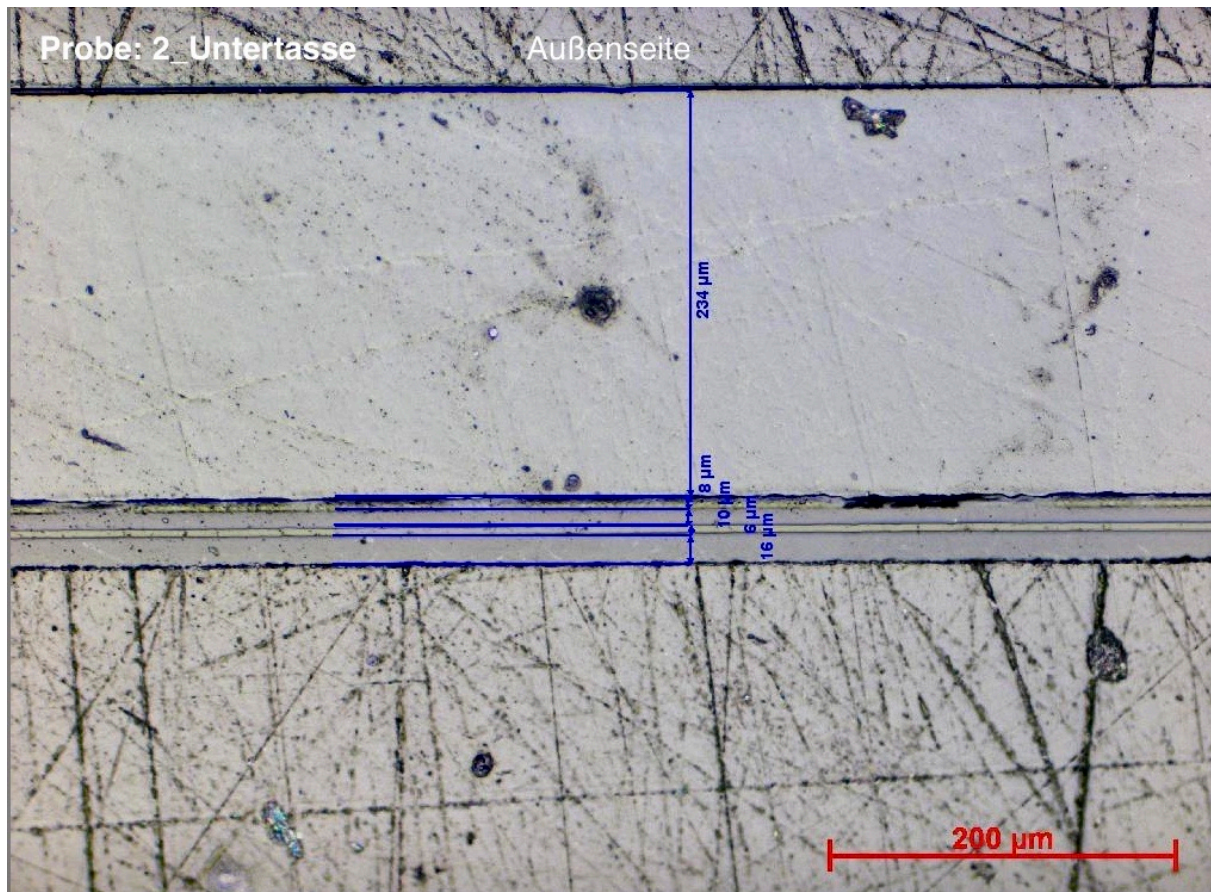


Abbildung 54: Bsp. Nass-/ Trockenkaschierung

In Abbildung 55 ist ein Beispiel für eine Probe, bei welchem das Herstellungsverfahren *Thermo-Kaschierung* eingesetzt wurde. Dabei wurde eine 190 μm dicke PET-Folie auf die bereits fertig vorgefertigte Verbundfolie – bestehend aus PE/HV/EVOH/HV/PE – unter Wärmeeinfluss kaschiert.

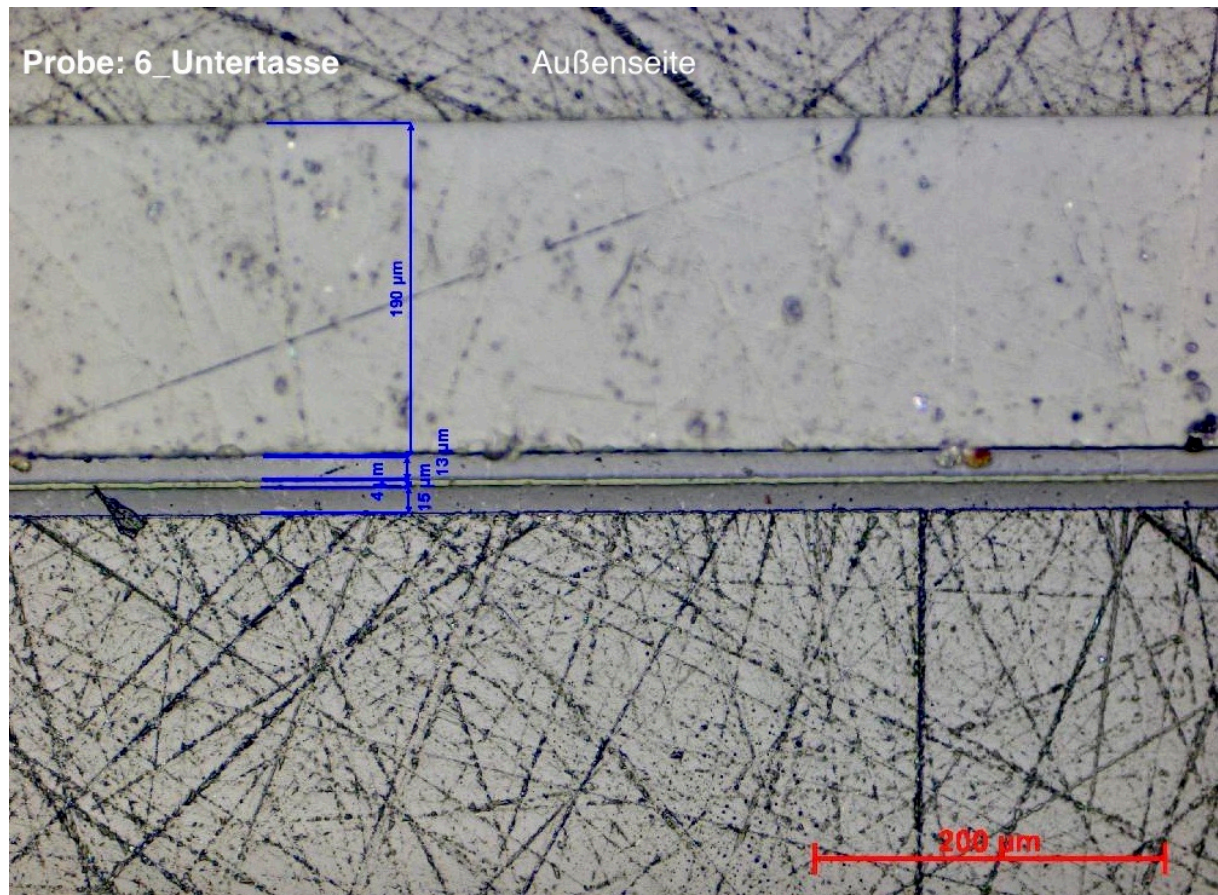


Abbildung 55: Bsp. Thermo-Kaschierung

Abbildung 56 zeigt die Analyse mit Hilfe eines Mikrotoms und somit einen weiteren Versuch, die Messergebnisse hinsichtlich ihrer Präzision zu optimieren.

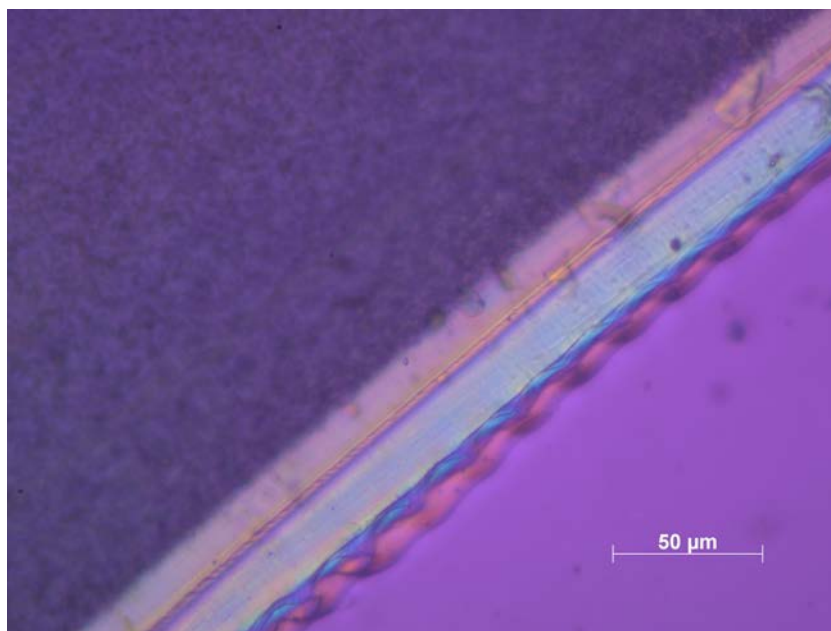


Abbildung 56: Probe Nr.1 Untertasse Mikrotomaufnahme

Wie in Abbildung 56 ersichtlich ist, verschlechterte sich dadurch das Ergebnis, woraufhin die ursprüngliche Methode der Proben-Einbettung in Harz beibehalten wurde.

7.3 FTIR-Auswertung

Die Auswertung der mittels FTIR ermittelten Messergebnisse führte zu der Erkenntnis, dass die Spektren der Innen- bzw. Außenseiten der untersuchten Folien eindeutig den jeweiligen Kunststoffen zugeordnet werden können. Zwischen den einzelnen Spektren sind teilweise leichte Nuancen sichtbar, wie bspw. folgende Abbildung 57 zeigt. Hierbei sind die Spektren von 4 unterschiedlichen Untertassen zu sehen, bei welchen die Innenschichten aus dem Polymer PE bestehen. Die Peaks des blau und rot gefärbten Graphen bei ca. 2350 cm^{-1} deuten auf die Existenz von CO_2 hin [42].

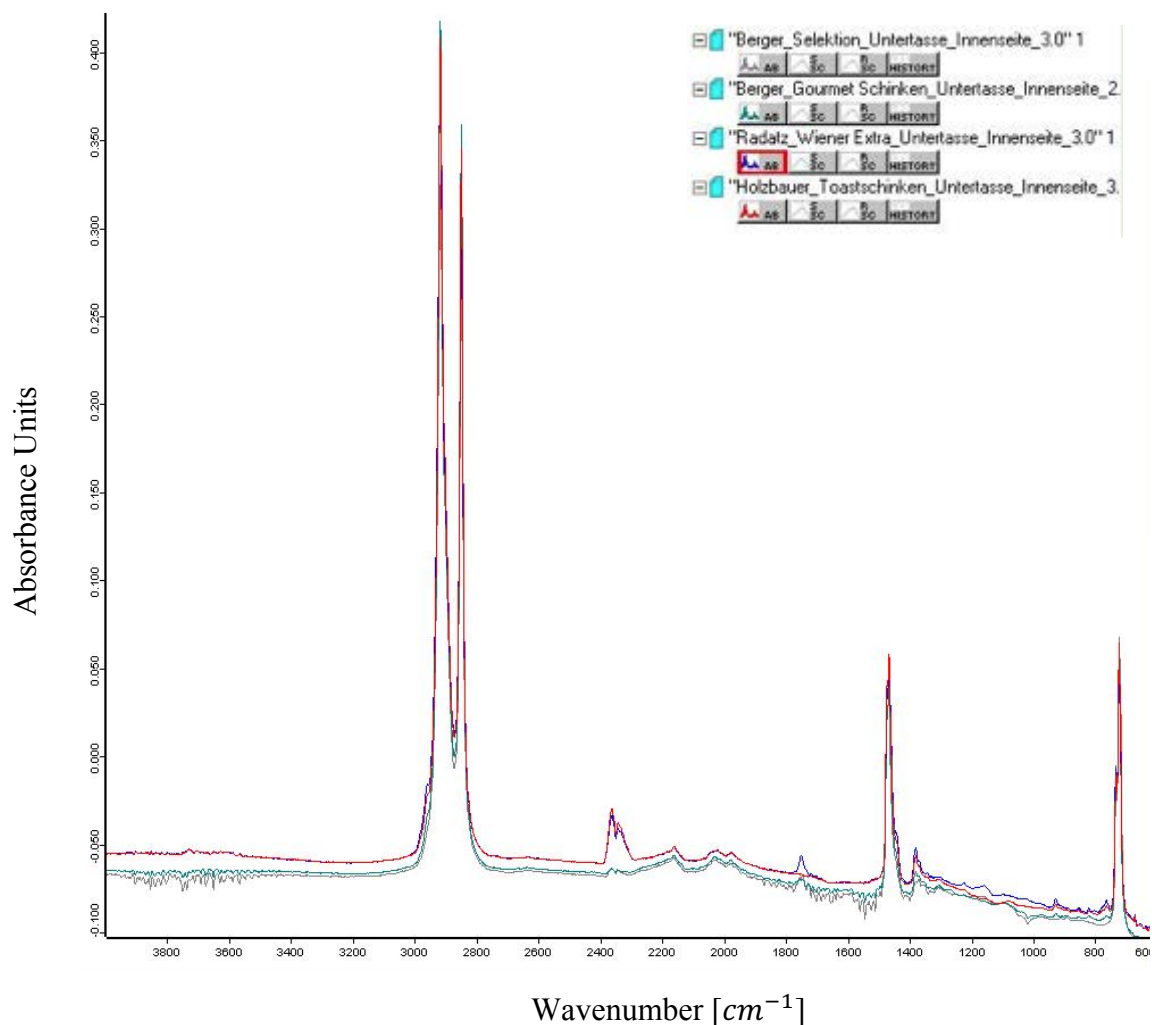


Abbildung 57: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 26, 27, 29, 30

In Abbildung 58 sind die Spektren der Außen- und Innenseite der Deckel- sowie Untertassenfolie einer Verpackung zu sehen. Dabei ist gut zu erkennen, dass für beide Verbundfolien die gleichen Kunststoffe verwendet wurden.

Die FTIR-Spektren der übrigen analysierten Folien befinden sich im Anhang dieser Arbeit, da die Spektren der eingesetzten Kunststoffe bereits ausführlich in Kapitel 6 behandelt wurden und diese keine Auffälligkeiten untereinander aufweisen.

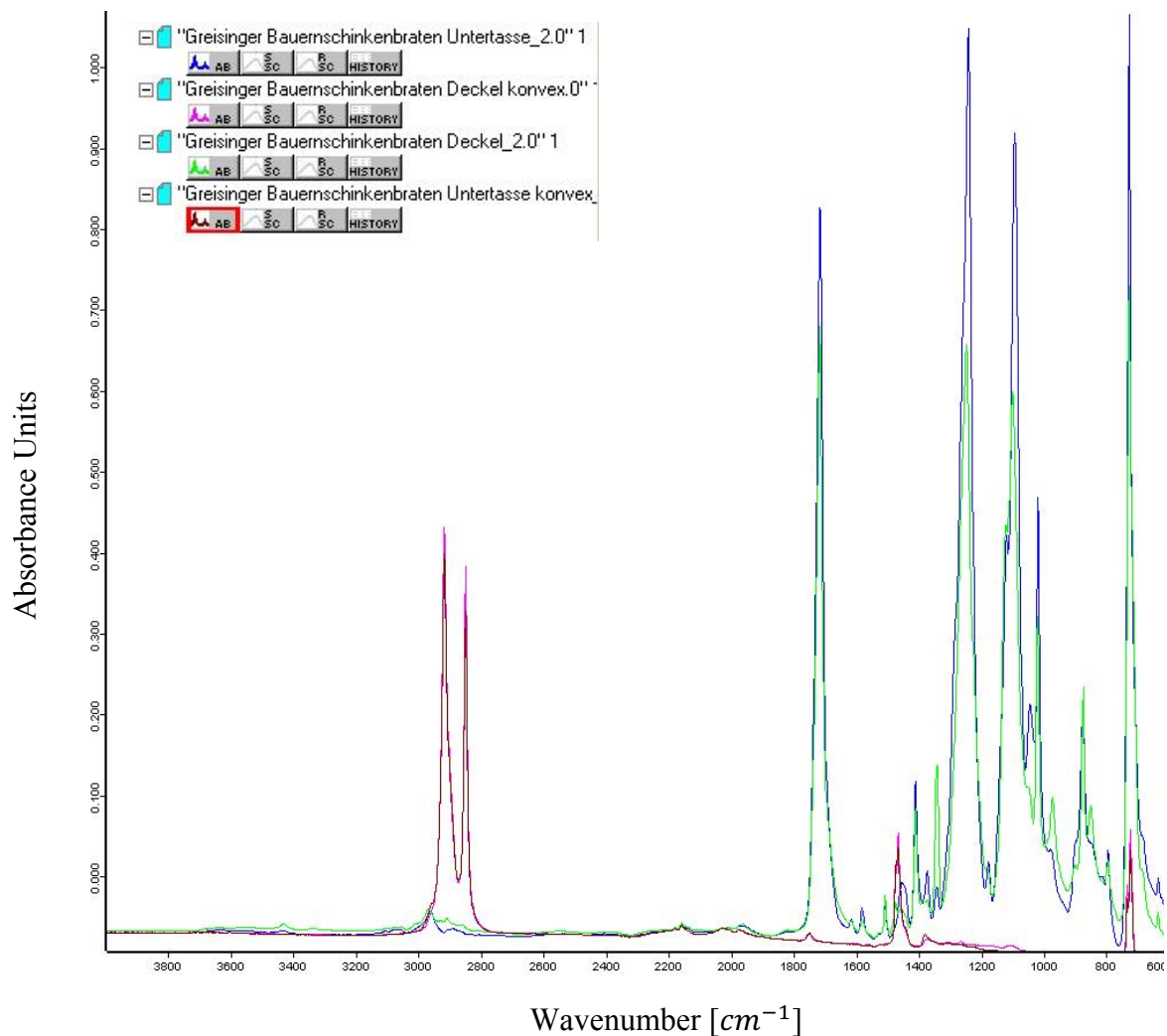


Abbildung 58: FTIR-Spektren: Probe Nr. 3

7.4 Auswertung: prozentueller Massengehalt

Bei der Bestimmung des prozentuellen Massengehalts jener Kunststoffe, welche für die Herstellung der untersuchten Deckel- bzw. Untertassenfolien verwendet wurden, bestand die

Schwierigkeit vorrangig in der exakten Probenentnahme. Aufgrund des geringen Gewichtes der Proben führte eine minimale Abweichung (im *mg*-Bereich) bei der Probenentnahme zu einer erheblichen Verfälschung der Ergebnisse. In Hinblick auf die gewölbten Untertassenfolien und den daraus resultierenden Messungenauigkeiten, wurde die Probengröße auf jeweils 3 cm^2 festgelegt.

Folgende Tabelle 18 zeigt bspw. die Berechnung der prozentuellen Massenanteile von Probe Nr. 3.

Tabelle 18: Beispielhafte %-Massengehalt-Berechnung Probe Nr. 3

Angaben:	Fläche	9 cm^2
	Gewicht Probe Untertasse	0,28 g
Berechnung PET Schicht	Dicke	0,0197 cm
	Volumen	0,1773 cm^3
	Dichte PET	1,37 g/cm^3
	PET Gewicht / Untertasse	0,242901 g
	Gewichtanteil in %	87%
Berechnung PE Schichten	Dicke	0,0026 cm
	Volumen	0,0234 cm^3
	Dichte PE	0,92 g/cm^3
	PE Gewicht / Untertasse	0,021528 g
	Gewichtanteil in %	8%
Berechnung EVOH Schicht	Dicke	0,0004 cm
	Volumen	0,0036 cm^3
	Dichte EVOH	1,16 g/cm^3
	EVOH Gewicht / Untertasse	0,004176 g
	Gewichtanteil in %	1%
KLEBER/HV/PRIMER Schicht(en)	Summe	0,268605 g
		0,011395 g
	Gewichtanteil in %	4%

In Anbetracht der – zum Teil strukturell ähnlich aufgebauten – Untertassen- bzw. Deckelfolien, können Gruppierungen vorgenommen werden (s. Tabelle 25 bis Tabelle 30 im Anhang). Folgende Tabelle 19 zeigt die – für die Berechnung der Volumenanteile der einzelnen Polymere – gemittelten Werte für die Dichte:

Tabelle 19: gemittelte Dichtewerte der untersuchten Kunststoffe

Werkstoff	Dichte [g/cm^3]	Quellenangabe
PE	0,92	[20]
EVOH	1,16	[36]
PET	1,37	[20]
PP	0,91	[16]
PA6/66	1,03	[20]

Nach der Summenbildung der Gewichtsanteile der einzelnen Polymere wurden diese vom Probengewicht subtrahiert, um dadurch den prozentuellen Massengehalt des/der verwendeten Kleber/HV/Primer Schicht(en) bestimmen zu können.

Die Untertassen können in 2 Gruppen eingeteilt werden, wobei sich die 2. Gruppe – bis auf 2 Ausnahmen – nur im Verzicht auf eine 2. PE-Schicht unterscheidet. Bei der Auswertung der prozentuellen Massengehalte der Gruppe I, welche 26 von 31 Proben beinhaltet, konnten folgende Mittelwerte festgestellt werden:

Tabelle 20: gemittelter Massengehalt: Gr.1_Untertassen

Polymer	gemittelter Massengehalt [%]
PET	84
PE	9
EVOH	2
KLEBER/HV/PRIMER	4

Nachdem die Auswertung von 3 Proben der 2. Untertassen-Gruppe nicht eindeutig bestimmt werden konnte, wurde für diese Gruppe – aufgrund des Mangels an Repräsentanz – kein Mittelwert gebildet.

Analog dazu zeigen Tabelle 21 bis Tabelle 24 die analysierten Werte der unterschiedlichen Gruppen der Deckel-Folien:

Tabelle 21: gemittelter Massengehalt: Gr.1 _ Deckel

Polymer	gemittelter Massengehalt [%]
PET	31
PE	54
EVOH	7
KLEBER/HV/PRIMER	7

Tabelle 22: gemittelter Massengehalt: Gr.2 _ Deckel

Polymer	gemittelter Massengehalt [%]
PP	33
PE	53
EVOH	9
KLEBER/HV/PRIMER	6

Tabelle 23: gemittelter Massengehalt: Gr.3 _ Deckel

Polymer	gemittelter Massengehalt [%]
PET	24
PE	32
EVOH	9
PA6/66	33
KLEBER/HV/PRIMER	2

Tabelle 24: gemittelter Massengehalt: Gr.4 _ Deckel

Polymer	gemittelter Massengehalt [%]
PET	25
PE	43
EVOH	7
PP	15
KLEBER/HV/PRIMER	10

Die Anzahl der Gruppen lässt bereits vermuten, dass sich das Recyceln der Deckelfolien schwieriger als bei den Untertassen gestalten könnte. Unter Voraussetzung der Implementierung eines präzisen Sortierungsprozesses, der die Prüfung der Außen- und Innenseiten der Deckelfolien zur Identifizierung des PP-Anteils in den Verpackungen bedingen würde, bestünde dennoch das Problem, dass die – aus PA6/66 bestehende – innenliegende Folie nicht erkannt werden würde. Die daraus resultierende Verunreinigung könnte im Recyclingprozess ein ernstzunehmendes Hindernis darstellen.

8. Zusammenfassung

Ziel dieser Diplomarbeit war es, die Replizierbarkeit von MAP Verpackungen zu ermöglichen, um eine fundierte Wissensgrundlage für den weiteren Recycling-Prozess zu schaffen. Demnach wurden in Summe 31 unterschiedliche Multilayer-Verpackungen von Wurstwaren analysiert, um eine möglichst – zumindest auf den Staat Österreich bezogene – repräsentative Aussage hinsichtlich der Bestandteile der Verpackungen und deren Recyclingfähigkeit tätigen zu können. Die Untersuchung beinhaltete sowohl die Bestimmung der – in den Verpackungen – eingesetzten Werkstoffe, als auch die Schichtdickenanalyse der einzelnen Folien im Verbund. Diese Erkenntnisse sollen in weiterer Folge zur Beantwortung der Frage dienen, ob die Oberfolien von den Unterfolien im Recycling-Prozess voneinander getrennt werden müssen oder nicht.

Nach dem gescheiterten Versuch, Datenblätter bzw. Informationen über den Aufbau und Herstellungsprozess der Verpackungen von den entsprechenden Unternehmen zu bekommen, bestand der erste Schritt in der Bestimmung der einzelnen Bestandteile der Verbundfolien mit Hilfe der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC). Unter Zuhilfenahme des Fourier-Transform-Infrarotspektrometers (FTIR) konnte eindeutig festgestellt werden, aus welchen Kunststoffen die Außen- und Innenschichten der Multilayer-Verpackungen bestehen. Diese Zusatzinformation erleichterte die Auswertung der weiterführenden mikroskopischen Analysearbeit im Hinblick auf die Untersuchung des strukturellen Verpackungsaufbaus.

Die Schwierigkeit der mikroskopischen Analyse bestand in der geeigneten Wahl der Einbettvorrichtung und Präparation der Proben. Die Tatsache, dass die Folien teilweise sehr dünn und gebogen waren, erschwerten nicht nur die Handhabung dieser, sondern auch die Vermeidung von etwaigen Blasenbildungen, Verbiegungen oder Aufschwimmen der Proben.

Eine weitere Herausforderung stellte die Wahl eines geeigneten Schleif- bzw. Polierprogramms dar, um die Analyse der einzelnen Schichten bestmöglich gestalten zu können. Trotz sorgfältiger Bearbeitung gelang es nicht bei allen Proben, Beschädigungen der einzelnen Folien zu vermeiden, woraufhin eine eindeutige Bestimmung der Schichtdicken nicht möglich war.

Bei der Auswertung der Messergebnisse fiel auf, dass die haftvermittelnden Schichten bei dem Großteil der untersuchten Verpackungen nicht sichtbar waren. Diese konnten nur mit Hilfe der Erkenntnisse aus einer umfangreichen Literaturrecherche festgestellt werden. Die Suche nach plausiblen Definitionen für die – bei der Herstellung von Multilayer-Verpackungen verwendeten – Kleber, Primer oder Haftvermittler erwies sich als relativ schwierige Angelegenheit, da die Definitionen in der Literatur teilweise sehr stark voneinander abweichen. Eine mögliche Ursache für deren Diskrepanz könnte in der ungenauen Übersetzung vom Englischen ins Deutsche liegen. Der englische Begriff „adhesive“ wurde bspw. häufig als Klebeschicht übersetzt, ohne dabei eine Unterscheidung zwischen Haftvermittlern oder Klebern vorzunehmen. Eine ähnliche Problematik ergab sich bei der Suche nach einer ordnungsgemäßen Definition der unterschiedlichen Herstellungsverfahren. Als Beispiel sei an dieser Stelle die ungenaue Übersetzung des Wortes „laminate“ angeführt, das teilweise mit den Begriffen kaschieren, laminieren oder beschichten gleichgesetzt wurde. Aufgrund der Kombination an Messmethoden und dem Hinweis eines – in der Verpackungsindustrie tätigen – Experten konnte das jeweils angewandte Herstellungsverfahren zumindest bei einem Großteil an Untertassenfolien eindeutig repliziert werden.

Abgesehen von kleinen Komplikationen, wie etwa die Verwendung eines zu groben Schleifpapiers bei der Probenpräparation oder das Aufschwimmen einer Folie beim Einbettvorgang, konnten nach Beseitigung der besagten Unklarheiten und Durchführung der bereits erwähnten Messmethoden, in Summe möglichst eindeutige Aussagen über die Zusammensetzung der Lebensmittelverpackungen getroffen werden. Des Weiteren konnte die Plausibilität korrekter Messvorgänge durch den Vergleich zwischen den – aus der Literaturrecherche hervorgegangen – Erkenntnissen über den grundsätzlichen Aufbau von Verbundfolien mit den eruierten Messergebnissen bestätigt werden.

Nachdem im weiteren Schritt die Schichtdicken, die Abmessungen sowie das Gewicht der einzelnen Folien bestimmt wurden, konnten Rückschlüsse auf die Massenanteile der verwendeten Werkstoffe innerhalb der jeweiligen Multilayer-Folie geschlossen werden, was

in weiterer Folge zur Beantwortung der Frage, welche Compatibilizer für das Recycling eingesetzt werden könnten, diene. Diese Thematik ist insofern relevant, da die Recyclingfähigkeit insbesondere von den verwendeten Klebeschichten zwischen den einzelnen Folien abhängig ist. In Anbetracht der ermittelten Messergebnisse konnten die Untertassen und Deckel in 2 bzw. 4 Gruppierungen, welche jeweils hinsichtlich der Werkstoff- und Schichtdickenauswahl einen vergleichbaren Aufbau aufweisen, gegliedert werden. Da bei 27 von insgesamt 31 untersuchten Untertassen eindeutige Übereinstimmungen erkennbar sind und diese auch keine – möglicherweise störenden – Tinten beinhalten, erscheint ein Recyclingprozess durchaus realisierbar zu sein. Bei den Deckelfolien haben 21 von 31 Proben Ähnlichkeiten miteinander und die restlichen lassen sich in weitere 3 Gruppen gliedern. Grundsätzlich wäre es zwar denkbar, dass man dieser Problematik der Diversität mit einer präzisen Sortierung entgegenwirkt, allerdings bestünde bei der – auf die äußeren Schichten begrenzte – Prüfung der Proben das Problem, dass bspw. die innenliegende PA6/66 Schicht nicht identifiziert werden könnte, was zu erheblichen Verunreinigungen der Regranulate führen könnte. Demzufolge scheint eine Trennung zwischen den Deckel- und Untertassenfolien unvermeidbar zu sein.

Nachdem es allerdings bis dato nur möglich ist, einige wenige Kunststoffe in ausreichender Reinheit voneinander zu trennen, scheint ein effizientes Recycling der untersuchten Proben nach dem aktuellen Stand der Technik noch nicht realisierbar zu sein. Ein möglicher Ansatz könnte der Einsatz von recyclingfähigen haftvermittelnden Schichten sein, welche im Rahmen des Recyclingprozesses nicht nur die Trennung der einzelnen Folien voneinander erlauben, sondern auch durch entsprechende Lösungsmittel zersetzbar wären. Diese Thematik birgt jedoch insofern eine weitere Schwierigkeit, als zum aktuellen Zeitpunkt noch kaum Literatur hierfür besteht. Anstatt der – im Rahmen der von der österreichischen Regierung initiierten – Reform 2020, welche den Verkauf bzw. das Anbieten von Plastiktüten im österreichischen Handel verbietet, könnte eine weitere Strategie die Einführung einer gesetzlichen Vorschrift beinhalten, welche die möglichen Werkstoffkombinationen innerhalb einer Verpackung vorschreibt. Ein weiteres Problem, dem möglicherweise entgegengewirkt werden müsste, könnte die Verwendung von – hpts. für Werbezwecke an den Folien aufgebracht – Tinten darstellen, welche in dieser Arbeit nicht thematisiert wurden.

Um die Effizienz und Effektivität von Recycling-Prozessen steigern zu können, hat das Unternehmen Danapak Flexibles – in Anlehnung an das mit 01.01.2019 in Kraft getretene Verpackungsgesetz – eine ausschließlich aus PET bestehende Verpackung für Joghurts,

Süßwaren und Feinkost entwickelt. Somit kann auf die Trennung der einzelnen Bestandteile einer Joghurtverpackung, die sich in den meisten Fällen aus einem – aus mehreren unterschiedlichen Kunststoffen – bestehenden Becher, einer bedruckten Kartonummantelung und einem Aluminiumdeckel zusammensetzt, verzichtet werden [7].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit Hilfe der – im Rahmen dieser Arbeit – verwendeten Messverfahren eine umfangreiche und präzise Analyse von Multilayer-Verpackungen verschiedenster Zusammensetzung möglich ist. Bemerkenswert ist, dass durch die Kombination von verschiedenen Polymeren einzigartige Eigenschaften erzielt werden können. Eine Beantwortung der Frage nach der optimalen Strategie des Recyclingverfahrens kann – aufgrund des Mangels an wissenschaftlichem Fortschritt auf diesem Themengebiet zu diesem Zeitpunkt – nicht mit gänzlicher Gewissheit erfolgen. Dennoch bestätigte sich mein Vorhaben, eine verlässliche Wissensgrundlage bzgl. Multilayer-Verpackungen zu schaffen, um so den weiterführenden Recycling-Prozess bestmöglich realisieren zu können.

Anhang

Tabelle 25: Auswertung Deckelfolien_I

Nr.	Bezeichnung	1. Schicht	Dicke [µm]	2. Schicht	Dicke [µm]	3. Schicht	Dicke [µm]	4. Schicht	Dicke [µm]	5. Schicht	Dicke [µm]	6. Schicht	Dicke [µm]	7. Schicht	Dicke [µm]	Gewicht 3 x 3 [cm ²]
1	NEUBURGER DECKEL_2.001	It. DSC: PET, EVOH und PE														0,11
2	ARLBERGER LEICHTER SCHINKEN D_1.001	PET	25	KLEBER	2	PE	21	HV ?		EVOH	4	HV ?		PE	21	0,08
3	GREISINGER BAUERNSCHINKEN D_2.001	PET	17	KLEBER ?		PE	27	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	28	0,08
5	GREISINGER ROHSCHINKEN D_1.001	PET	16	KLEBER ?		PE	25	HV ?		EVOH	6	HV ?		PE	30	0,08
6	BöKLUNDER SCHINKEN HAUCHFEIN D_1.001	PET	16	KLEBER ?		PE	24	HV ?		EVOH	3	HV ?		PE	20	0,06
7	RADATZ BEINSCHINKEN_DECKEL	It. DSC: PE, EVOH, PET														0,07
9	MESSNER D_1.001	PET	15	KLEBER ?		PE	29	HV	4	EVOH	4	HV	4	PE	34	0,08
12	HANDL TIROLER KARREE D_1.001	It. DSC: PE, EVOH, PA und PET														0,05
13	FRAUENTALER SORGER_DECKEL_1.001	It. DSC: PE, EVOH und PET														0,06
14	HOFSTÄDTER_DECKEL_1.001	PET	12	KLEBER	4	PE	27	HV ?		EVOH	6	HV ?		PE	27	0,07
17	BERGER_KNUSPER_DECKEL_1.001	PET	27	KLEBER	3	PE	14	HV	5	EVOH	3	HV	4	PE	21	0,07
18	JA NATÜRLICH!_DECKEL_2.001	PET	17	KLEBER ?		PE	23	HV ?		EVOH	6	HV ?		PE	26	0,07
19	CLEVER PUTENSCHINKEN D_1.001	PET	15	KLEBER ?		PE	24	HV ?		EVOH	6	HV ?		PE	24	0,07
20	HÜTTHALER_DECKEL_2.001	It. DSC: PE, EVOH, PA und PET														0,01
21	BERGER_PUTE_DECKEL_2.001	PET	27	KLEBER	3	PE	14	HV	4	EVOH	5	HV	4	PE	31	0,08
24	JA NATÜRLICH BIO-BEINSCHINKEN D1.001	PET	16	KLEBER ?		PE	25	HV ?		EVOH	6	HV ?		PE	26	0,07
25	ABRAHAM SCHWARZWÄLDLER D_1.001	PET	16	KLEBER ?		PE	24	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	25	0,07
28	BERGER_WELLNESS_DECKEL	PET	28	KLEBER ?		PE	21	HV	4	EVOH	5	HV	4	PE	31	0,09
29	BERGER_GOURMET_DECKEL	PET	26	KLEBER	3	PE	22	HV ?		EVOH	7	HV ?		PE	25	0,09
30	BERGER_SELEKTION_DECKEL	PET	27	KLEBER ?		PE	21	HV	5	EVOH	5	HV	5	PE	31	0,09
31	CONTE DANIELI_DECKEL	PET	14	KLEBER	2	PE	32	HV ?		EVOH	6	HV ?		PE	33	0,08

Tabelle 26: Auswertung Deckelfolien_II

Nr.	Bezeichnung	1. Schicht	Dicke [µm]	2. Schicht	Dicke [µm]	3. Schicht	Dicke [µm]	4. Schicht	Dicke [µm]	5. Schicht	Dicke [µm]	6. Schicht	Dicke [µm]	7. Schicht	Dicke [µm]	Gewicht 3 x 3 [cm ²]
15	PÖTTELSDORFER PUTENBRUST D_1.001	PP	25	HV ?		PE	17	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	19	0,06
16	SPAR HENDLSCHINKEN D_1.001	PP	22	HV	3	PE	20	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	23	0,06
22	WECH_DECKEL_1.001	PP	22	HV	2	PE	14	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	22	0,06
23	VULCANO_DECKEL_1.001	PP	22	HV	3	PE	22	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	23	0,06

Tabelle 27: Auswertung Deckelfolien_III

Nr.	Bezeichnung	1. Schicht	Dicke [µm]	2. Schicht	Dicke [µm]	3. Schicht	Dicke [µm]	4. Schicht	Dicke [µm]	5. Schicht	Dicke [µm]	6. Schicht	Dicke [µm]	7. Schicht	Dicke [µm]	8. Schicht	Dicke [µm]	9. Schicht	Dicke [µm]	Gewicht 3 x 3 [cm²]
4	HÜTTHALER LEICHTE PUTEN D_1.001	PET	16	KLEBER ?		PE	25	HV ?		PA6/66	3	EVOH	8	PA6/66	3	HV ?		PE	31	0,08
8	TANN RAUCHSCHINKEN_DECKEL	PET	12	KLEBER	4	PE	25	HV ?		PA6/66	3	EVOH	4	PA6/66	3	HV ?		PE	27	0,08
11	STASTNIK PUTEN AUFSCHNITT D_1.001	PET	14	KLEBER ?		PE	23	HV ?		PA6/66	3	EVOH	8	PA6/66	3	HV ?		PE	27	0,07
26	HOLZBAUER TOASTSCHINKEN D_1.001	PET	14	KLEBER ?		PE	34	HV ?		PA6/66		4 EVOH	4	PA6/66	4	HV ?		PE	31	0,08
27	RADATZ WIENER EXTRA_DECKEL	lt. DSC: PE, EVOH, PA6/66 und PET																		

Tabelle 28: Auswertung Deckelfolien_IV

Nr.	Bezeichnung	1. Schicht	Dicke [µm]	2. Schicht	Dicke [µm]	3. Schicht	Dicke [µm]	4. Schicht	Dicke [µm]	5. Schicht	Dicke [µm]	6. Schicht	Dicke [µm]	7. Schicht	Dicke [µm]	8. Schicht	Dicke [µm]	9. Schicht	Dicke [µm]	Gewicht 3 x 3 [cm²]
10	WIESBAUER PUTEN_DECKEL	PET	16	KLEBER ?		PE	28	HV ?		EVOH	5	HV ?		PP	15	HV ?		PE	14	0,08

Tabelle 29: Auswertung Untertassenfolien_I

Nr.	Bezeichnung	1. Schicht	Dicke [µm]	2. Schicht	Dicke [µm]	3. Schicht	Dicke [µm]	4. Schicht	Dicke [µm]	5. Schicht	Dicke [µm]	6. Schicht	Dicke [µm]	7. Schicht	Dicke [µm]	Gewicht 3 x 3 [cm ²]
2	ARLBERGER LEICHTER SCHINKEN U_2.001	PET	234	KLEBER	8	PE	10	HV ?		EVOH	6	HV ?		PE	16	0,32
3	GREISINGER BAUERNSCHINKEN U_1.001	PET	197	KLEBER	7	PE	10	HV ?		EVOH	4	HV ?		PE	16	0,28
5	GREISINGER ROHSCHINKEN U_2.001	PET	215	KLEBER	6	PE	11	HV?		EVOH	4	HV?		PE	18	0,28
6	BöKLUNDER SCHINKEN HAUCHFEIN U_1.001	PET	190	KLEBER ?		PE	13	HV ?		EVOH	4	HV ?		PE	15	0,29
7	RADATZ BEINSCHINKEN_UNTERTASSE	PET	280	KLEBER ?		PE	13	HV	4	EVOH	6	HV	4	PE	25	0,42
8	TANN RAUCHSCHINKEN_UNTERTASSE	PET	200	KLEBER	8	PE	12	HV ?		EVOH	6	HV ?		PE	20	0,28
10	WIESBAUER PUTEN_UNTERTASSE	PET	181	KLEBER	8	PE	11	HV ?		EVOH	4	HV ?		PE	16	0,26
11	STASTNIK PUTEN AUFSCHNITT U_1.001	PET	167	KLEBER ?		PE	18	HV ?		EVOH	6	HV ?		PE	18	0,25
12	HANDL TIROLER KARREE U_2.001	PET	215	KLEBER	5	PE	10	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	14	0,31
13	FRAUENTALER SORGER_UNTERTASSE_2.001	lt. DSC: PE, EVOH und PET														0,26
14	HOFSTÄDTER_UNTERTASSE_1.001	PET	227	KLEBER	3	PE	15	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	16	0,32
15	PöTTELSDORFER PUTENBRUST U_2.001	PET	188	KLEBER ?		PE	16	HV ?		EVOH	6	HV ?		PE	21	0,28
16	SPAR HENDLSCHINKEN U_2.001	PET	194	KLEBER ?		PE	15	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	20	0,28
17	BERGER_KNUSPER_UNTERTASSE_2.001	PET	175	KLEBER ?		PE	20	HV ?		EVOH	6	HV ?		PE	21	0,26
18	JA NATÜRLICH!_UNTERTASSE_1.001	PET	141	KLEBER ?		PE	14	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	16	0,24
19	CLEVER PUTENSCHINKEN U_1.001	PET	154	KLEBER ?	3	PE	16	HV ?		EVOH	4	HV ?		PE	17	0,23
20	HÜTTHALER_UNTERTASSE_2.001	PET	175	KLEBER ?		PE	43	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	19	0,27
21	BERGER_PUTE_UNTERTASSE_1.001	PET	170	KLEBER ?		PE	14	HV ?		EVOH	10	HV ?		PE	11	0,25
22	WECH_UNTERTASSE_2.001	PET	222	KLEBER	3	PE	17	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	16	0,31
23	VULCANO_UNTERTASSE_1.001	PET	147	KLEBER ?		PE	12	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	18	0,23
24	JA NATÜRLICH BIO-BEINSCHINKEN U1.001	PET	175	KLEBER ?		PE	20	HV ?		EVOH	5	HV ?		PE	20	0,26
26	HOLZBAUER TOASTSCHINKEN U_2.001	PET	199	KLEBER	8	PE	12	HV ?		EVOH	6	HV ?		PE	20	0,28
27	RADATZ WIENER EXTRA_UNTERTASSE	PET	165	KLEBER ?		PE	13	HV	3	EVOH	4	HV	3	PE	19	0,24
28	BERGER_WELLNESS_UNTERTASSE	PET	202	KLEBER ?		PE	19	HV ?		EVOH ?	12	HV ?		PE	16	0,26
29	BERGER_GOURMET_UNTERTASSE	PET	193	KLEBER ?		PE	18	HV ?		EVOH	4	HV ?		PE	21	0,28
30	BERGER_SELEKTION_UNTERTASSE	PET	230	KLEBER ?		PE	16	HV	5	EVOH ?	9	HV ?		PE	20	0,34
31	CONTE DANIELI_UNTERTASSE	PET	172	KLEBER	6	PE	12	HV	3	EVOH	12	HV ?		PE	11	0,25

Tabelle 30: Auswertung Untertassenfolien_II

Nr.	Bezeichnung	1. Schicht	Dicke [µm]	2. Schicht	Dicke [µm]	3. Schicht	Dicke [µm]	4. Schicht	Dicke [µm]	5. Schicht	Dicke [µm]	6. Schicht	Dicke [µm]	Gewicht 3 x 3 [cm ²]
1	NEUBURGER UNTERTASSE_1.001	lt. DSC: PET, EVOH und PE												0,33
4	HÜTTHALER LEICHTE PUTEN U_1.001	PET	39	EVOH	5	HV ?		PE	39					0,25
9	MESSNER U_1.001	PP	170	PE	46	HV ?		EVOH	6	HV ?		PE	19	0,27
25	ABRAHAM SCHWARZWÄLDER U_1.001	PET	208	KLEBER ?		PE	36	HV ?						0,29

Bei jenen Proben deren Bezeichnungen für die Schichten mit einem „?“ gekennzeichnet sind, konnten mikroskopisch keine Schichten identifiziert werden, allerdings ist deren Existenz in Anbetracht der Literaturrecherche gewiss.

Zusammenfassend konnten die Schichtdicken bei folgenden Proben aufgrund der undeutlichen Abgrenzung zwischen den einzelnen Schichten nicht ermittelt werden:

Tabelle 31: Proben ohne Schichtdickenbestimmung

Nr.	Bezeichnung	1. Schicht	Dicke [μm]	2. Schicht	Dicke [μm]	3. Schicht	Dicke [μm]	4. Schicht	Dicke [μm]	5. Schicht	Dicke [μm]	6. Schicht	Dicke [μm]	7. Schicht	Dicke [μm]	Gewicht 3 x 3 [cm^2]
1	NEUBURGER DECKEL_2.001	lt. DSC: PET, EVOH und PE														0,11
7	RADATZ BEINSCHINKEN_DECKEL	lt. DSC: PE, EVOH, PET														0,07
12	HANDL TIROLER KARREE D_1.001	lt. DSC: PE, EVOH, PA und PET														0,05
13	FRAUENTALER SORGER_DECKEL_1.001	lt. DSC: PE, EVOH und PET														0,06
20	HÜTTHALER_DECKEL_2.001	lt. DSC: PE, EVOH, PA und PET														0,01
27	RADATZ WIENER EXTRA_DECKEL	lt. DSC: PE, EVOH, PA6/66 und PET														0,04
1	NEUBURGER UNTERTASSE_1.001	lt. DSC: PET, EVOH und PE														0,33
13	FRAUENTALER SORGER_UNTERTASSE_2.001	lt. DSC: PE, EVOH und PET														0,26

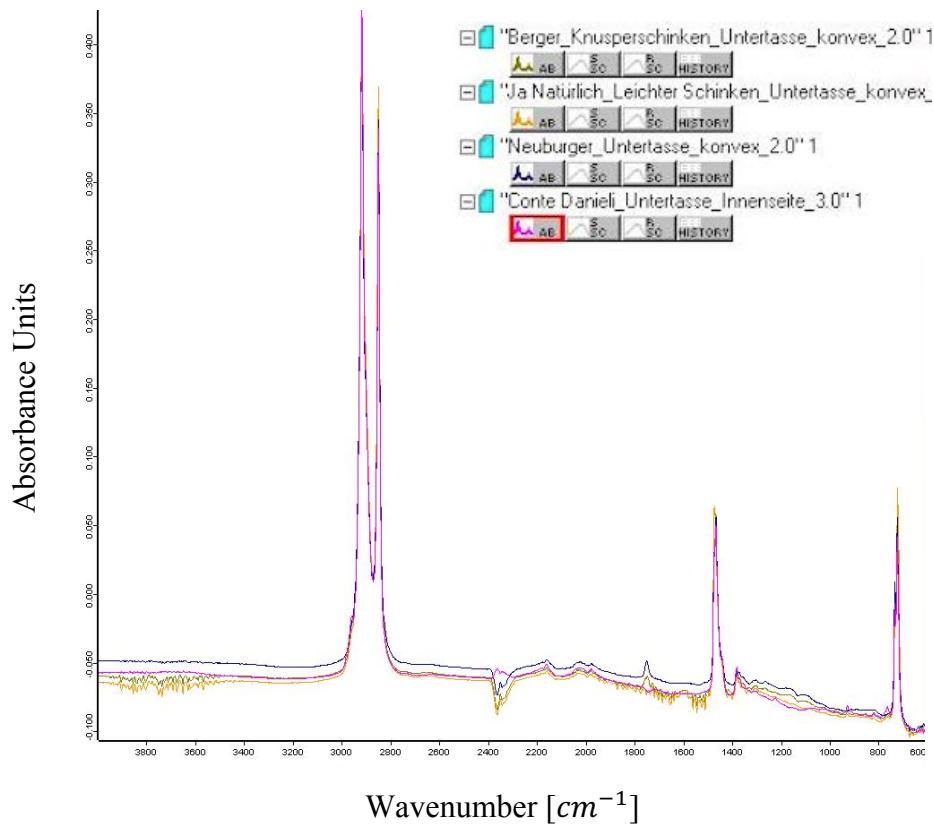


Abbildung 59: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 1, 17, 18, 31

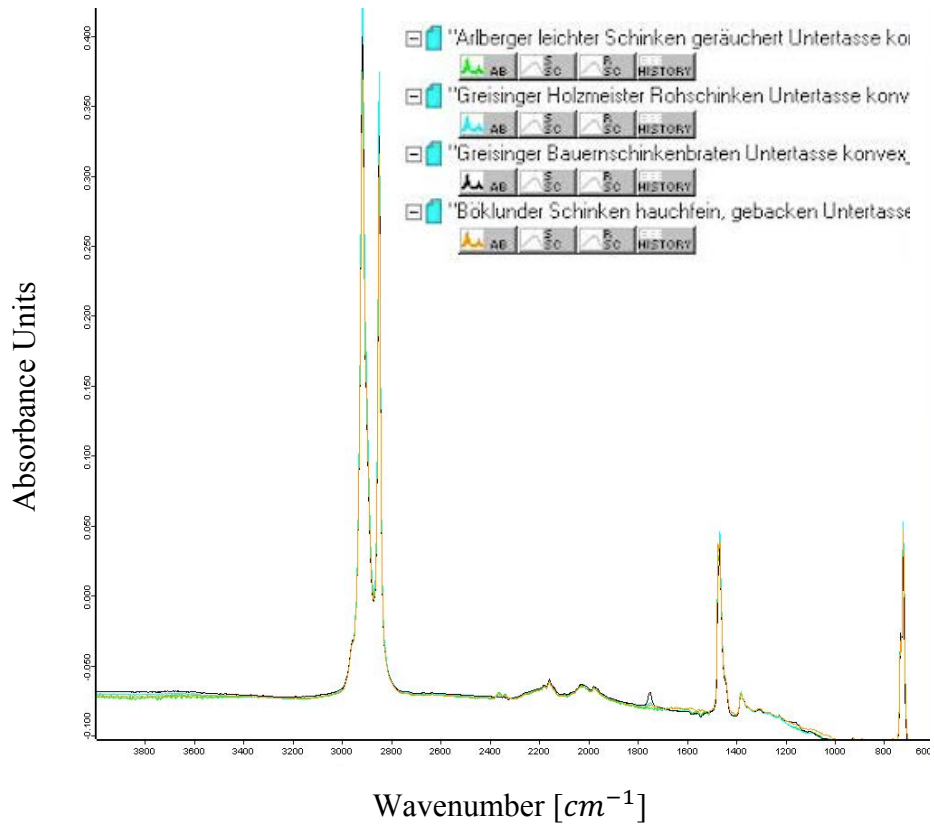


Abbildung 60: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 2, 3, 5, 6

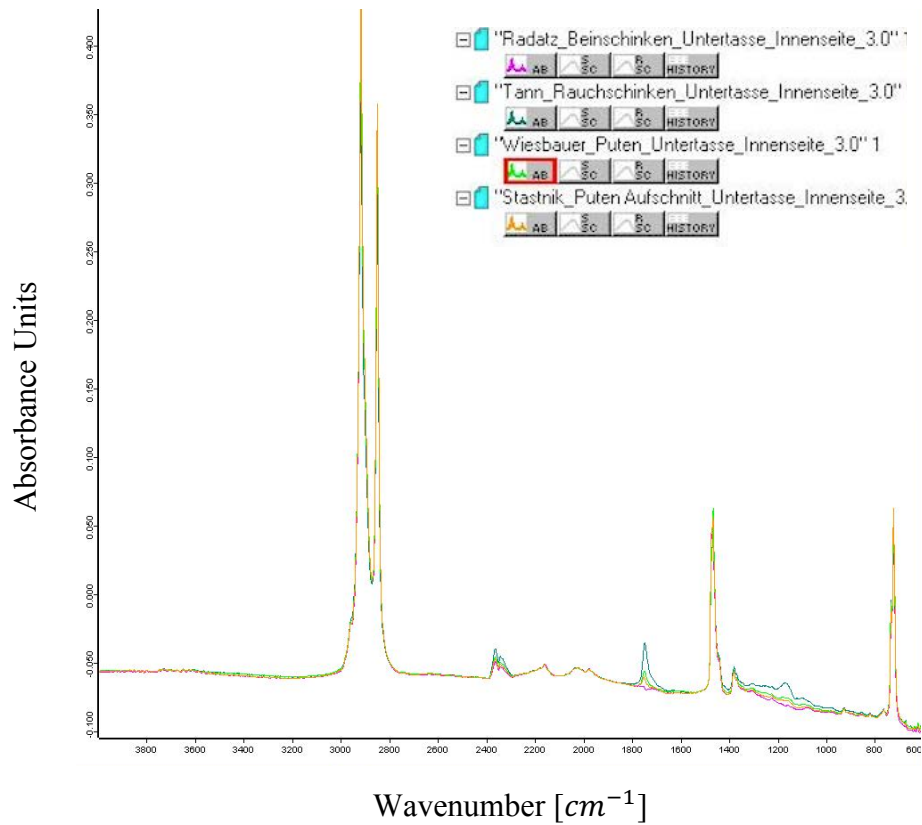


Abbildung 61: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 7, 8, 10, 11

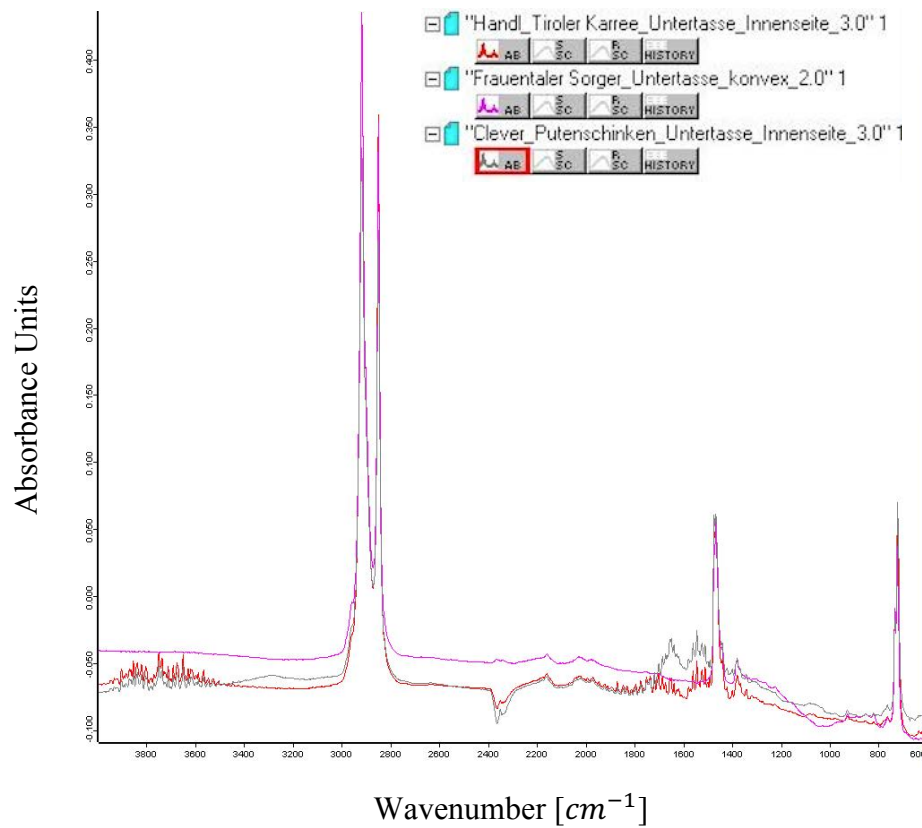


Abbildung 62: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 12, 13, 19

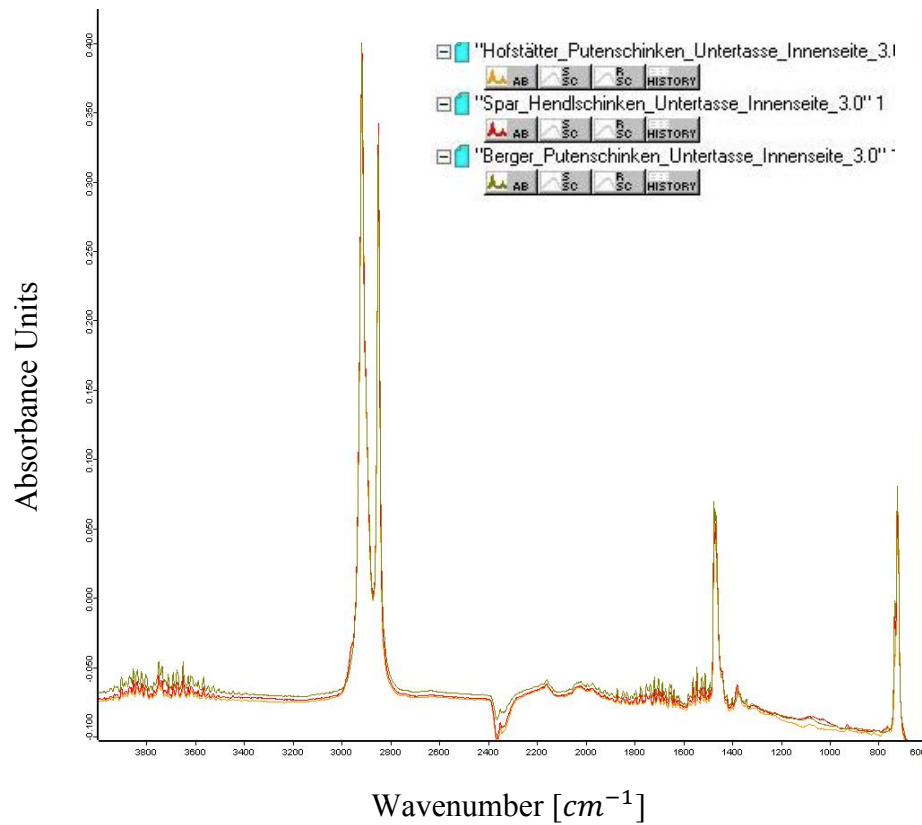


Abbildung 63: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 14, 16, 21

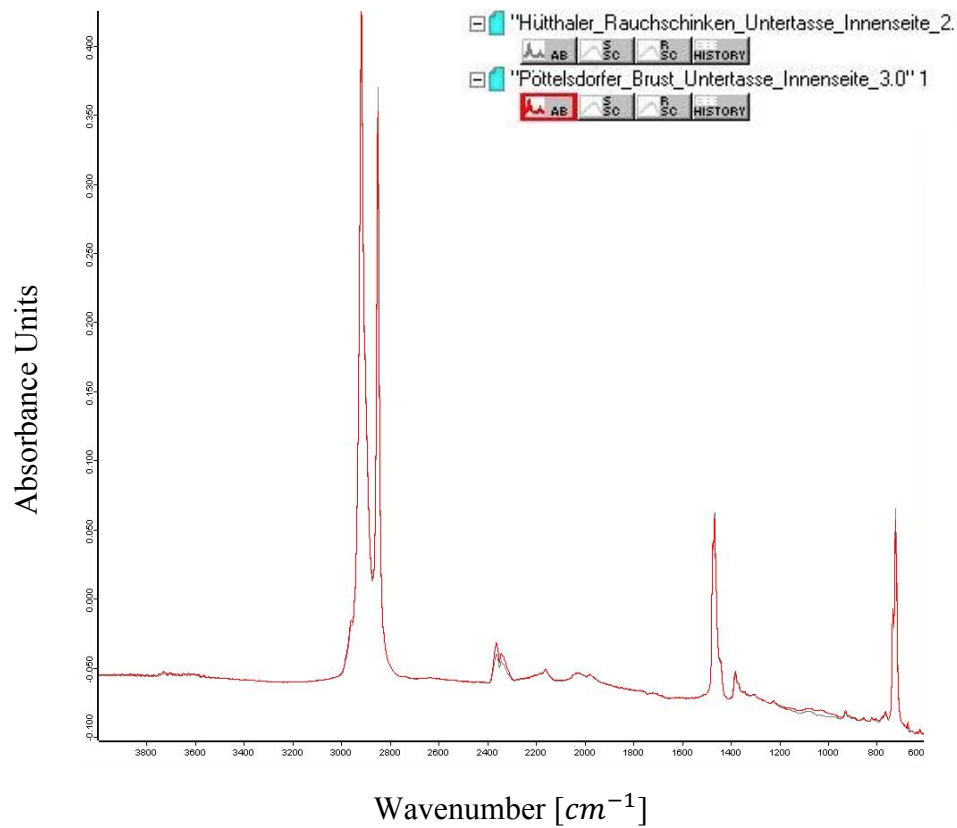


Abbildung 64: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 20, 15

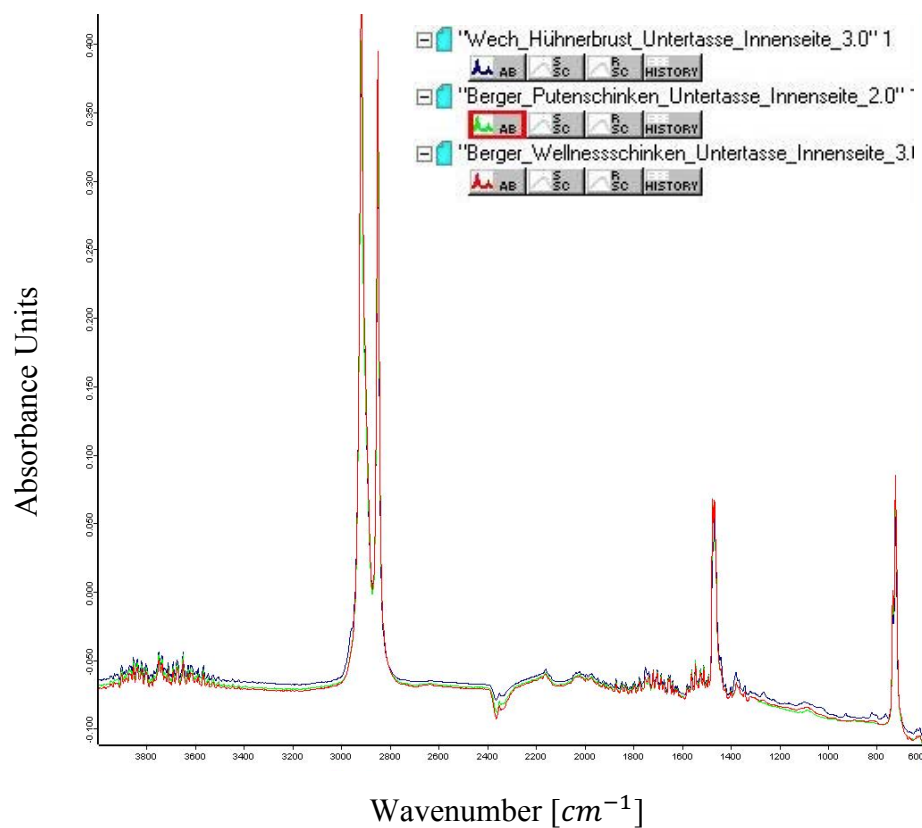


Abbildung 65: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 21, 22, 28

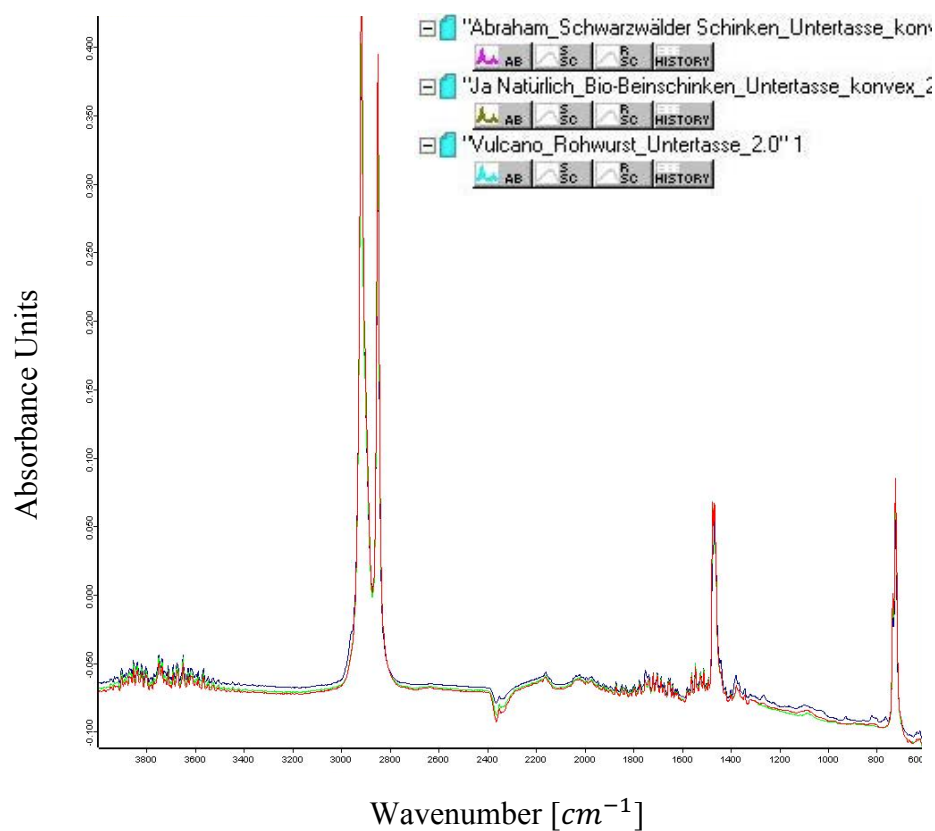


Abbildung 66: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 23, 24, 25

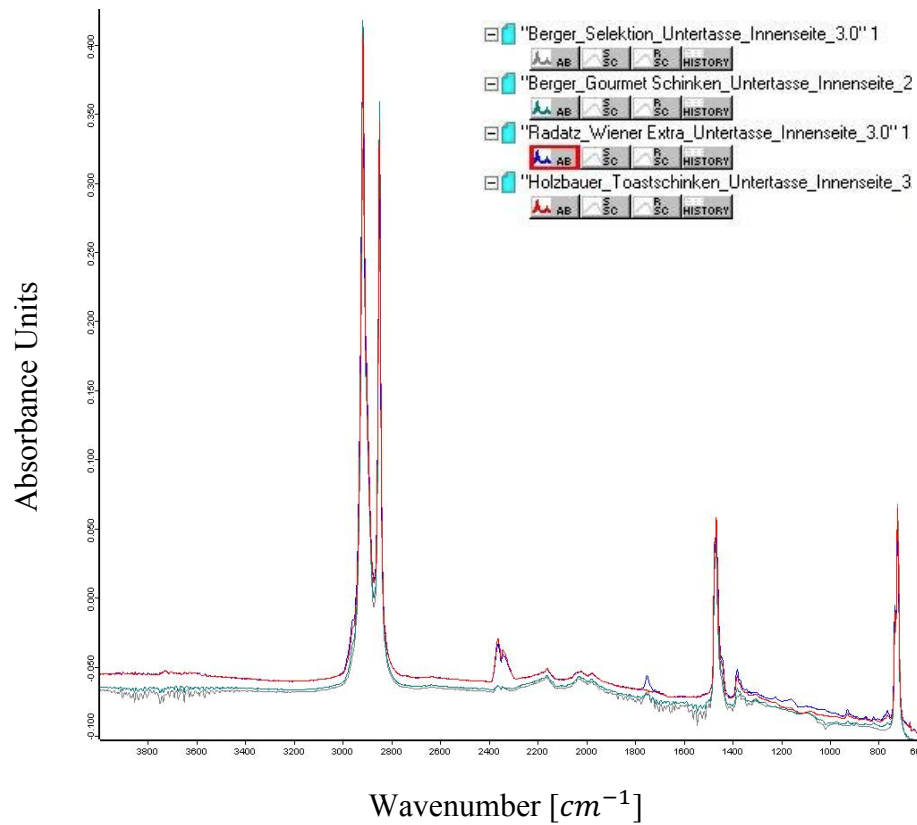


Abbildung 67: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 26, 27, 29, 30

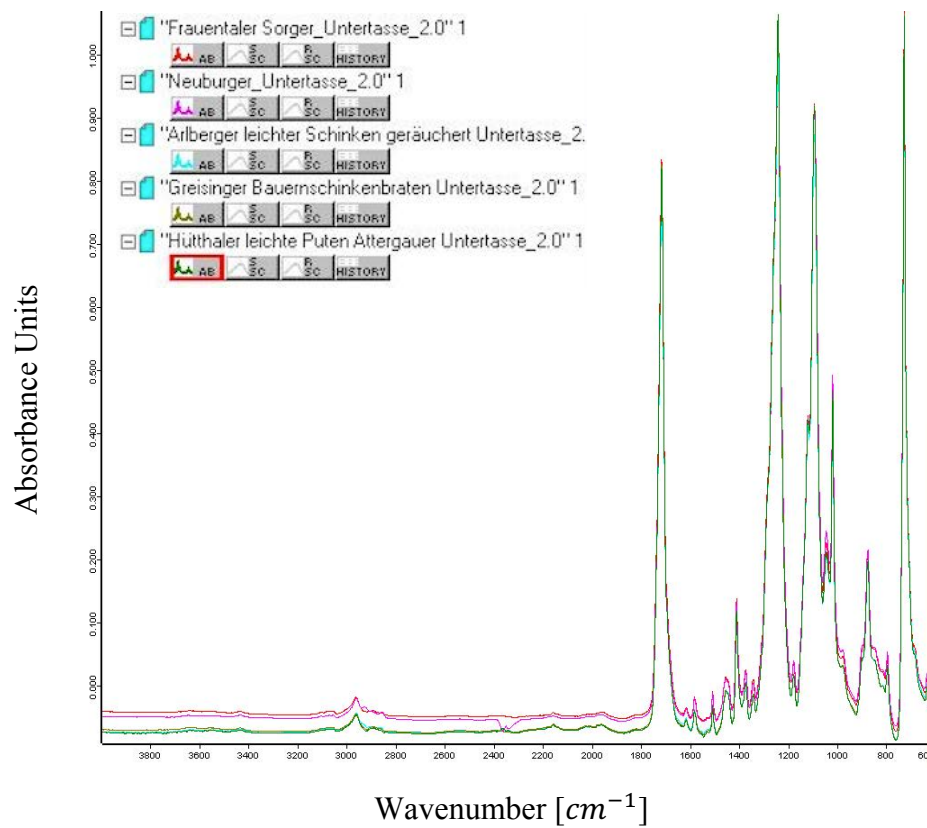


Abbildung 68: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 1, 2, 3, 4, 5

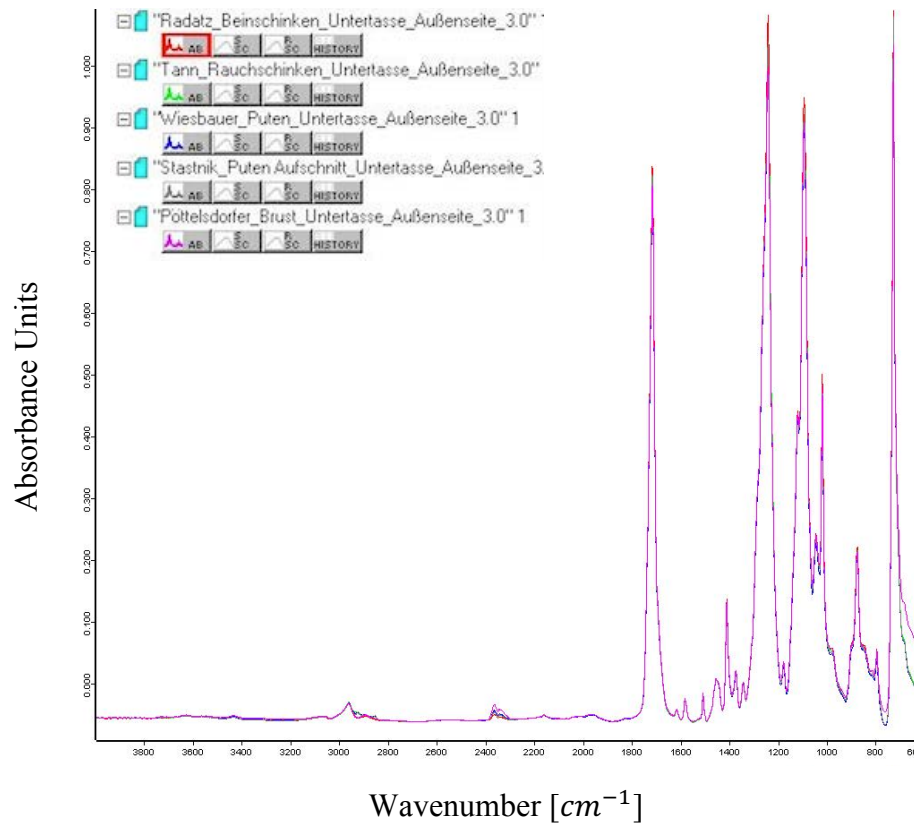


Abbildung 69: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 7, 8, 10, 11, 15

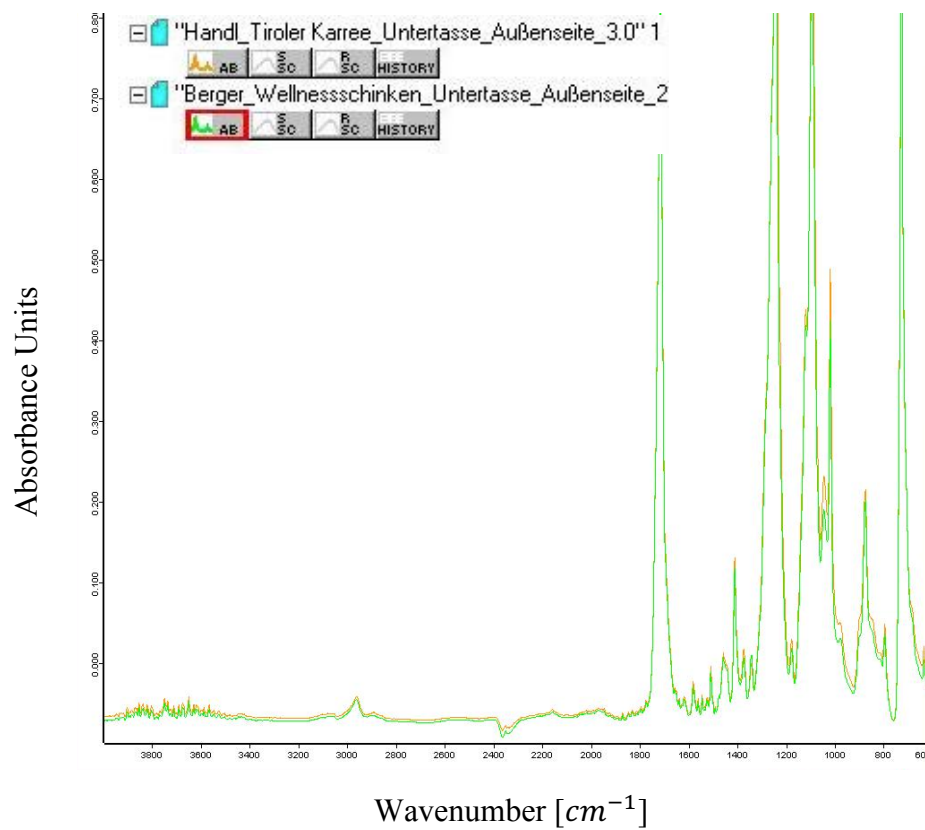


Abbildung 70: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 12, 28

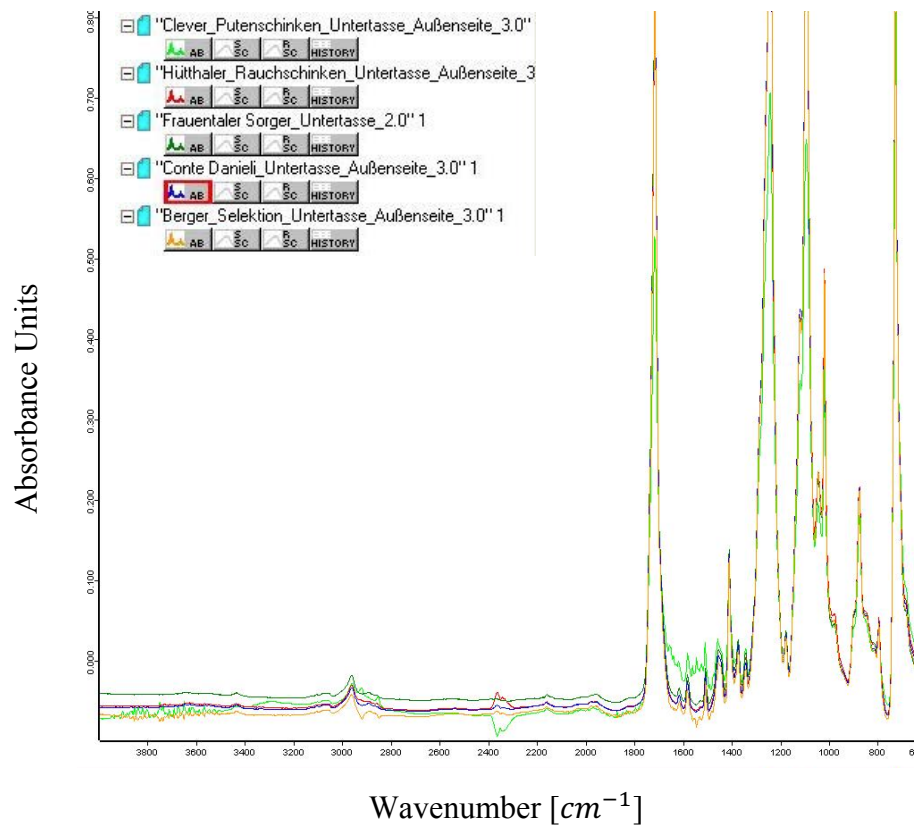


Abbildung 71: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 13, 19, 20, 30, 31

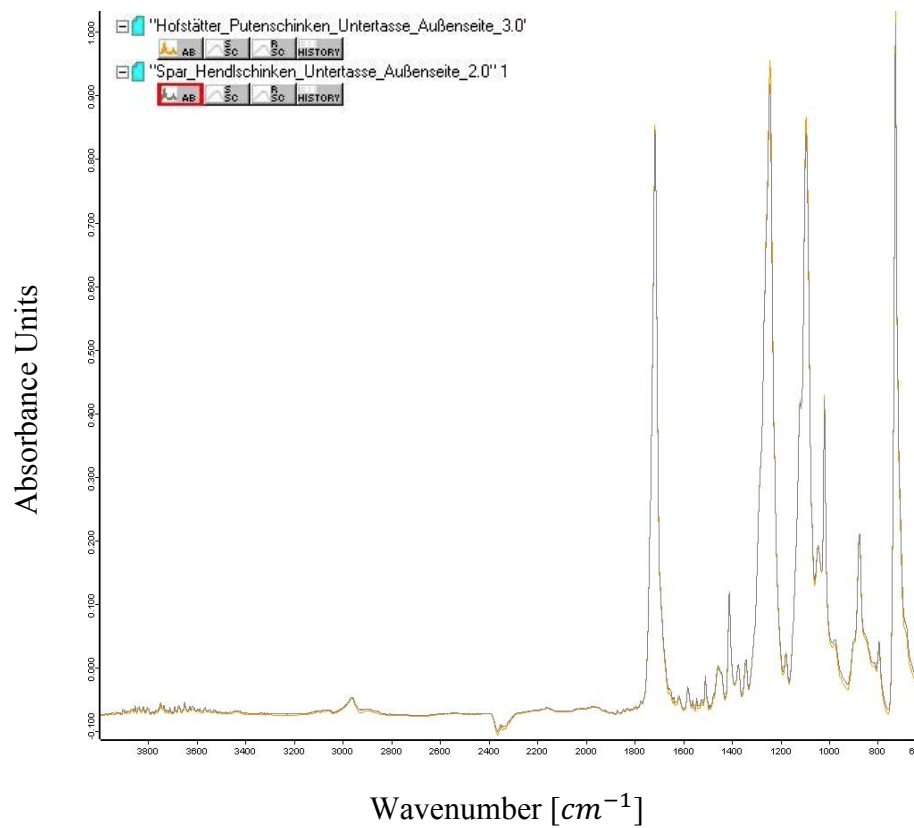


Abbildung 72: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 14, 16

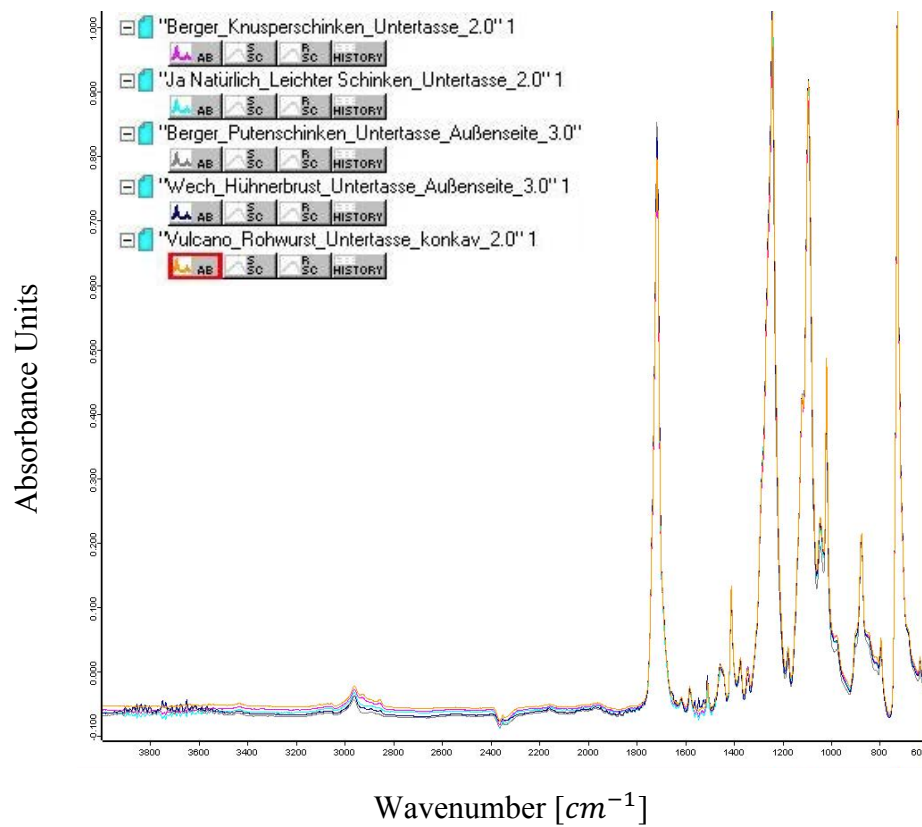


Abbildung 73: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 17, 18, 21, 22, 23

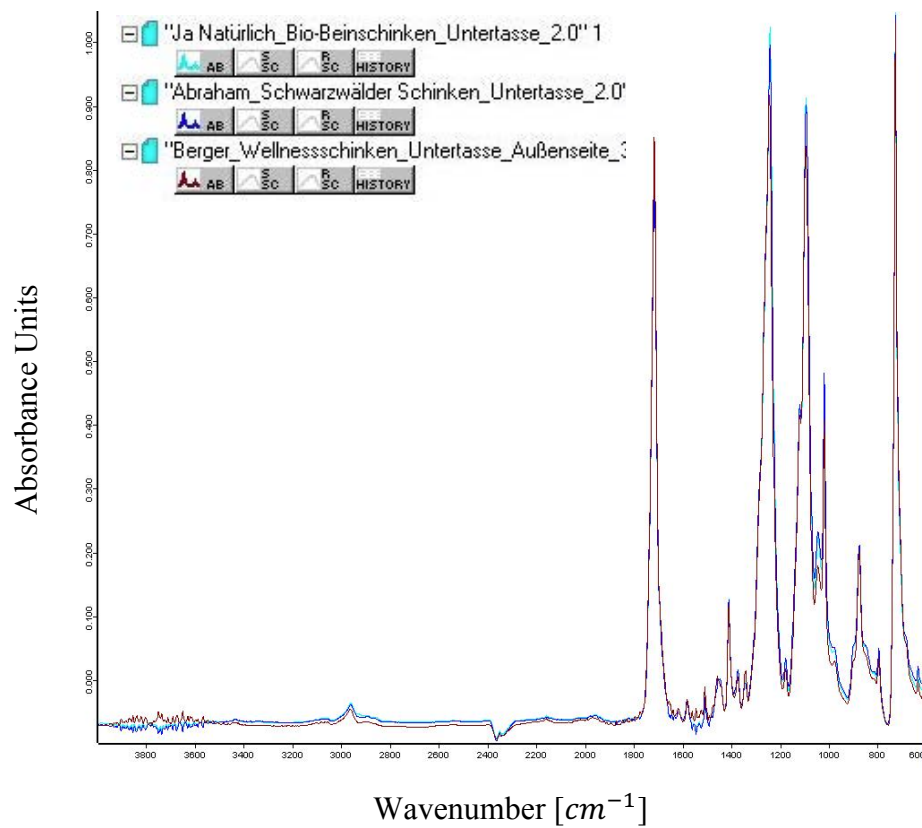


Abbildung 74: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 24, 25, 28

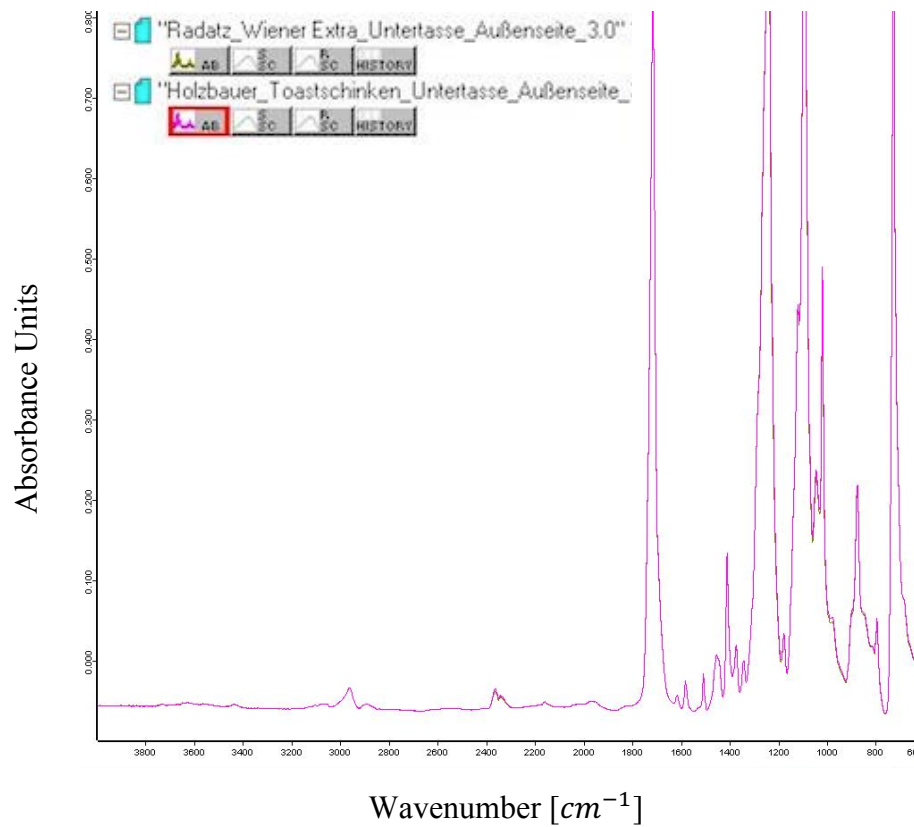


Abbildung 75: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 26, 27

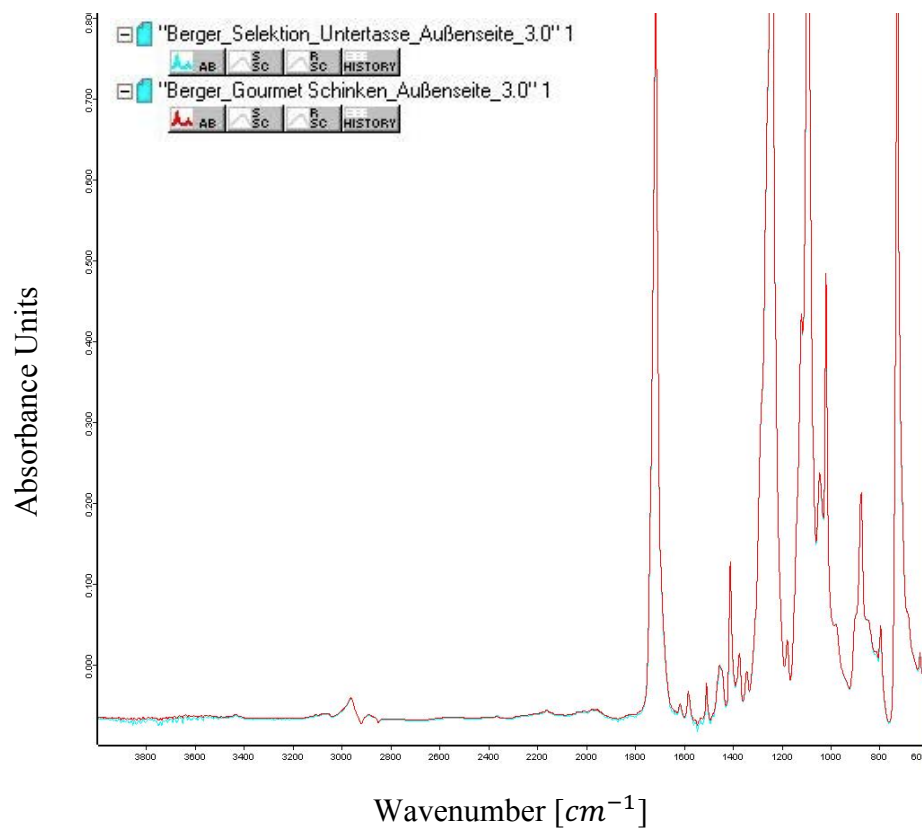


Abbildung 76: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 29, 30

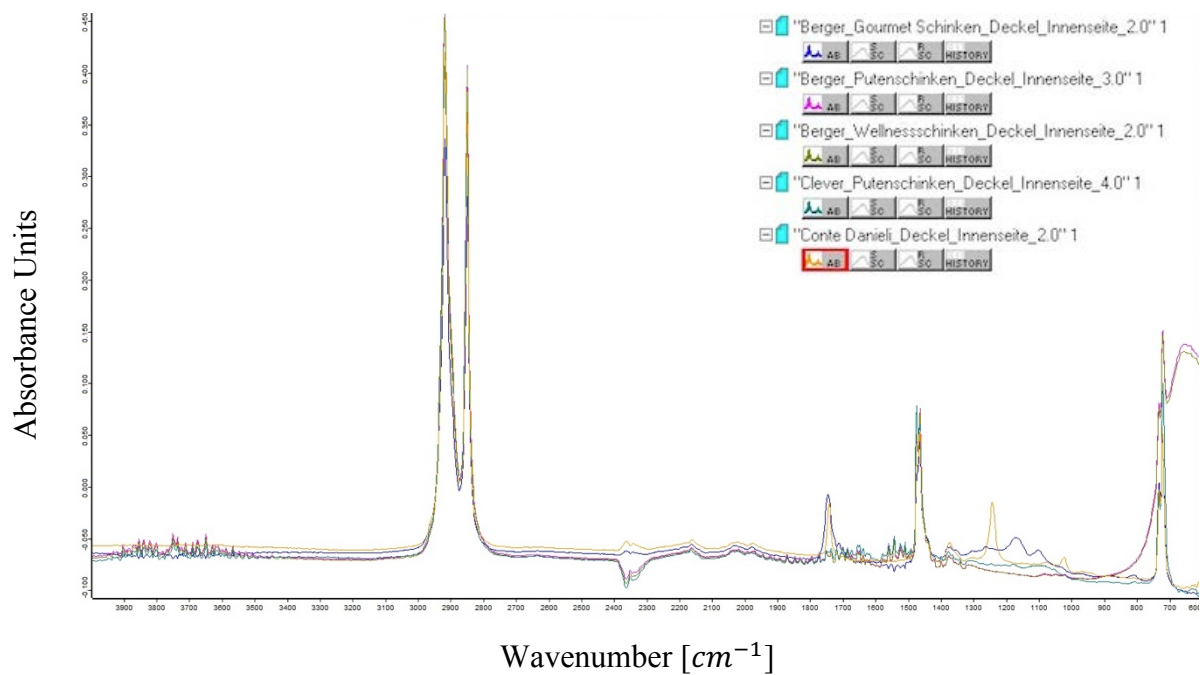


Abbildung 77: FTIR-Spektren: Deckel Innenseite Proben 19, 21, 28, 29, 31

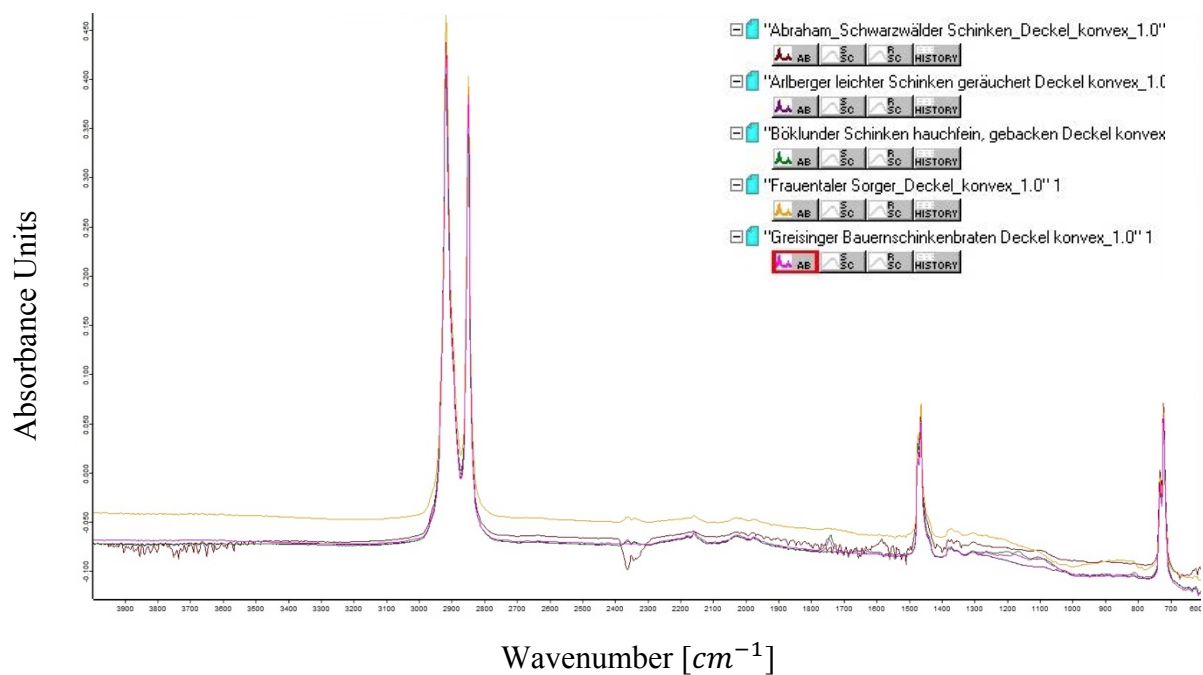


Abbildung 78: FTIR-Spektren: Deckel Innenseite Proben 2, 3, 6, 13, 25

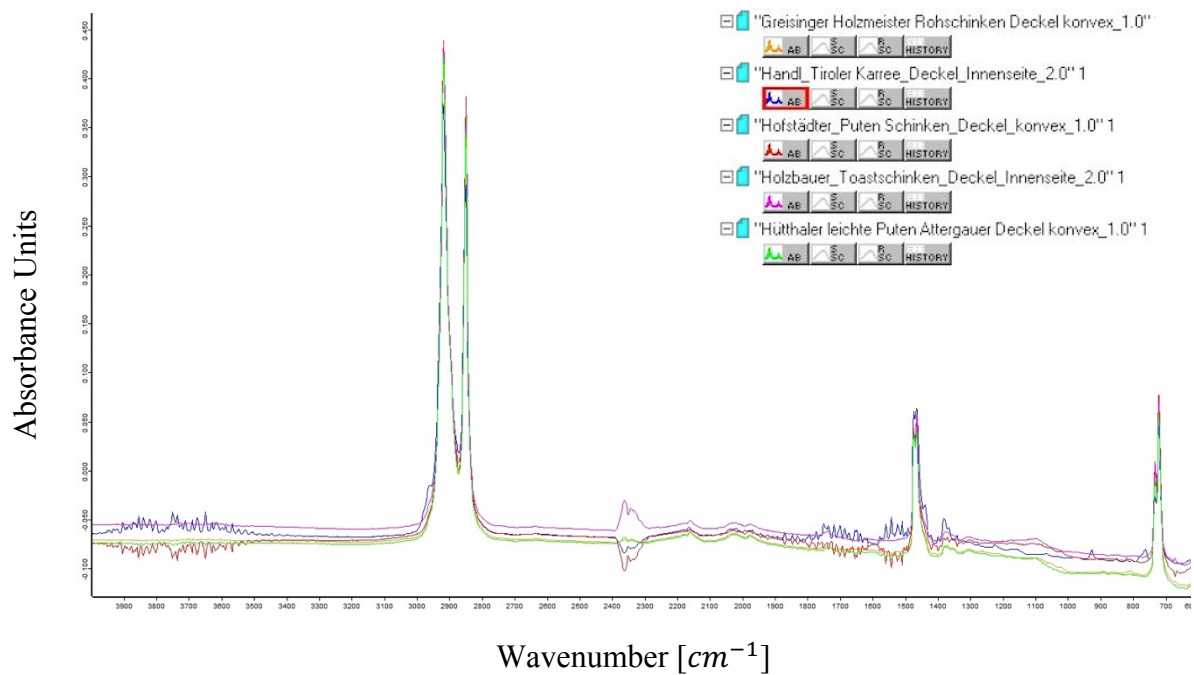


Abbildung 79: FTIR-Spektren: Deckel Innenseite Proben 4, 5, 12, 14, 26

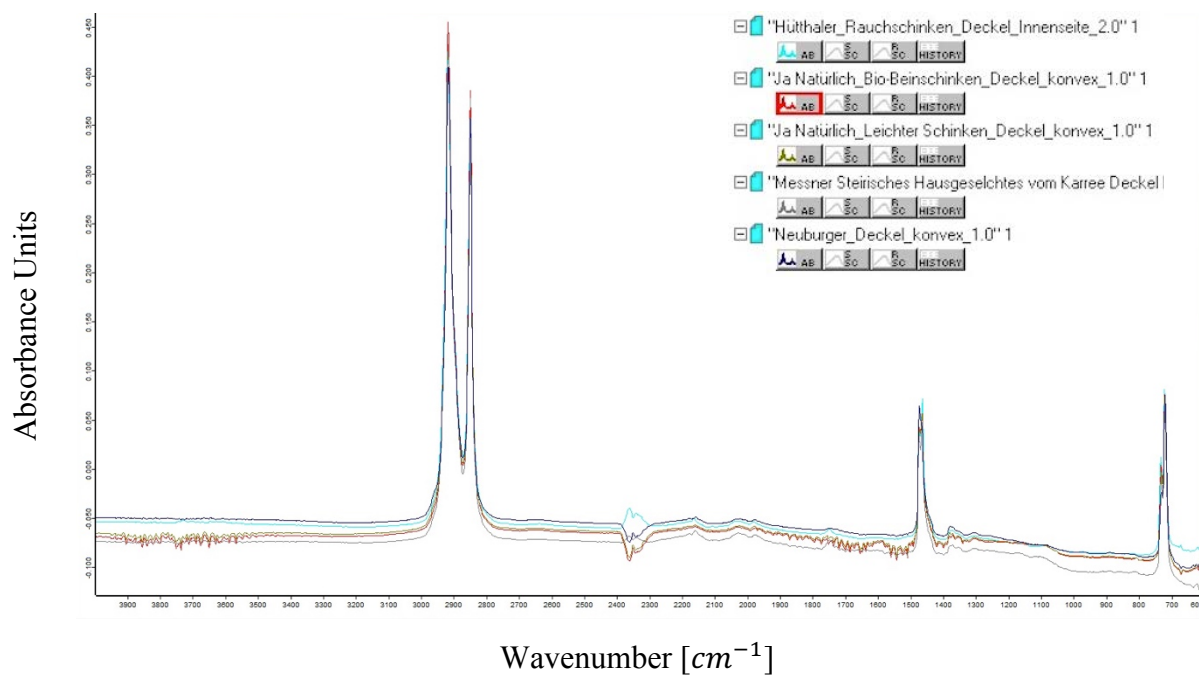


Abbildung 80: FTIR-Spektren: Deckel Innenseite Proben 1, 9, 18, 20, 24

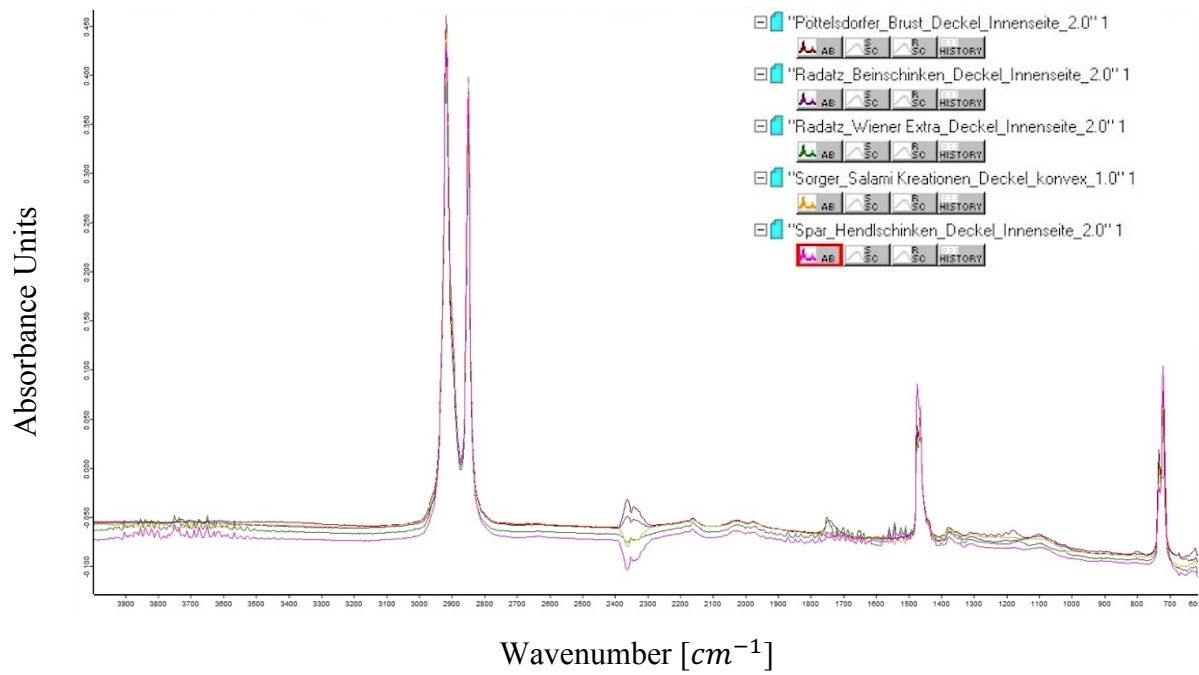


Abbildung 81: FTIR-Spektren: Deckel Innenseite Proben 7, 13, 15, 16, 27

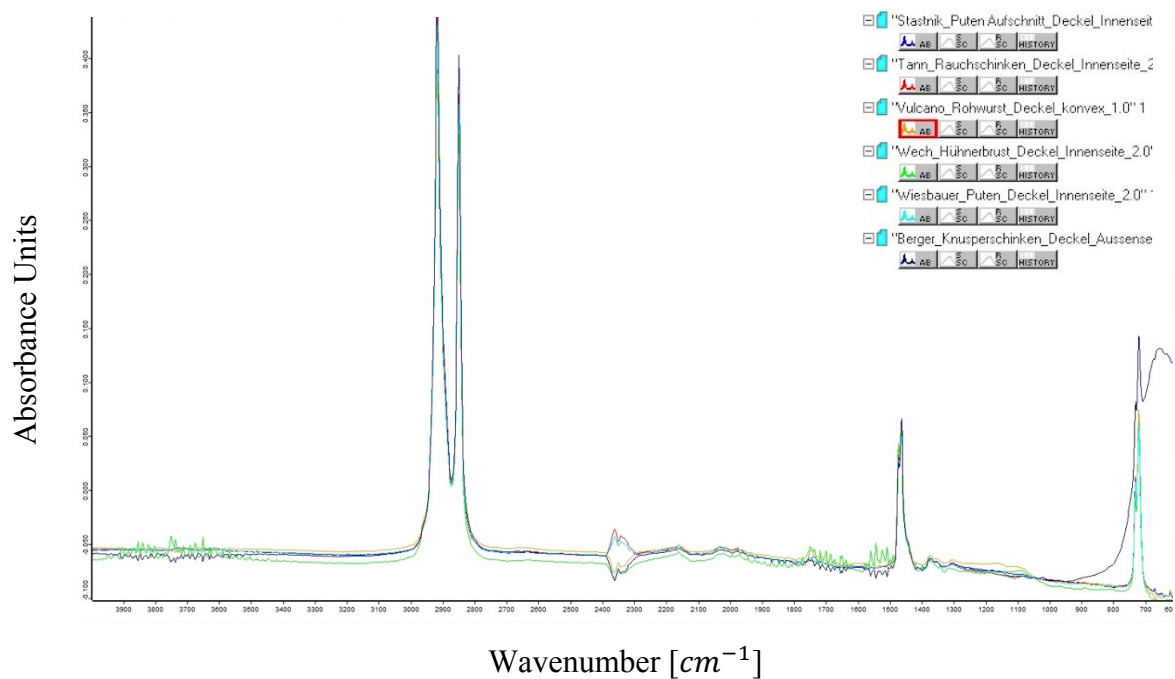


Abbildung 82: FTIR-Spektren: Deckel Innenseite Proben 8, 10, 11, 17, 22, 23

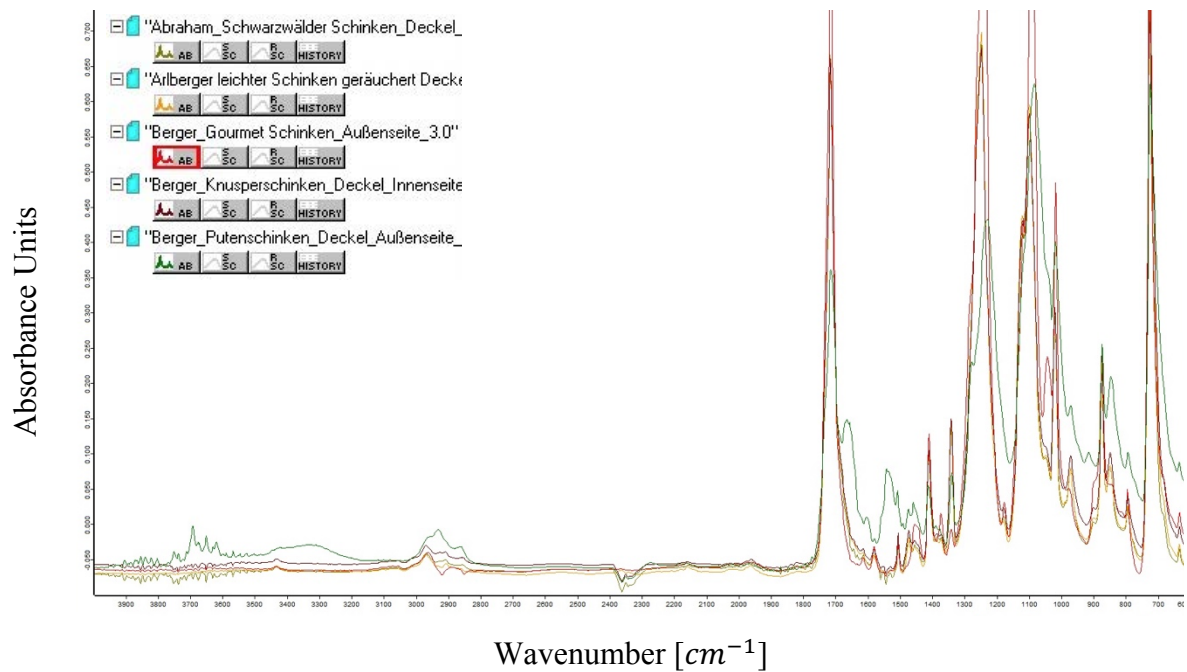


Abbildung 83: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 2, 17, 21, 25, 29

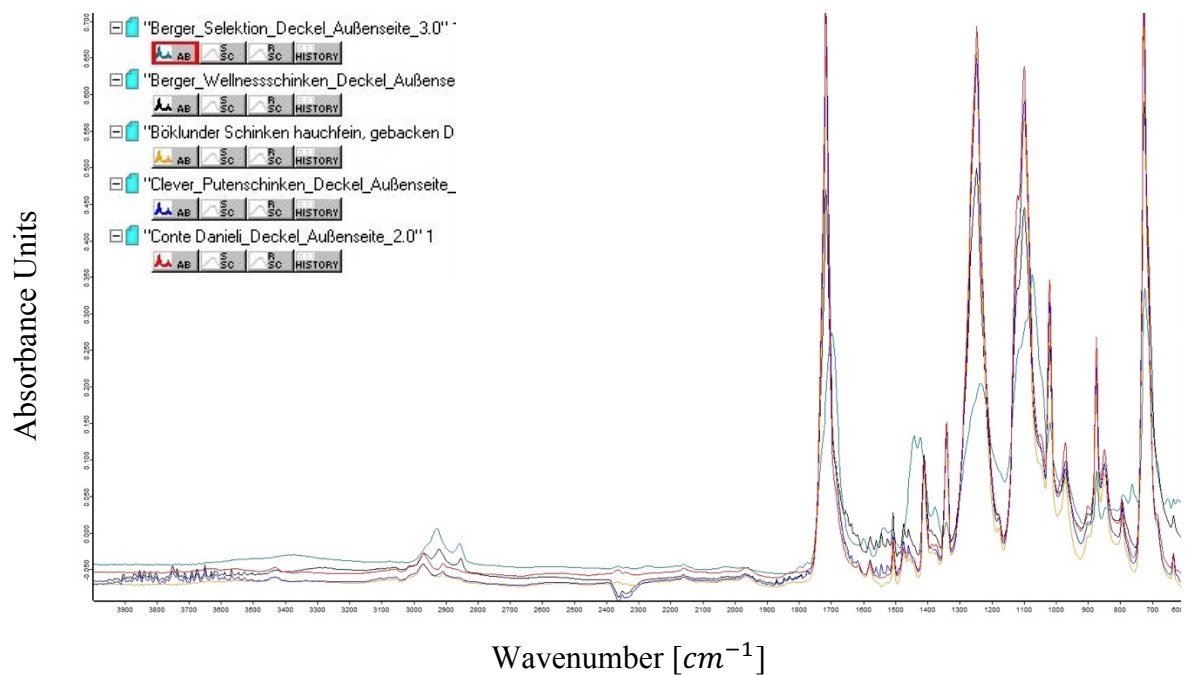


Abbildung 84: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 6, 19, 28, 30, 31

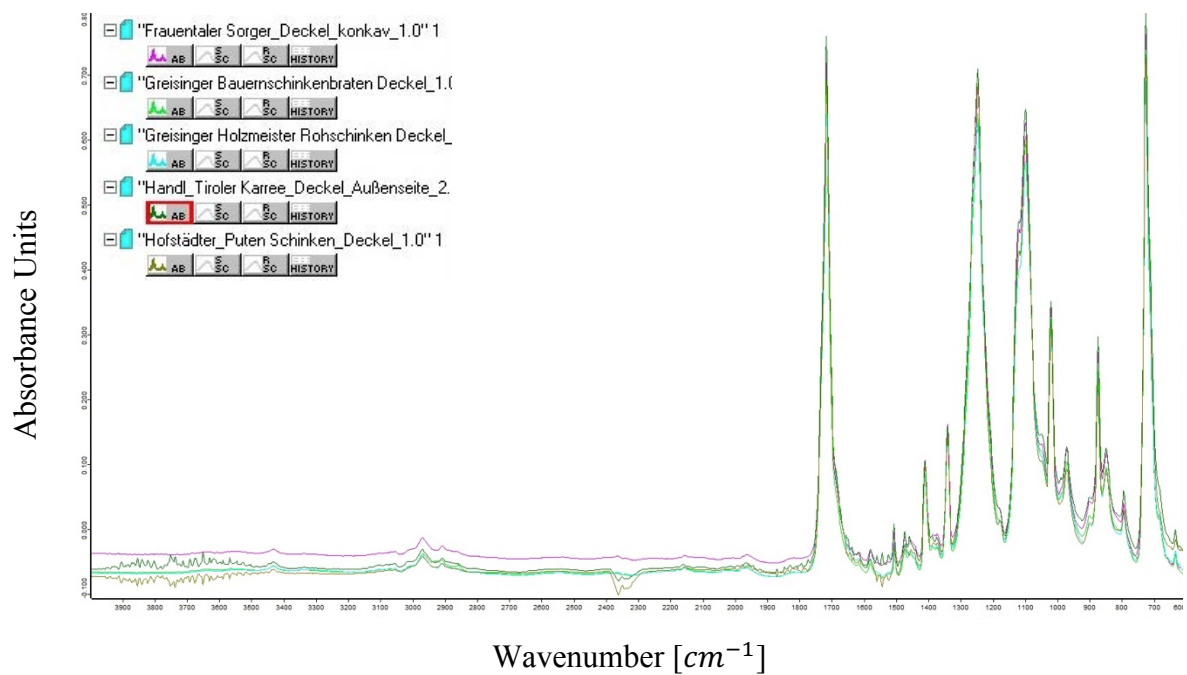


Abbildung 85: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 3, 5, 12, 13, 14

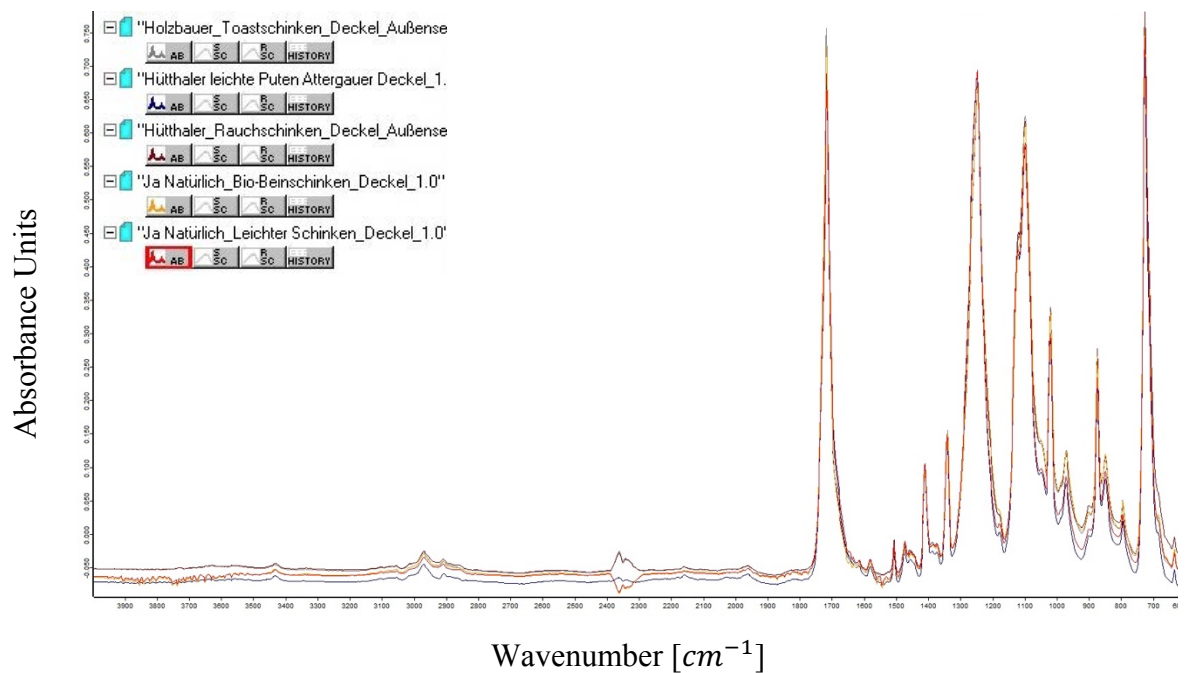


Abbildung 86: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 4, 18, 20, 24, 26

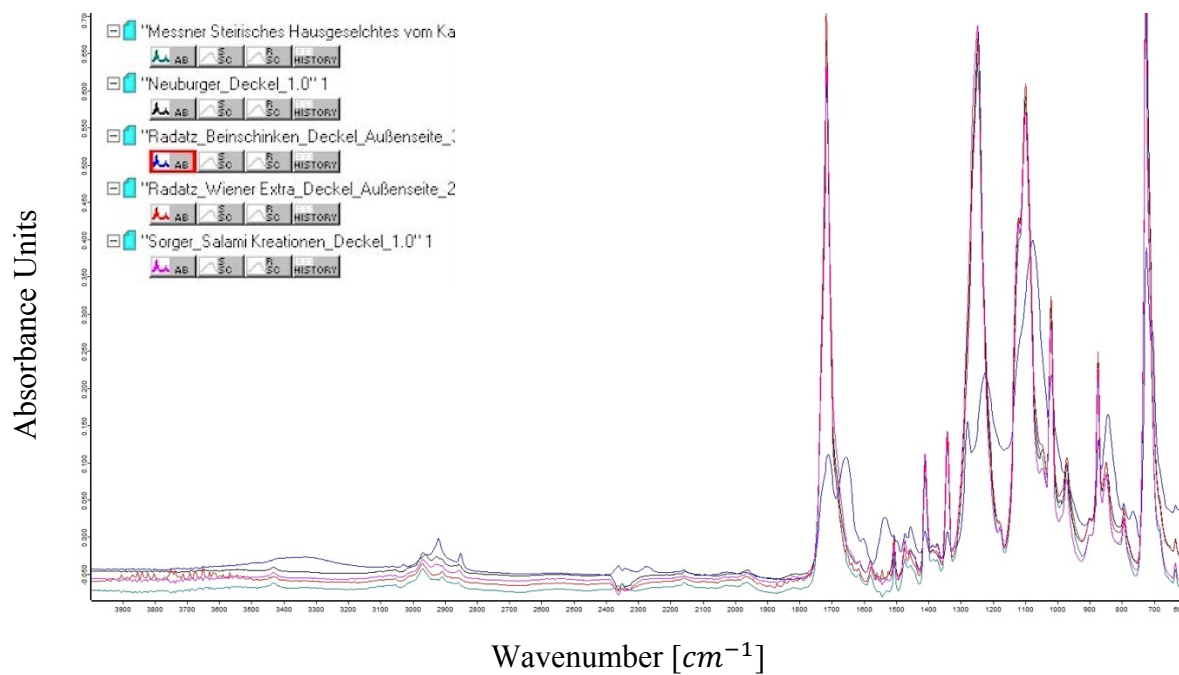


Abbildung 87: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 1, 7, 9, 13, 27

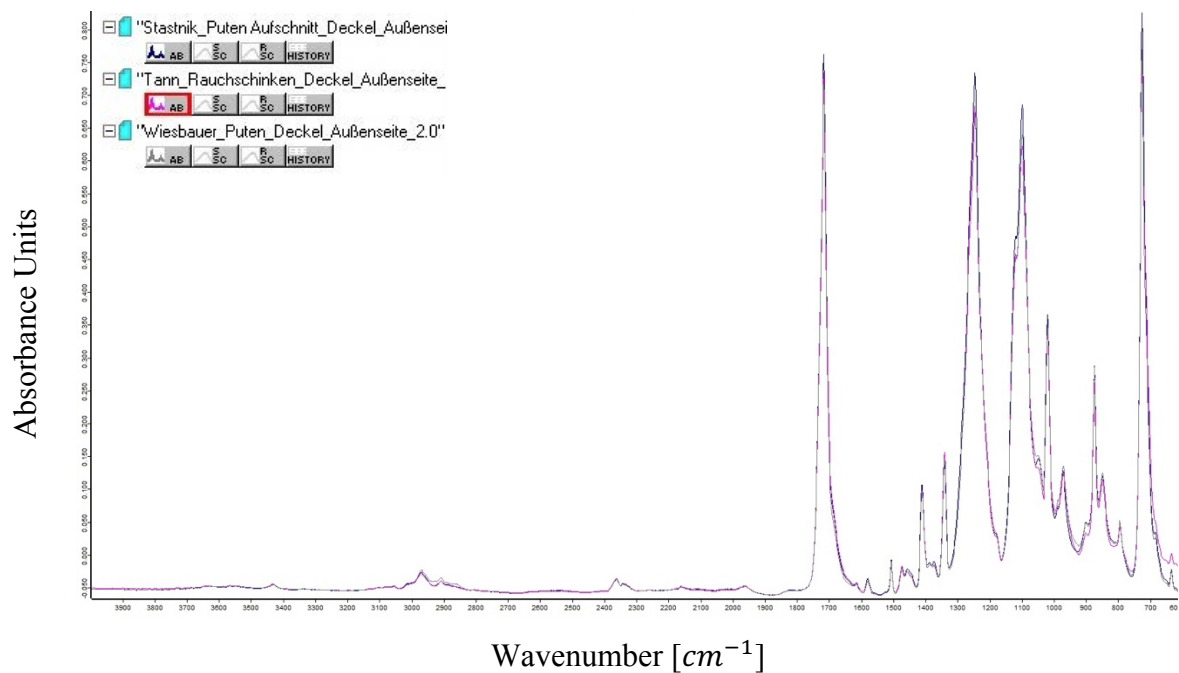


Abbildung 88: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 8, 10, 11

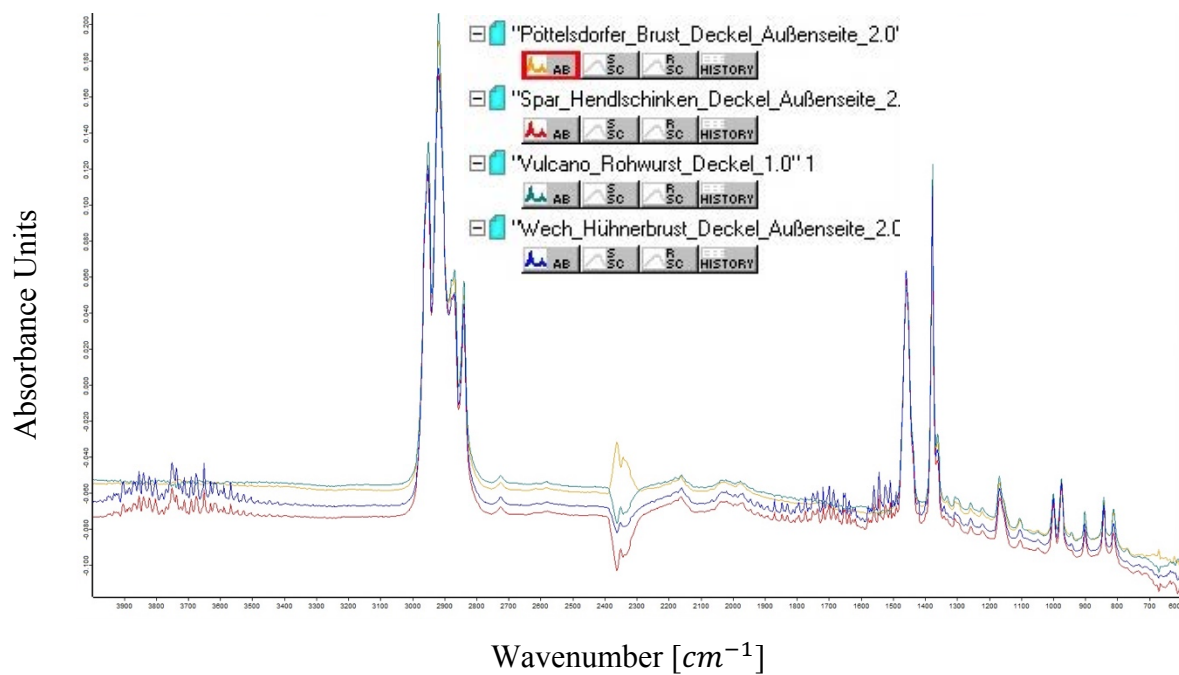


Abbildung 89: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 15, 16, 22, 23

Bei den nachfolgenden Mikroskopie-Aufnahmen wurden folgende Vergrößerungen verwendet:

- 50-fache Vergrößerung für Deckelfolien
- 20-fache Vergrößerung für Untertassenfolien

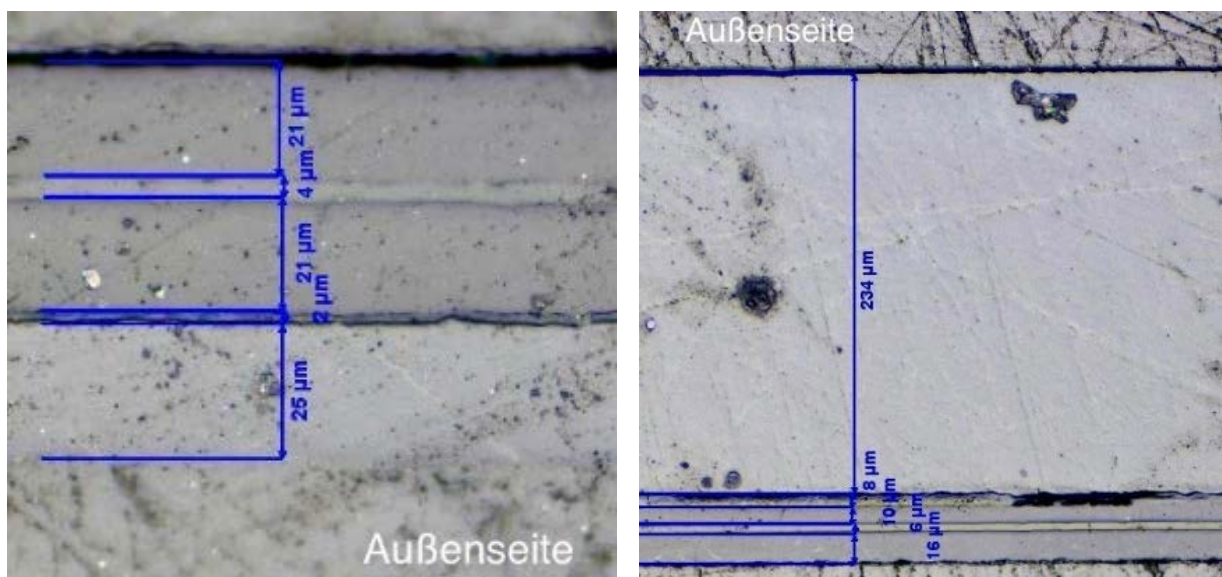


Abbildung 90: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 2; li. Deckel, r. Untertasse

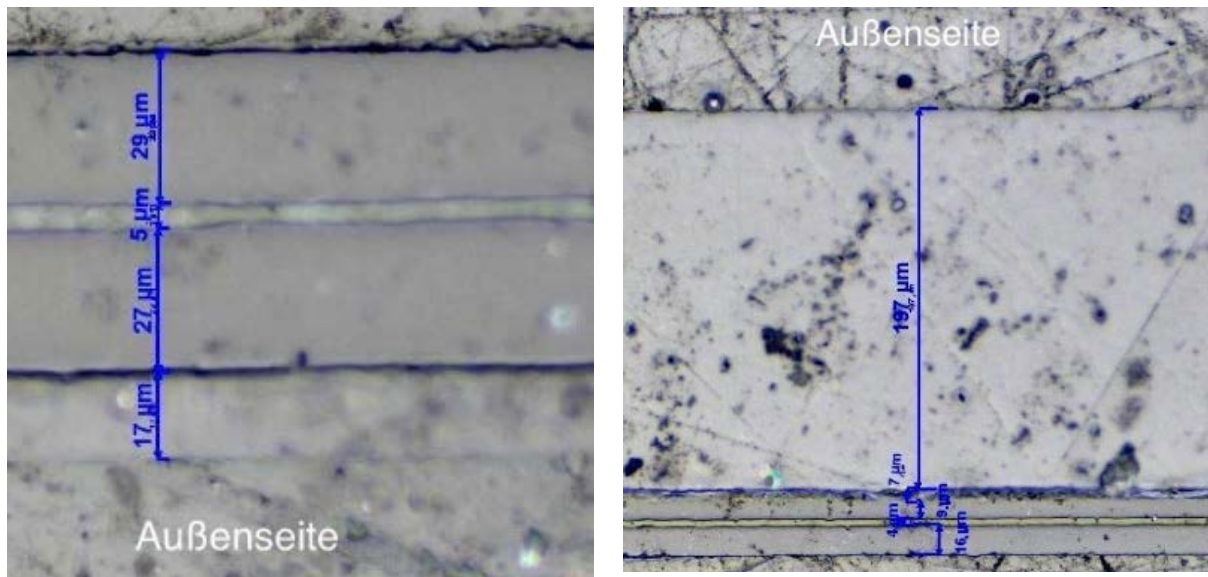


Abbildung 91: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 3; li. Deckel, r. Untertasse

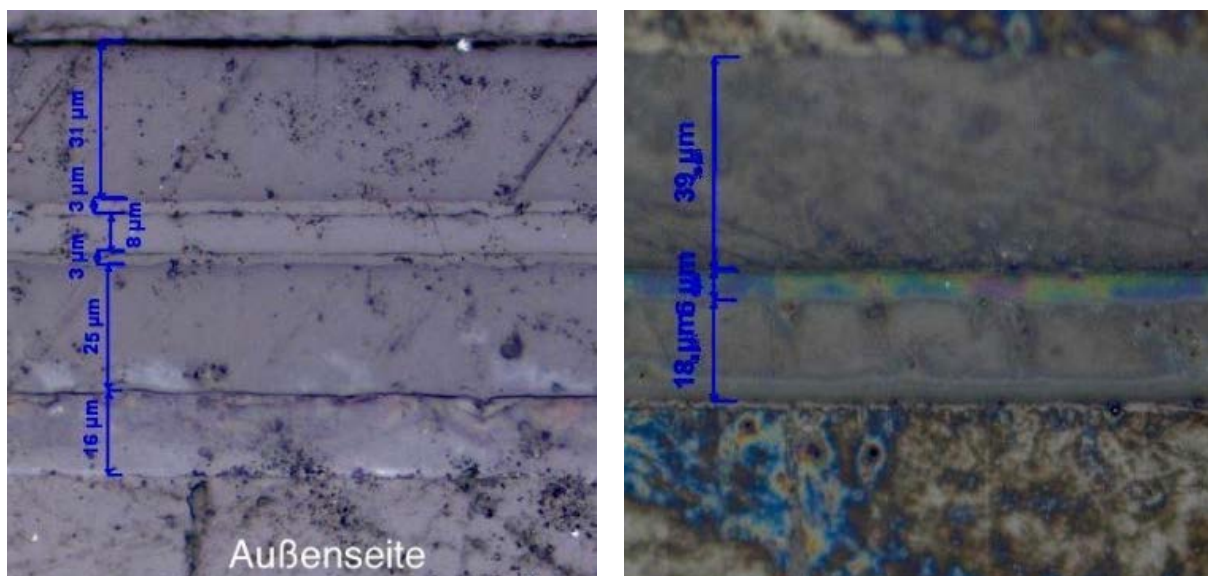


Abbildung 92: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 4; li. Deckel, r. Untertasse (x 50)

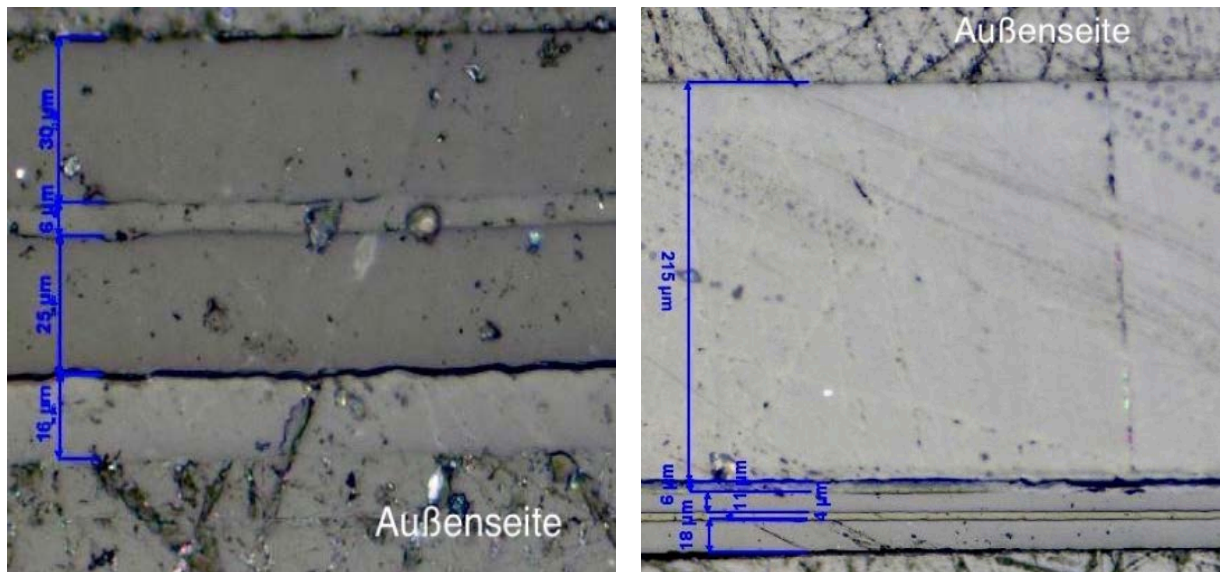


Abbildung 93: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 5; li. Deckel, r. Untertasse

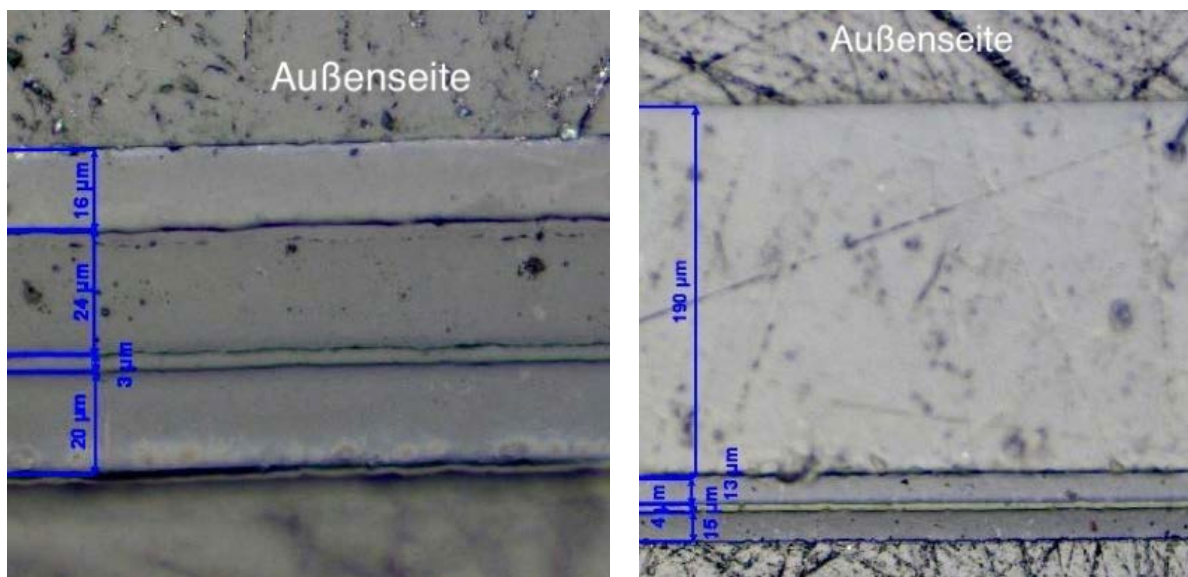


Abbildung 94: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 6; li. Deckel, r. Untertasse

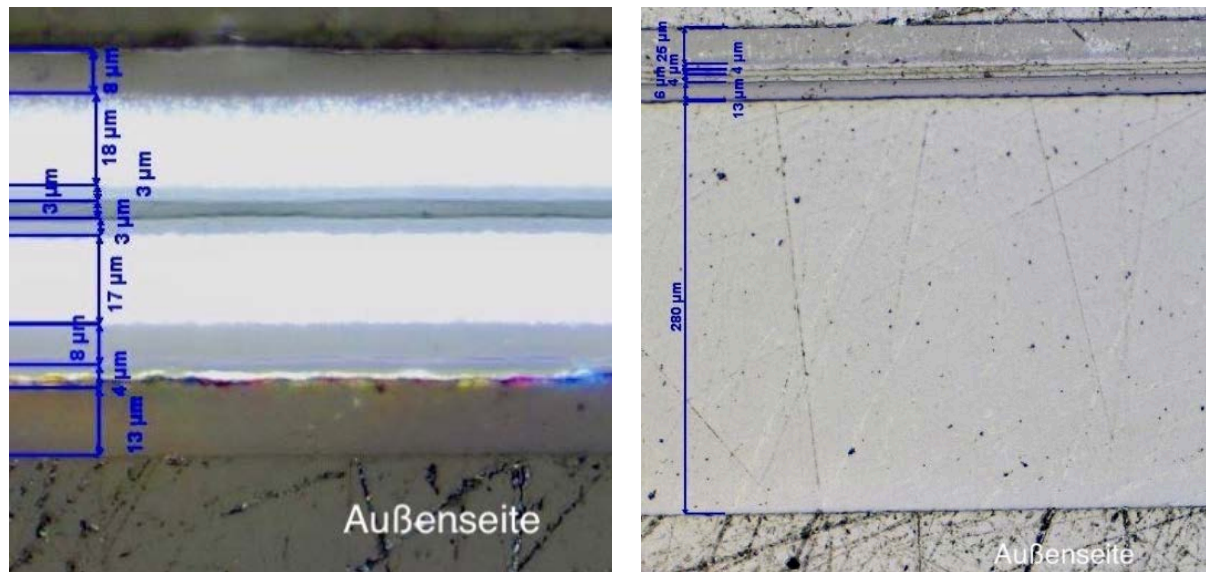


Abbildung 95: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 7; li. Deckel, r. Untertasse

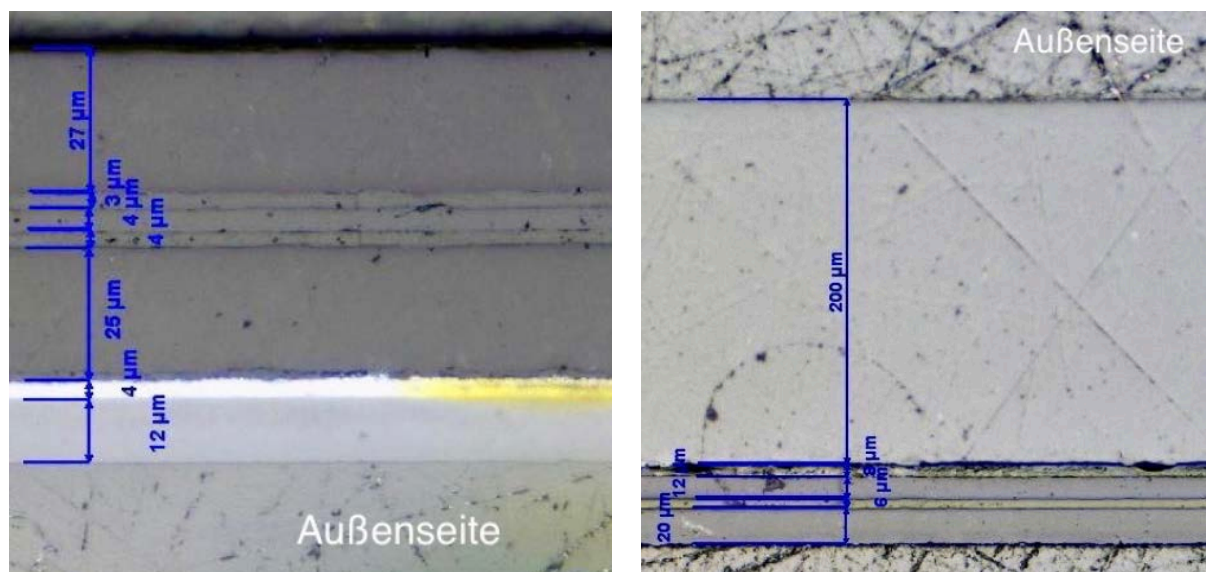


Abbildung 96: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 8; li. Deckel, r. Untertasse

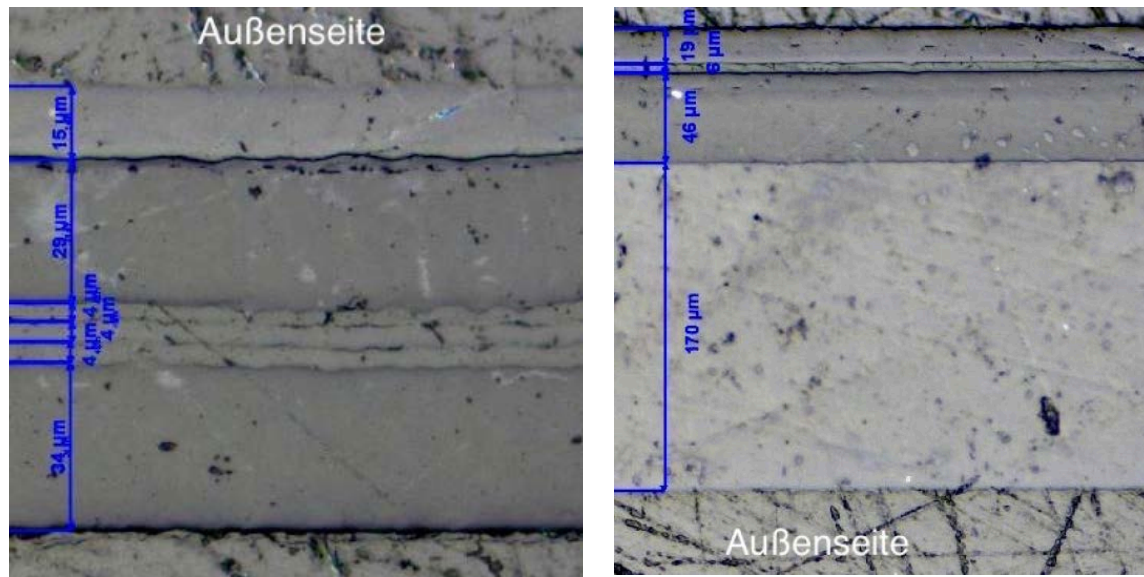


Abbildung 97: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 9; li. Deckel, r. Untertasse

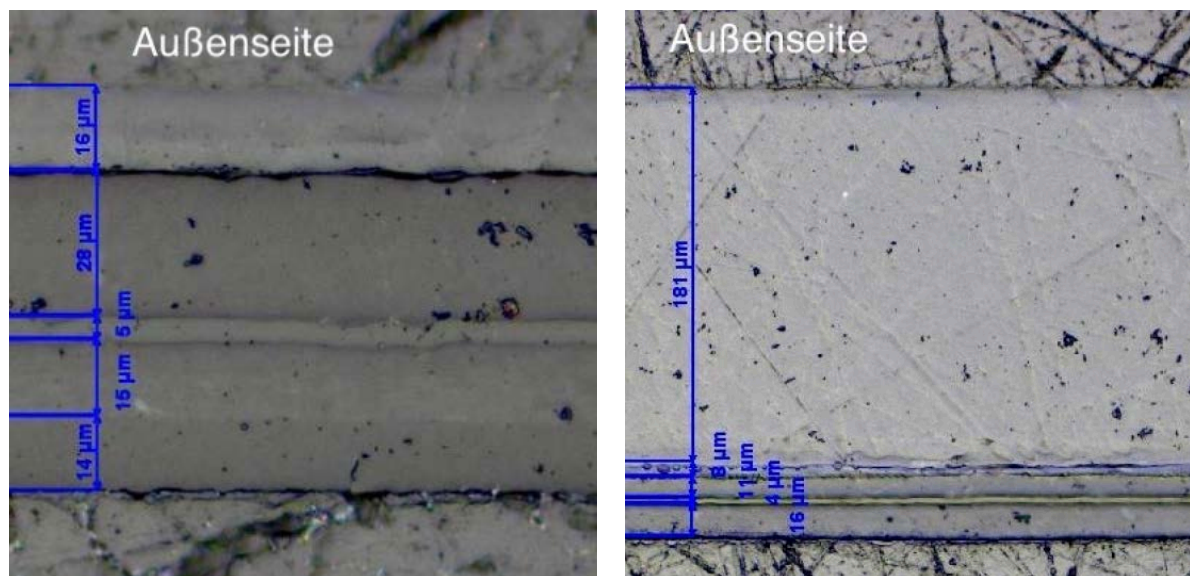


Abbildung 98: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 10; li. Deckel, r. Untertasse

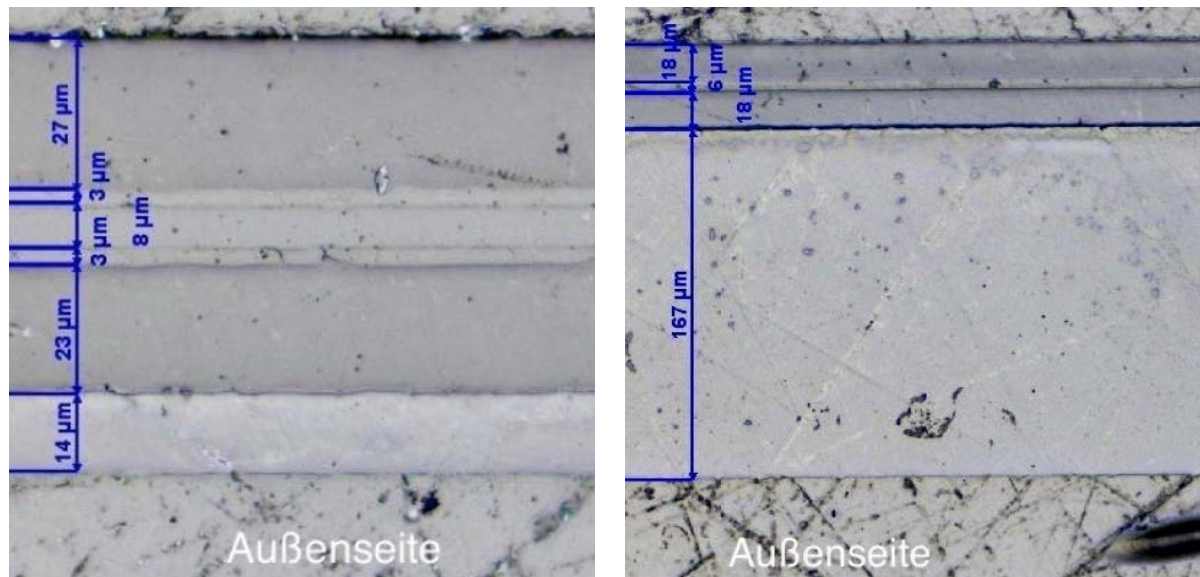


Abbildung 99: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 11; li. Deckel, r. Untertasse

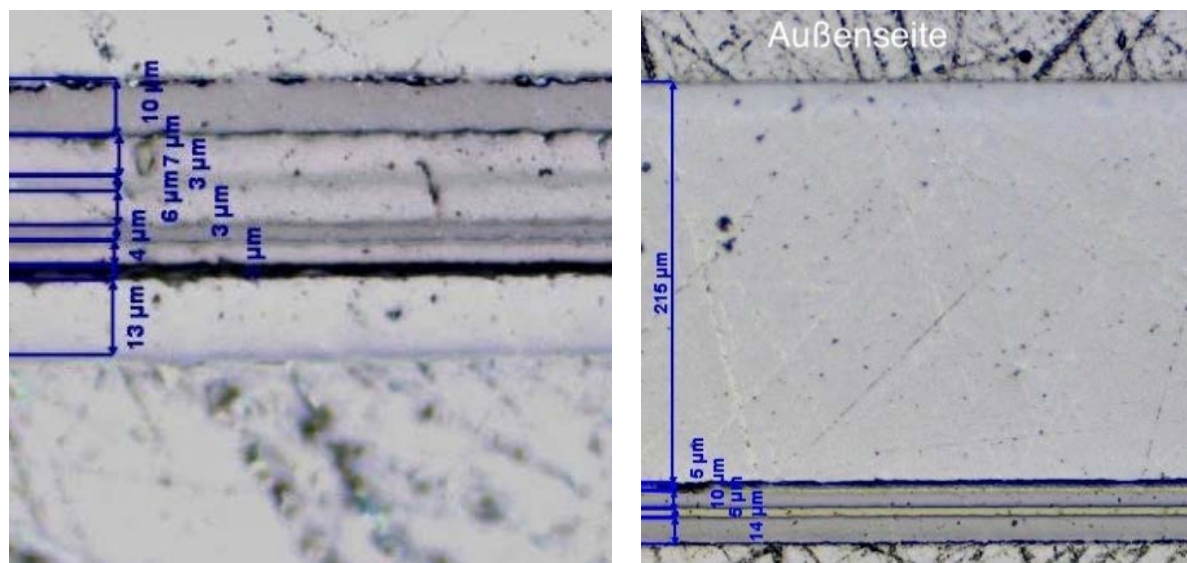


Abbildung 100: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 12; li. Deckel, r. Untertasse

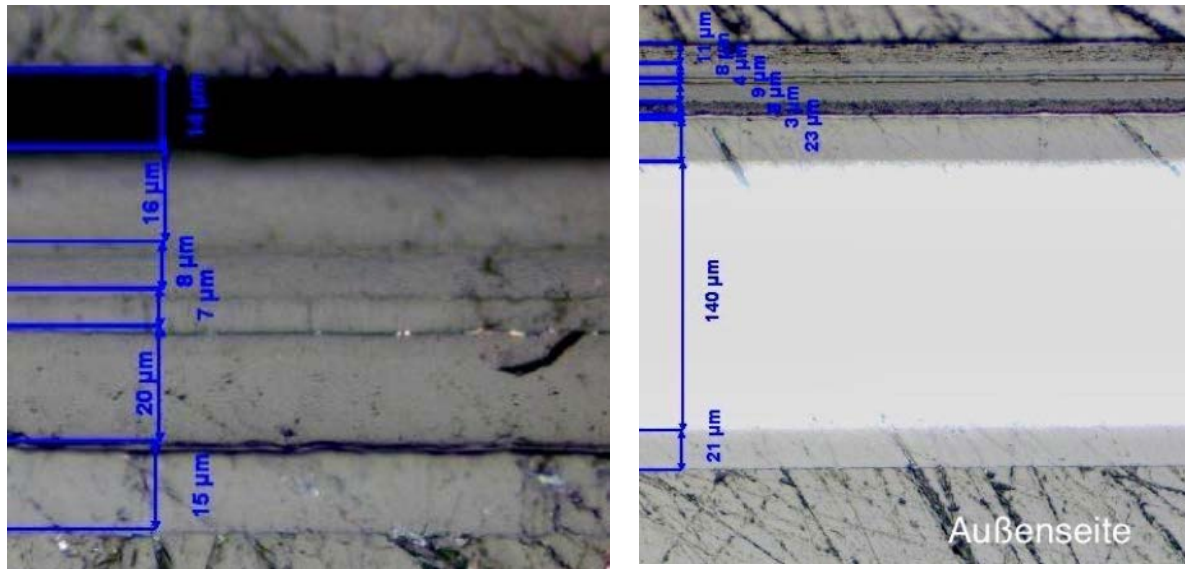


Abbildung 101: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 13; li. Deckel, r. Untertasse

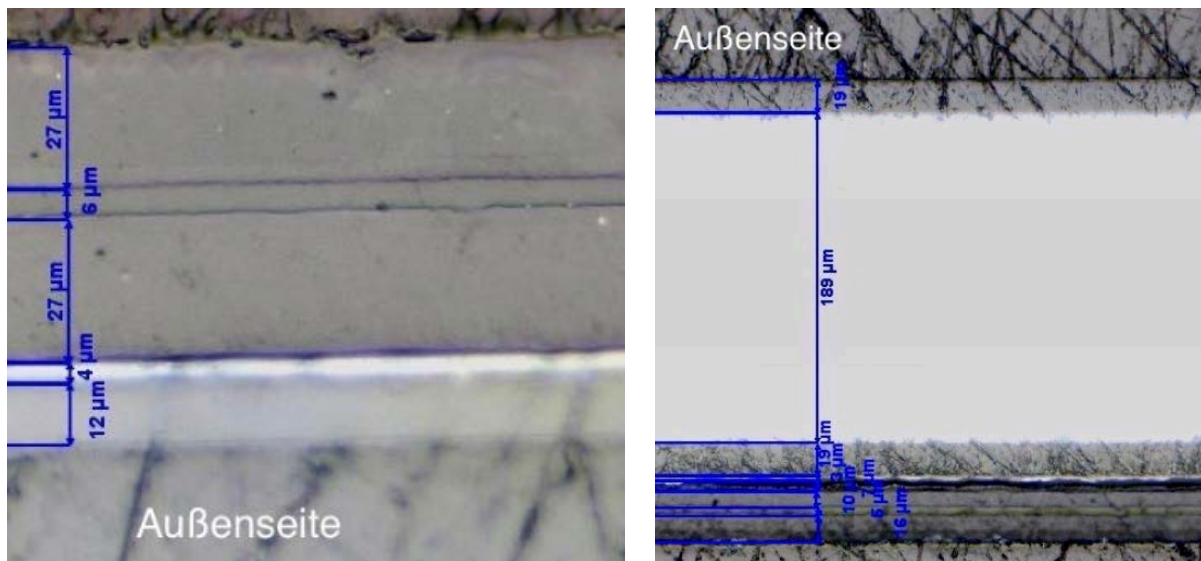


Abbildung 102: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 14; li. Deckel, r. Untertasse

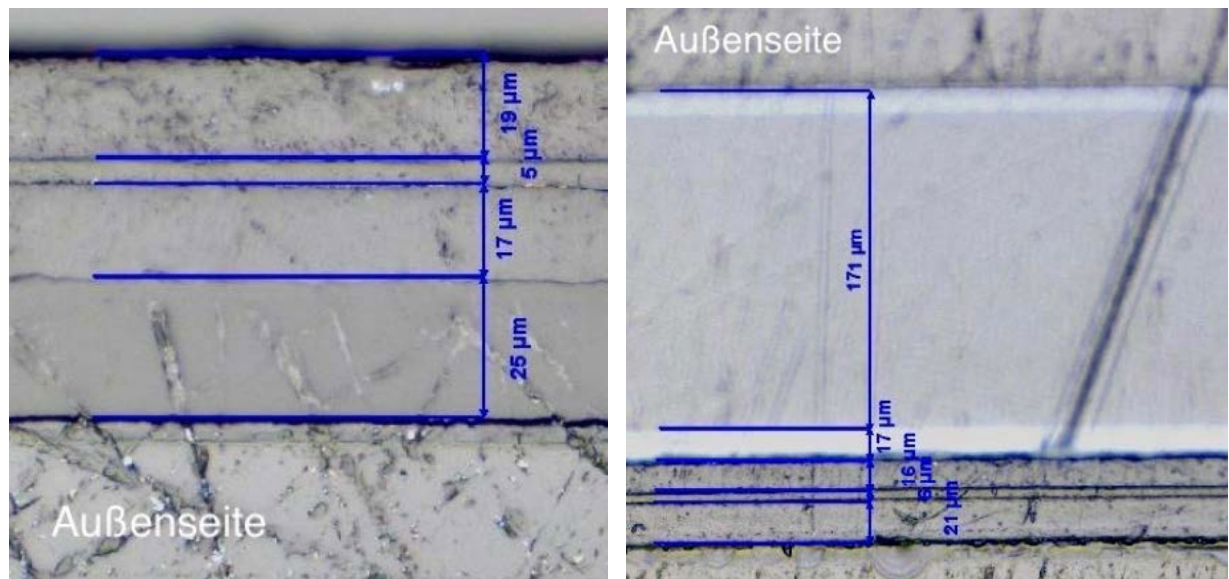


Abbildung 103: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 15; li. Deckel, r. Untertasse

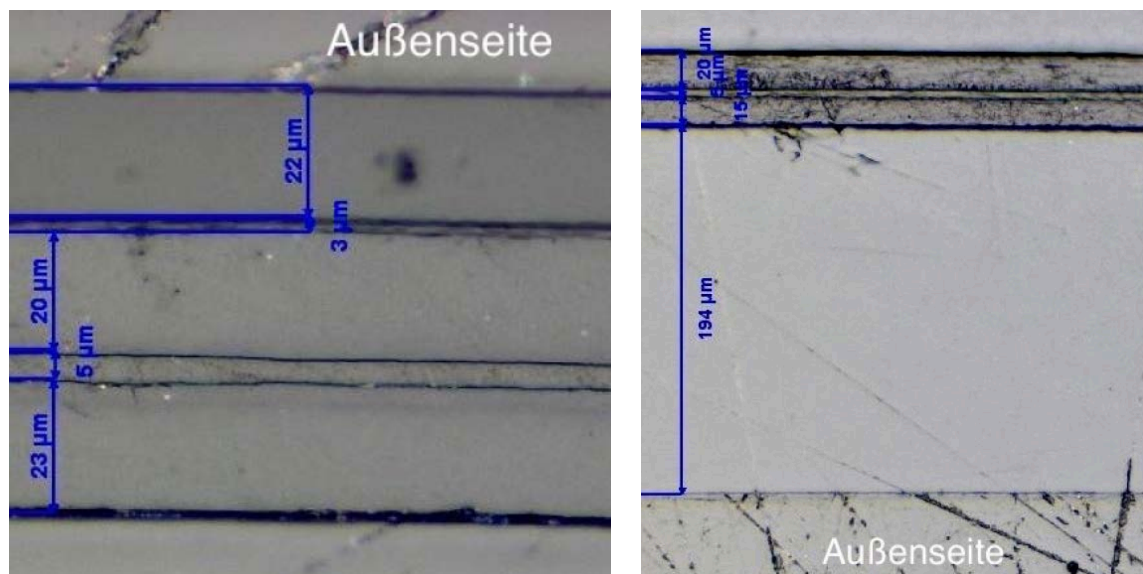


Abbildung 104: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 16; li. Deckel, r. Untertasse

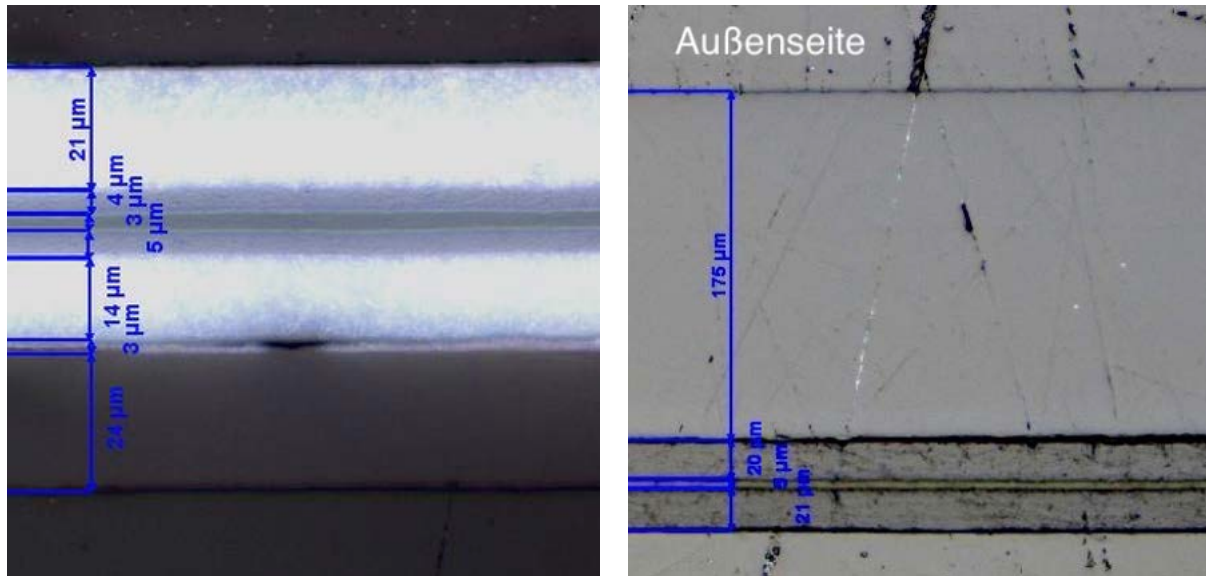


Abbildung 105: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 17; li. Deckel, r. Untertasse

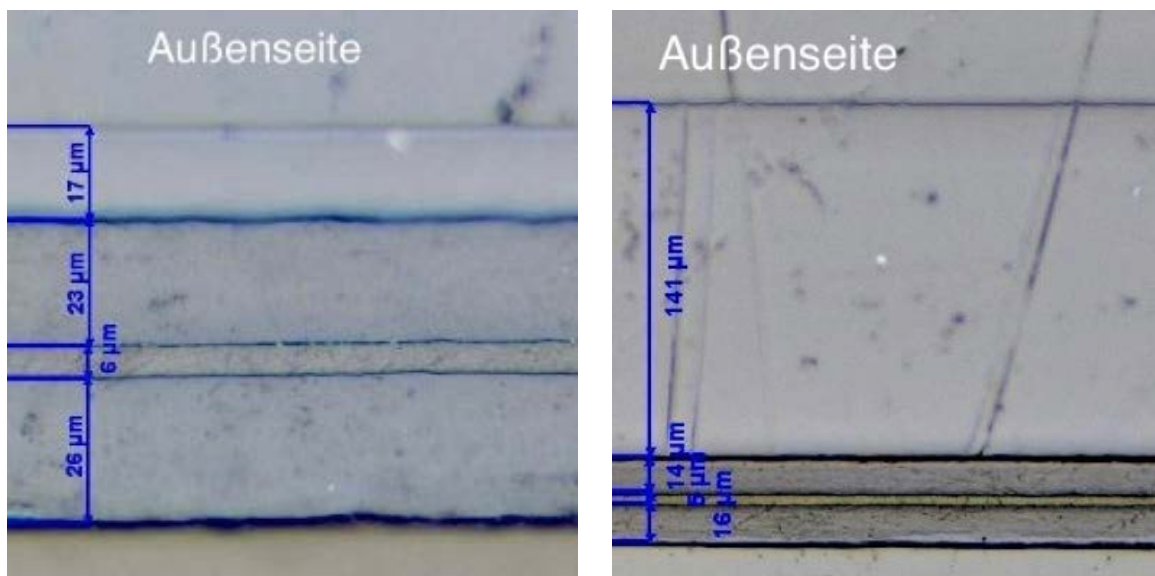


Abbildung 106: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 18; li. Deckel, r. Untertasse

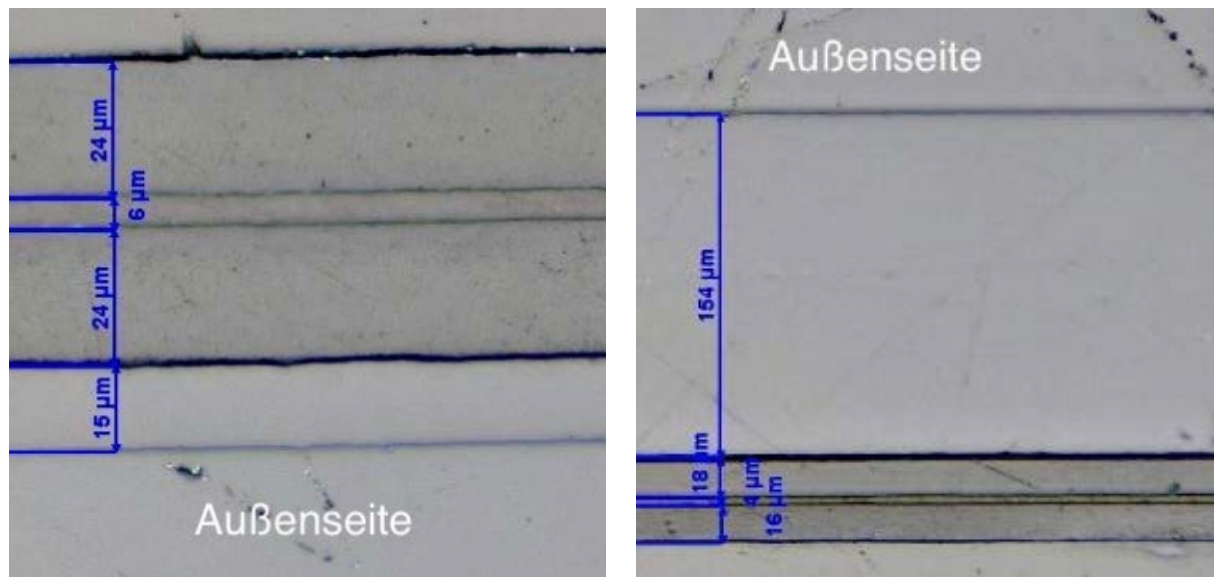


Abbildung 107: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 19; li. Deckel, r. Untertasse

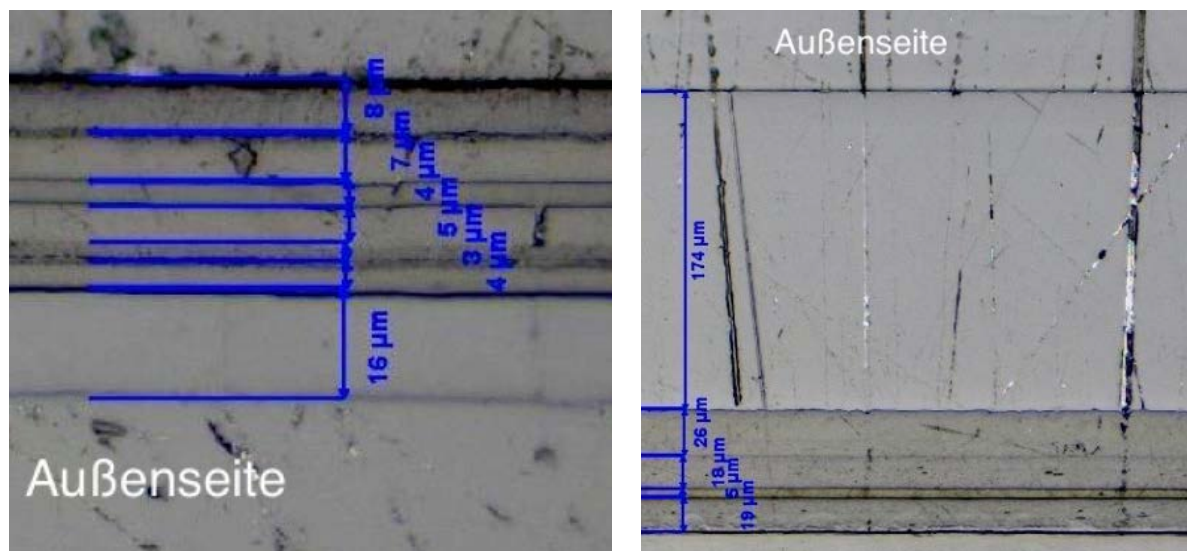


Abbildung 108: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 20; li. Deckel, r. Untertasse

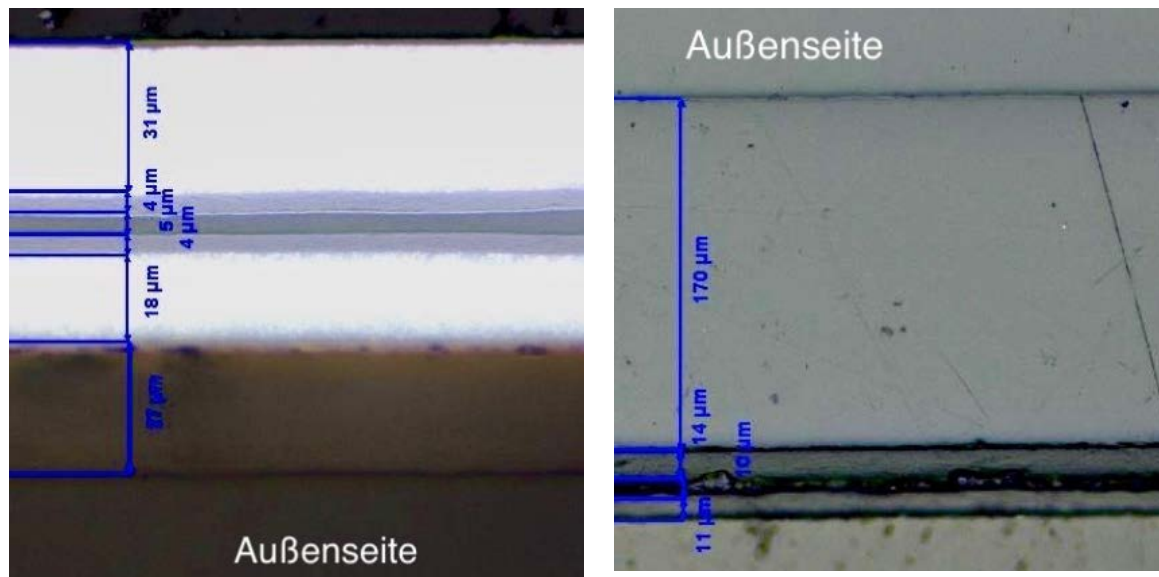


Abbildung 109: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 21; li. Deckel, r. Untertasse

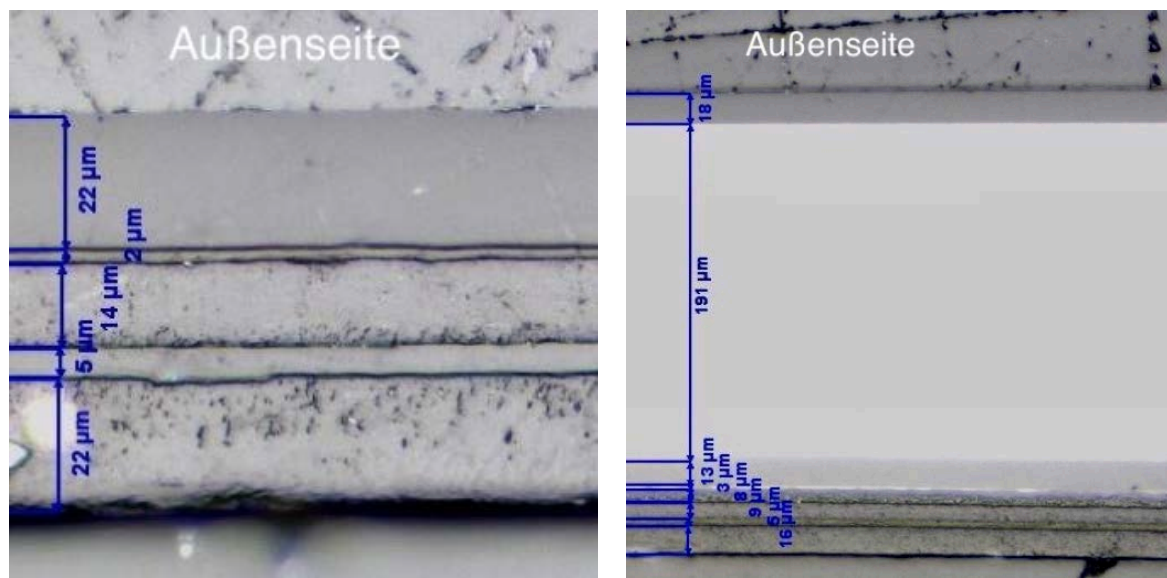


Abbildung 110: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 22; li. Deckel, r. Untertasse

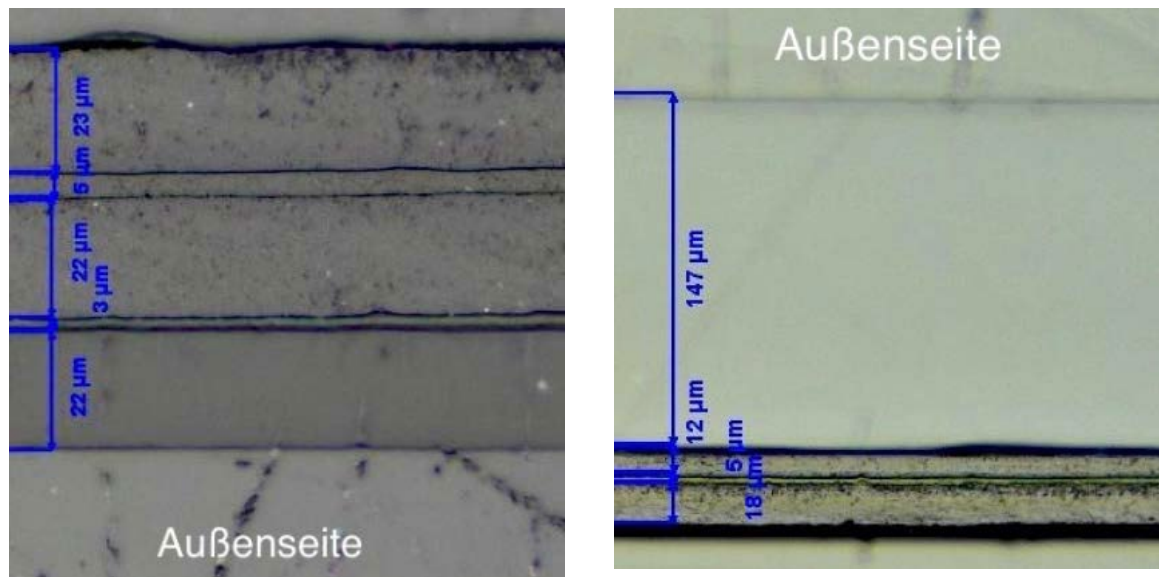


Abbildung 111: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 23; li. Deckel, r. Untertasse

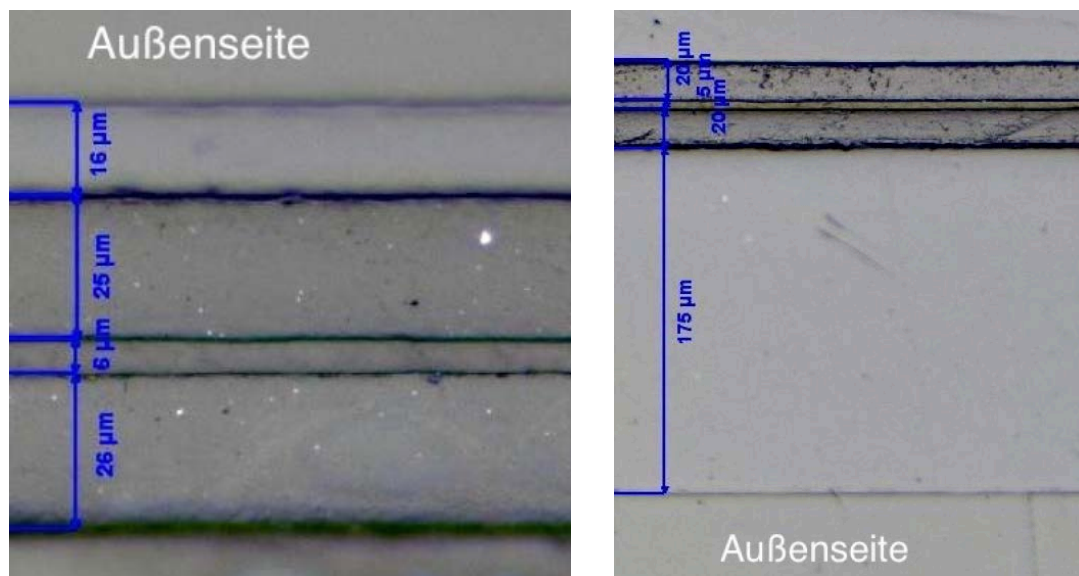


Abbildung 112: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 24; li. Deckel, r. Untertasse

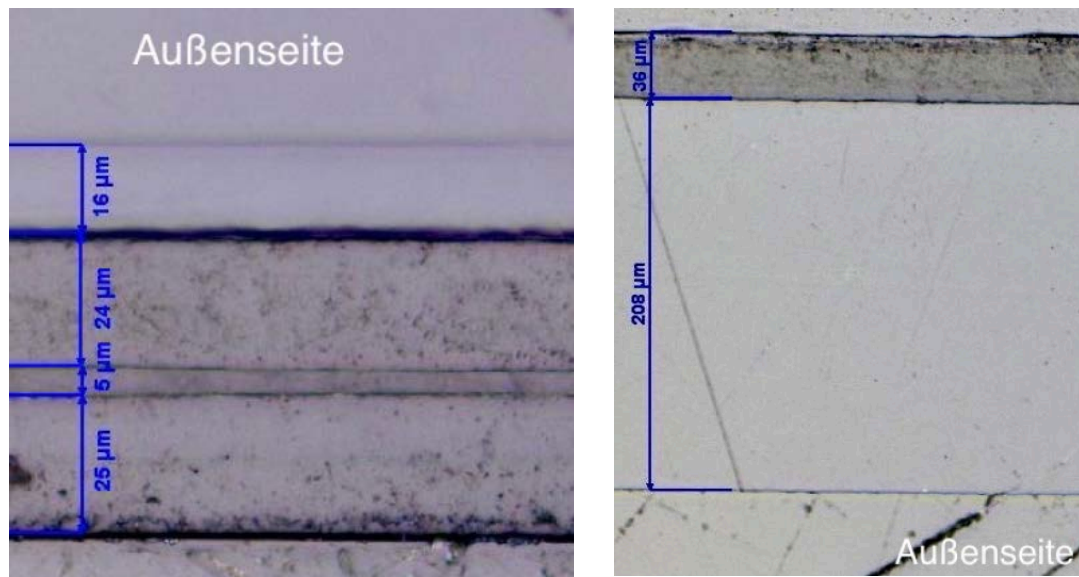


Abbildung 113: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 25; li. Deckel, r. Untertasse

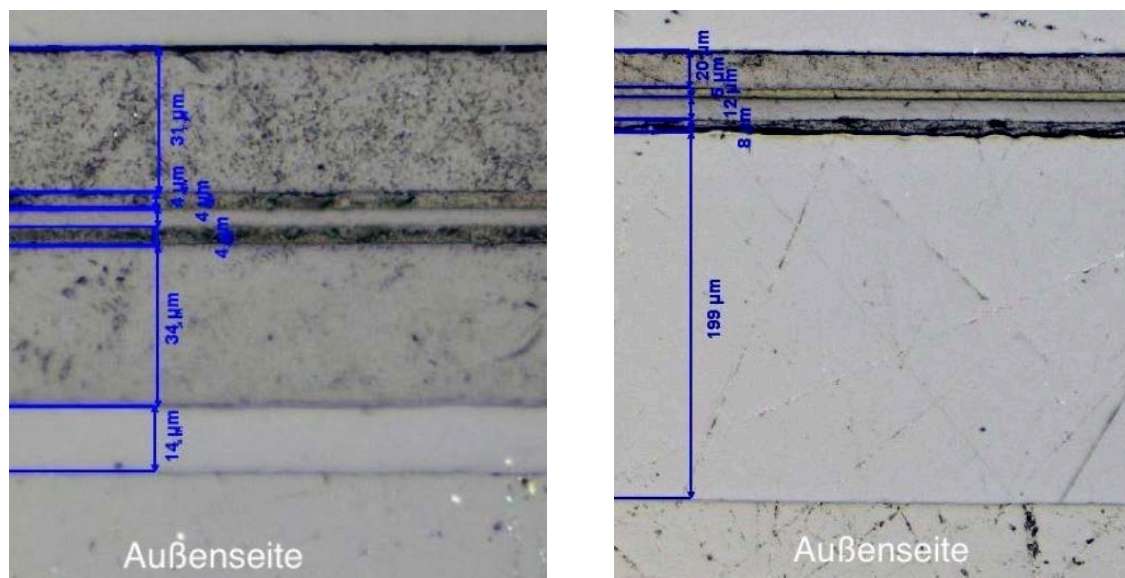


Abbildung 114: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 26; li. Deckel, r. Untertasse

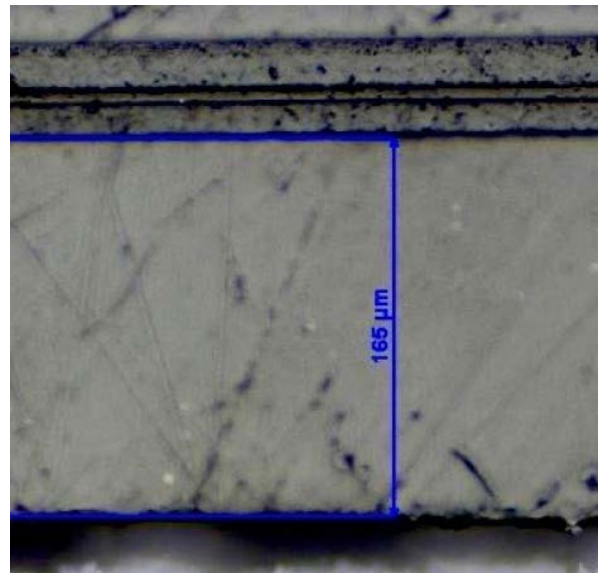
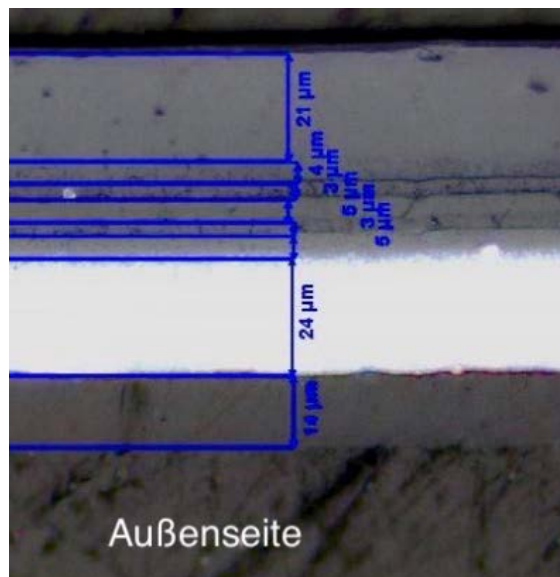


Abbildung 115: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 27; li. Deckel, r. Untertasse

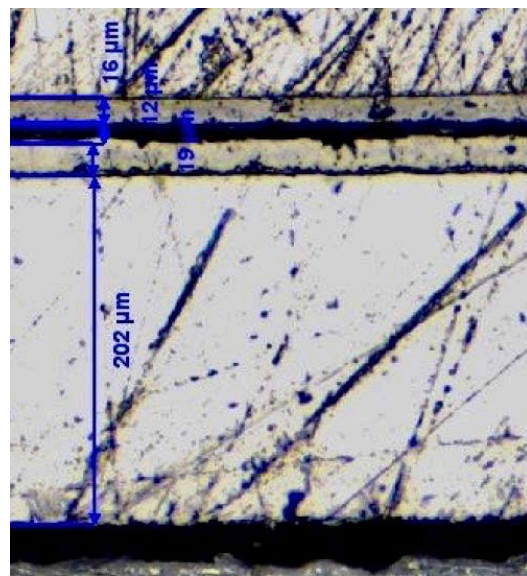
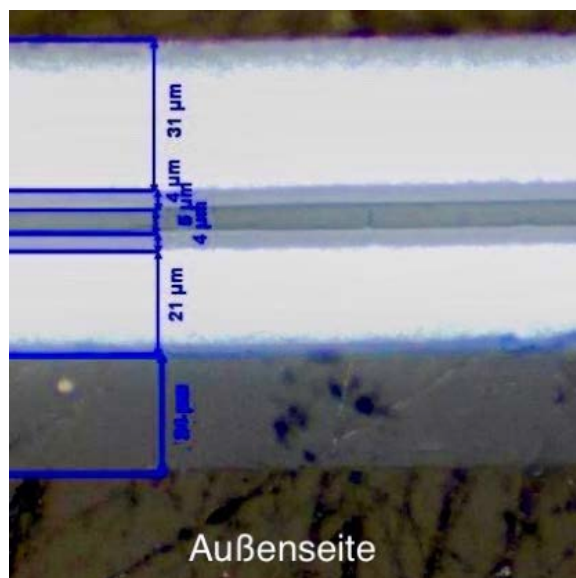


Abbildung 116: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 28; li. Deckel, r. Untertasse

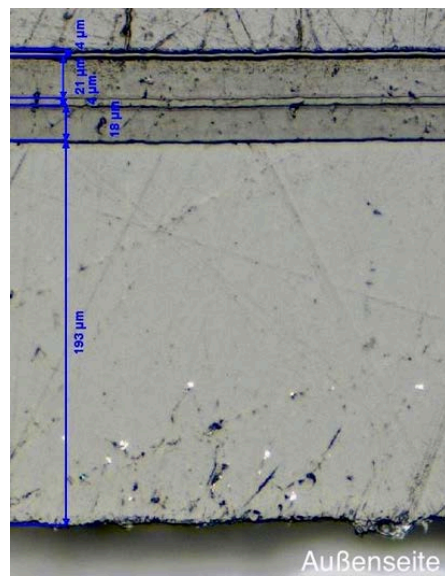
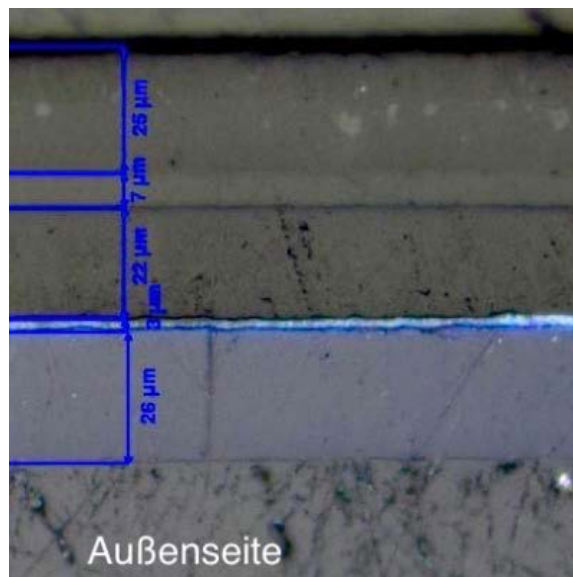


Abbildung 117: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 29; li. Deckel, r. Untertasse

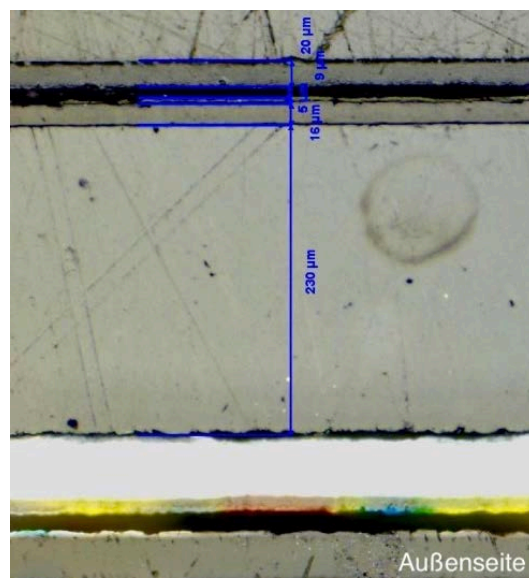
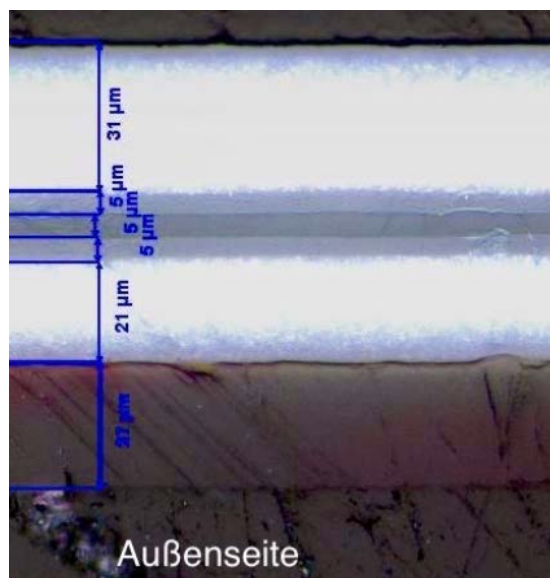


Abbildung 118: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 30; li. Deckel, r. Untertasse

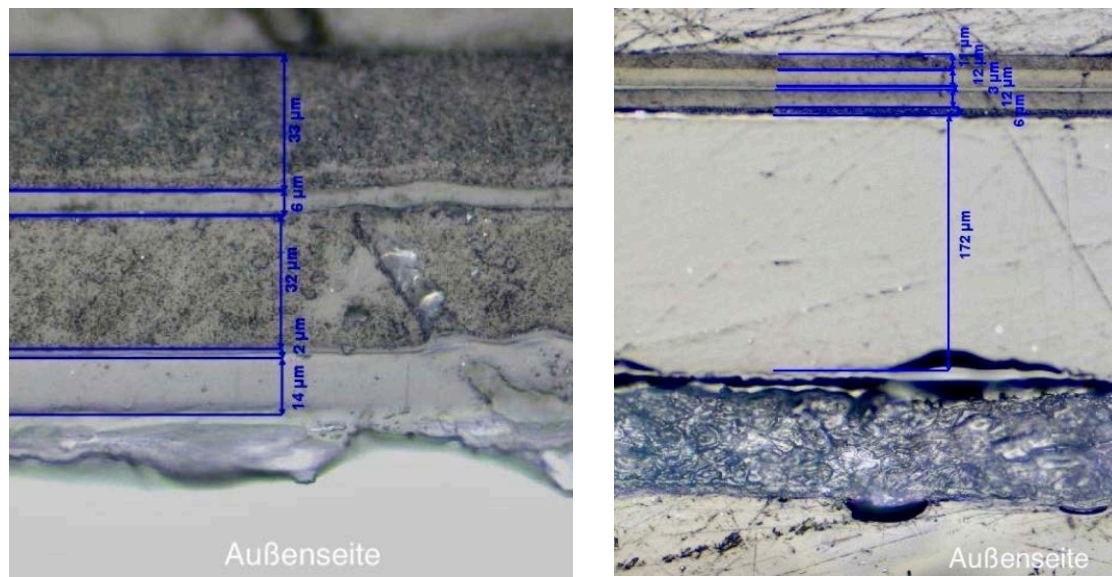


Abbildung 119: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 31; li. Deckel, r. Untertasse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Recycling-Prozess, Eigene Darstellung (Quelle: [3]).....	3
Abbildung 2: Überblick über untersuchten Polymere	5
Abbildung 3: Aufbau Mehrschichtverpackung, Eigene Darstellung (Quelle: [12]).....	5
Abbildung 4: Einteilung Herstellungsverfahren, Eigene Darstellung (Quelle:[15], [18]).....	8
Abbildung 5: Castextrusionsverfahren, Eigene Darstellung (Quelle: [19]).....	9
Abbildung 6: Blasextrusionsverfahren, Eigene Darstellung (Quelle: [20]).....	10
Abbildung 7: Extrusionslaminierung 1, Quelle: [17]	12
Abbildung 8: Extrusionslaminierung 2, Quelle: [8]	13
Abbildung 9: Trocken-Klebeverfahren, Quelle: [8]	14
Abbildung 10: Nass-Kaschierung, Quelle: [25].....	15
Abbildung 11: Aufbau Mehrschicht-Verpackung (Nass-Kaschierung), Quelle: [26]	16
Abbildung 12: Mechanismus UV Härtungsverfahren, Quelle: [27].....	17
Abbildung 13: vereinfachte Darstellung Hotmelt-Kaschierung, Quelle: [28].....	18
Abbildung 14: mögliche Effekte einer DSC-Kurve, Quelle: [29]	20
Abbildung 15: prinzipieller Aufbau eines Interferometers, Quelle: [33]	23
Abbildung 16: charakteristische Banden, Quelle: [35].....	25
Abbildung 17: Proben in Probenhalter	28
Abbildung 18: Oberseite einer fertig präparierten Probe.....	28
Abbildung 19: Überblick über alle untersuchten Proben.....	28
Abbildung 20: Strukturformel EVOH, Quelle: [20]	30
Abbildung 21: schematischer Aufbau LDPE, Quelle: [44]	32
Abbildung 22: schematischer Aufbau LLDPE, Quelle: [44].....	32
Abbildung 23: schematischer Aufbau HDPE, Quelle: [10].....	33
Abbildung 24: FTIR: Probe Nr. 13 Deckelinnenseite	34
Abbildung 25: Vergleich FTIR-Spektrum LDPE und LLDPE, Quelle: [51]	36
Abbildung 26: Vergleich DSC-Kurven LDPE, LLDPE, HDPE, Quelle: [52]	37
Abbildung 27: FTIR: Probe Nr. 11 Untertassenaußenseite	39
Abbildung 28: schematische Gliederung von PP.....	41
Abbildung 29: Einteilung der PP-Folien.....	42
Abbildung 30: FTIR: Probe Nr. 15 Deckelfolienaußenseite	43
Abbildung 31: Strukturformel PS, Quelle: [53].....	44
Abbildung 32: PET/KLEBER/PE/HV/EVOH/HV/PE	45
Abbildung 33: Basissubstanzen für Hotmelt-Klebstoffe, Eigene Darstellung (Quelle:[15]) ..	48
Abbildung 34: Probe Nr. 18: PET/KLEBER/PE/HV/EVOH/HV/PE	51
Abbildung 35: Mikroskopie-Aufnahme: Probe Nr. 25 Deckelfolie	52
Abbildung 36: DSC-Kurve: Probe Nr. 25 Deckelfolie.....	53
Abbildung 37: Overlay DSC Kurven: Probe Nr. 2 (grün) und Probe Nr. 25 (blau).....	54
Abbildung 38: Vergleich bei Vergrößerung x 50: li. Probe Nr. 2, r. Probe Nr. 25	54
Abbildung 39: Overlay DSC-Kurven: Deckelfolien.....	55
Abbildung 40: Overlay DSC-Kurven: Deckelfolien.....	56
Abbildung 41: Mikroskopie-Aufnahme: Probe Nr. 19 Deckelfolie	56
Abbildung 42: Overlay DSC-Kurven: Deckelfolien.....	57
Abbildung 43: Mikroskopie-Aufnahme: Probe Nr. 11 Deckelfolie	58
Abbildung 44: DSC-Kurve: Deckelfolie Probe Nr. 15	59
Abbildung 45: Overlay DSC-Kurven: Deckelfolien.....	60

Abbildung 46: Mikroskopie-Aufnahme: Probe Nr. 12 Deckelfolie	60
Abbildung 47: DSC-Kurve: Deckelfolie Probe Nr. 10	61
Abbildung 48: Mikroskopie-Aufnahme: Probe Nr. 10 Deckelfolie	62
Abbildung 49: Overlay DSC-Kurven: Untertassenfolien	63
Abbildung 50: Overlay DSC-Kurven: Untertassenfolien	63
Abbildung 51: Mikroskopie-Aufnahme: Probe Nr. 11 Untertassenfolie	64
Abbildung 52: Overlay DSC-Kurven: Untertassenfolien	65
Abbildung 53: Overlay DSC-Kurven: Untertassenfolien	66
Abbildung 54: Bsp. Nass-/ Trockenkaschierung	67
Abbildung 55: Bsp. Thermo-Kaschierung	68
Abbildung 56: Probe Nr.1 Untertasse Mikrotomaufnahme	68
Abbildung 57: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 26, 27, 29, 30	69
Abbildung 58: FTIR-Spektren: Probe Nr. 3	70
Abbildung 59: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 1, 17, 18, 31	VII
Abbildung 60: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 2, 3, 5, 6	VII
Abbildung 61: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 7, 8, 10, 11	VIII
Abbildung 62: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 12, 13, 19	VIII
Abbildung 63: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 14, 16, 21	IX
Abbildung 64: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 20, 15	IX
Abbildung 65: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 21, 22, 28	X
Abbildung 66: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 23, 24, 25	X
Abbildung 67: FTIR-Spektren: Untertasse Innenseite Proben 26, 27, 29, 30	XI
Abbildung 68: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 1, 2, 3, 4, 5	XI
Abbildung 69: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 7, 8, 10, 11, 15	XII
Abbildung 70: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 12, 28	XII
Abbildung 71: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 13, 19, 20, 30, 31	XIII
Abbildung 72: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 14, 16	XIII
Abbildung 73: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 17, 18, 21, 22, 23	XIV
Abbildung 74: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 24, 25, 28	XIV
Abbildung 75: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 26, 27	XV
Abbildung 76: FTIR-Spektren: Untertasse Außenseite Proben 29, 30	XV
Abbildung 77: FTIR-Spektren: Deckel Innenseite Proben 19, 21, 28, 29, 31	XVI
Abbildung 78: FTIR-Spektren: Deckel Innenseite Proben 2, 3, 6, 13, 25	XVI
Abbildung 79: FTIR-Spektren: Deckel Innenseite Proben 4, 5, 12, 14, 26	XVII
Abbildung 80: FTIR-Spektren: Deckel Innenseite Proben 1, 9, 18, 20, 24	XVII
Abbildung 81: FTIR-Spektren: Deckel Innenseite Proben 7, 13, 15, 16, 27	XVIII
Abbildung 82: FTIR-Spektren: Deckel Innenseite Proben 8, 10, 11, 17, 22, 23	XVIII
Abbildung 83: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 2, 17, 21, 25, 29	XIX
Abbildung 84: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 6, 19, 28, 30, 31	XIX
Abbildung 85: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 3, 5, 12, 13, 14	XX
Abbildung 86: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 4, 18, 20, 24, 26	XX
Abbildung 87: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 1, 7, 9, 13, 27	XXI
Abbildung 88: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 8, 10, 11	XXI
Abbildung 89: FTIR-Spektren: Deckel Außenseite Proben 15, 16, 22, 23	XXII
Abbildung 90: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 2; li. Deckel, r. Untertasse	XXII
Abbildung 91: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 3; li. Deckel, r. Untertasse	XXIII
Abbildung 92: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 4; li. Deckel, r. Untertasse (x 50)	XXIII
Abbildung 93: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 5; li. Deckel, r. Untertasse	XXIV
Abbildung 94: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 6; li. Deckel, r. Untertasse	XXIV

Abbildung 95: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 7; li. Deckel, r. Untertasse	XXV
Abbildung 96: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 8; li. Deckel, r. Untertasse	XXV
Abbildung 97: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 9; li. Deckel, r. Untertasse	XXVI
Abbildung 98: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 10; li. Deckel, r. Untertasse	XXVI
Abbildung 99: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 11; li. Deckel, r. Untertasse	XXVII
Abbildung 100: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 12; li. Deckel, r. Untertasse	XXVII
Abbildung 101: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 13; li. Deckel, r. Untertasse	XXVIII
Abbildung 102: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 14; li. Deckel, r. Untertasse	XXVIII
Abbildung 103: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 15; li. Deckel, r. Untertasse	XXIX
Abbildung 104: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 16; li. Deckel, r. Untertasse	XXIX
Abbildung 105: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 17; li. Deckel, r. Untertasse	XXX
Abbildung 106: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 18; li. Deckel, r. Untertasse	XXX
Abbildung 107: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 19; li. Deckel, r. Untertasse	XXXI
Abbildung 108: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 20; li. Deckel, r. Untertasse	XXXI
Abbildung 109: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 21; li. Deckel, r. Untertasse	XXXII
Abbildung 110: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 22; li. Deckel, r. Untertasse	XXXII
Abbildung 111: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 23; li. Deckel, r. Untertasse	XXXIII
Abbildung 112: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 24; li. Deckel, r. Untertasse	XXXIII
Abbildung 113: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 25; li. Deckel, r. Untertasse	XXXIV
Abbildung 114: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 26; li. Deckel, r. Untertasse	XXXIV
Abbildung 115: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 27; li. Deckel, r. Untertasse	XXXV
Abbildung 116: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 28; li. Deckel, r. Untertasse	XXXV
Abbildung 117: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 29; li. Deckel, r. Untertasse	XXXVI
Abbildung 118: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 30; li. Deckel, r. Untertasse	XXXVI
Abbildung 119: Mikroskopie-Aufnahmen Probe Nr. 31; li. Deckel, r. Untertasse	XXXVII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften der untersuchten Kunststoffe, Quelle:[8]	6
Tabelle 2: Schleif- bzw. Polierprogramm Probenpräparation	27
Tabelle 3: Dichtewerte der untersuchten Kunststoffe.....	29
Tabelle 4: Kristallitschmelztemperatur EVOH.....	31
Tabelle 5: Kennwerte LDPE.....	32
Tabelle 6: Kennwerte LLDPE	32
Tabelle 7: Kennwerte HDPE	33
Tabelle 8: Analyse FTIR-Spektrum PE, Quelle: [48], [49]	34
Tabelle 9: detaillierte Analyse FTIR-Spektrum PE, Quelle: [50].....	35
Tabelle 10: Kennwerte APET, BOPET, Quelle: [55].....	38
Tabelle 11: Analyse FTIR-Spektrum PET, Quelle: [56]	39
Tabelle 12: Übersicht PA-Typen	40
Tabelle 13: Übersicht PP-Typen.....	42
Tabelle 14: Analyse FTIR-Spektrum PP, Quelle: [49].....	43
Tabelle 15: Kennwerte PS, HIPS.....	44
Tabelle 16: G: Gut, M: Mittel, S: Schlecht, Quelle: [9]	46
Tabelle 17: Haftpartner Klebstoffe, Quelle: [9].....	46
Tabelle 18: Beispielhafte %-Massengehalt-Berechnung Probe Nr. 3	71
Tabelle 19: gemittelte Dichtewerte der untersuchten Kunststoffe.....	72
Tabelle 20: gemittelter Massengehalt: Gr.1_ Untertassen.....	72
Tabelle 21: gemittelter Massengehalt: Gr.1_ Deckel	73
Tabelle 22: gemittelter Massengehalt: Gr.2_ Deckel	73
Tabelle 23: gemittelter Massengehalt: Gr.3_ Deckel	73
Tabelle 24: gemittelter Massengehalt: Gr.4_ Deckel	73
Tabelle 25: Auswertung Deckelfolien_I.....	VII
Tabelle 26: Auswertung Deckelfolien_II.....	VII
Tabelle 27: Auswertung Deckelfolien_III	VIII
Tabelle 28: Auswertung Deckelfolien_IV	VIII
Tabelle 29: Auswertung Untertassenfolien_I	IX
Tabelle 30: Auswertung Untertassenfolien_II	IX
Tabelle 31: Proben ohne Schichtdickenbestimmung.....	X

Literaturverzeichnis

- [1] J.-P. Schweitzer *et al.*, “Ausgepackt: Über den Zusammenhang von Plastikverpackungen und Lebensmittelabfällen,” *Inst. Eur. Environ. Policy*, p. 28, 2018.
- [2] P. J. Fellows and P. J. Fellows, “Packaging,” in *Food Processing Technology*, Elsevier, 2017, pp. 949–1044.
- [3] R. G. Panz, “Recycling,” p. 49, 2013.
- [4] APK AG, “Mersalen® LDPE HDPE ReCompounds.” [Online]. Available: <https://www.apk-ag.de/en/>. [Accessed: 14-Dec-2018].
- [5] G. GbR, “‘Newcycling’ trennt Kunststoffschichten in chemisch-physikalischem Verfahren,” 2018. [Online]. Available: <https://www.labelpack.de/newcycling-trennt-kunststoffschichten-in-chemisch-physikalischem-verfahren/>. [Accessed: 01-Dec-2018].
- [6] M. Wert *et al.*, “Einsatz von Regranulat in der flexiblen Verpackung erweitert,” 2018. [Online]. Available: <https://www.labelpack.de/einsatz-von-regranulat-in-der-flexiblen-verpackung-erweitert/>. [Accessed: 15-Nov-2018].
- [7] A. Klingbeil, M. Ruks, and D. D. Flexibles, “Ein Stoff, eine Lösung,” vol. 10, 2018.
- [8] E. L. Bradley *et al.*, *Packaging Materials: 9. Multilayer Packaging for Food and Beverages*, vol. 46, no. 7. 2010.
- [9] T. I. Butler and B. A. Morris, “PE based multilayer film structures,” *Multilayer Flex. Packag.*, pp. 205–230, 2010.
- [10] K. W. McMillin, “Advancements in meat packaging,” *Meat Sci.*, vol. 132, pp. 153–162, Oct. 2017.
- [11] C. A. Daniels, “Unique performance from specialty resins.” TAPPI Film, 1985.
- [12] G. Bleisch, H.-C. Langowski, and J.-P. Majschak, *Lexikon Verpackungstechnik*. Behr’s Verlag DE, 2014.
- [13] P. Delassus, “Transport of unusual molecules in polymer films,” *TAPPI J.*, vol. 68, pp. A21–A21, 1985.
- [14] M. Römer, “Rückblick und Vorschau – Kaschierklebstoffe für Lebensmittelverpackungen,” *InnoLetter 2013*, p. 5, 2013.
- [15] G. Habenicht, *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 2008.
- [16] M. Kaßmann, *Grundlagen der Verpackung: Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung*. 2014.

-
- [17] R. Heiss, "Verpackung von Lebensmitteln: Anwendung der wissenschaftlichen Grundlagen in der Praxis," 2013. [Online]. Available: https://books.google.at/books?id=jIWbGAAQBAJ&dq=kaschieren+verpackung&hl=d&source=gbs_navlinks_s. [Accessed: 28-Jul-2018].
- [18] D.-I. B. Mumelter, "mündliche Mitteilung Oktober 2018."
- [19] uspackaging, "cast-extrusion," 2014. [Online]. Available: <https://packagingblog.org/2014/01/22/plastic-extrusion-for-stretch-film/>. [Accessed: 01-Nov-2018].
- [20] P. Elsner, P. Eyerer, and T. Hirth, *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*. 2012.
- [21] M. Herrmann and A. Kremers, "Europäische patentanmeldung (51)," vol. 1, no. 19, pp. 1–63, 2010.
- [22] D. I. M.-W. Römer, "LF-Kaschierung." [Online]. Available: <http://www.innoform-coaching.de/blog/wp-content/uploads/2011/10/Bild-2-LF-Kaschierung.png>. [Accessed: 31-Oct-2018].
- [23] R. Baird and D. Baird, "Industrial plastics," *South Holland, Illinois: The*, p. 18, 1982.
- [24] A. Mieth, E. Hoekstra, and C. Simoneau, *Guidance for the identification of polymers in multilayer films used in food contact materials*. 2016.
- [25] sicht-pack HAGNER GmbH, "PET Folien, Verbundfolien, APET, PETG, GAG - Folienhersteller sicht-pack Hagner." [Online]. Available: <https://www.sicht-pack-hagner.de/de/folienherstellung/kaschieren/>. [Accessed: 03-Aug-2018].
- [26] sicht-pack HAGNER GmbH, "PET Folien, Verbundfolien, APET, PETG, GAG - Folienhersteller sicht-pack Hagner," *sicht-pack HAGNER GmbH*. [Online]. Available: <https://www.sicht-pack-hagner.de/de/folienherstellung/kaschieren/>. [Accessed: 03-Aug-2018].
- [27] U. INC., "UV curing." [Online]. Available: <https://www.ushio.co.jp/en/technology/casestudy/101021.html>. [Accessed: 09-Dec-2018].
- [28] Archbond, "Hot-Melt." [Online]. Available: <https://www.archbond.com/de/moglichkeiten/>. [Accessed: 10-Dec-2018].
- [29] G. W. Ehrenstein and G. Riedel, "Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen." Trawiel, Pia, München, p. 397, 2003.
- [30] W. Weißbach, M. Dahms, and C. Jaroschek, *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. 2015.
-

-
- [31] A. Fortunato, *DSC: History, instruments and devices*. Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [32] Mettler Toledo, “12: DSC-Kurven interpretieren; Teil 2: Isotherme Messungen,” *Mettler Toledo Man.*, pp. 1–24, 2000.
- [33] H. D. Staesche, “FT-IR-Spektroskopie,” *Uni Münster*, pp. 1–15.
- [34] J. Dechant, “Ultrarotspektroskopische Untersuchungen an Polymeren.” p. 516, 1972.
- [35] B. Optik, “charakteristische FTIR-Banden.” .
- [36] E. E. Nv, “EVALTM: EVOH Barrier Resins.”
- [37] L. AG, “Polystyrol Typen – Herstellung und Verarbeitung.” [Online]. Available: <http://www.chemie.de/lexikon/Polystyrol.html>. [Accessed: 08-Jul-2018].
- [38] A. Nakano, “Ethylene vinyl alcohol co-polymer as a high-performance membrane: An EVOH membrane with excellent biocompatibility,” *High-Performance Membr. Dialyzers*, vol. 173, pp. 164–171, 2011.
- [39] R. Catalá *et al.*, *Antimicrobial Active Packaging Systems Based on EVOH Copolymers*. Elsevier Inc., 2016.
- [40] C. Maes, W. Luyten, G. Herremans, R. Peeters, R. Carleer, and M. Buntinx, “Recent Updates on the Barrier Properties of Ethylene Vinyl Alcohol Copolymer (EVOH): A Review Recent Updates on the Barrier Properties of Ethylene Vinyl,” vol. 3724, 2018.
- [41] arm-alysis, “Schmelzpunkt EVOH Barrierschicht mittels Dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) bestimmen,” 2015. [Online]. Available: <https://www.arm-alysis.de/schmelzpunkt-evoh-barrierschicht-mittels-dynamischer-differenzkalorimetrie-dsc-bestimmen/>. [Accessed: 14-Jul-2018].
- [42] A. Orlovic, “The Effects of Functionalization on the Thermal and Tribo-Mechanical Behaviors of Neat and Grafted Polyeth The Effects of Functionalization on the Thermal and Tribo-Mechanical Behaviors of Neat and Grafted Polyethylene Nanocomposites,” no. July 2013, 2018.
- [43] R. Arm, “Charakterisierung von Siegelschichten bei Verpackungsfolien.”
- [44] A. Peacock, *Handbook of polyethylene: structures: properties, and applications*. CRC Press, 2000.
- [45] I. Analytical Answers, “Differential Scanning Calorimetry,” 2016.
- [46] H. E. Baur, A. Tim, and N. Rudolph, “Verarbeitung von Polyethylen,” pp. 37–40, 2013.
- [47] H. E. Baur, A. Tim, and N. Rudolph, “PE-LD PE-LLD PE-HD PE-HD-HMW PE-HD-

- UHMW Chemikalienbeständigkeit von Polyethylen,” pp. 1–4, 2013.
- [48] J. . Gulmine, P. . Janissek, H. . Heise, and L. Akcelrud, “Polyethylene characterization by FTIR,” *Polym. Test.*, vol. 21, no. 5, pp. 557–563, Jan. 2002.
- [49] M. D. Jordi, “Case Study FTIR for Identification of Contamination.”
- [50] C. Y. Liangt and S. Krimm, “Infrared Spectra of High Polymers . VI . Polystyrene,” *J. Polym. Sci.*, vol. XXVII, no. 1958, pp. 241–254, 1958.
- [51] A. Prasad, “A Quantitative Analysis of LDPE and LLDPE Blends by DSC and FTIR,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 36, p. 1717ff, 1996.
- [52] I. für P. Chemie and G.-A.-U. Göttingen, “Charakterisierung von Polymeren mit der DSC,” pp. 1–17, 2004.
- [53] B. A. Morris and B. A. Morris, “Commonly Used Resins and Substrates in Flexible Packaging,” in *The Science and Technology of Flexible Packaging*, Elsevier, 2017, pp. 69–119.
- [54] R. W. Cordula Binder, Renate Dylla, Alexander Gerber, Kathrin Seidel, “Nachhaltige Verpackung von Bio-Lebensmitteln: Ein Leitfaden für Unternehmen,” *Bund Ökologische Leb.*, p. 90, 2011.
- [55] P. D.-I. J.-P. M. Dr.-Ing. Günter Bleisch, Prof. Dr. Horst-Christian Langowski, “Lexikon Verpackungstechnik.” p. 708, 2014.
- [56] J. M. Andanson and S. G. Kazarian, “In situ ATR-FTIR spectroscopy of poly(ethylene terephthalate) subjected to high-temperature methanol,” *Macromol. Symp.*, vol. 265, no. 1, pp. 195–204, 2008.
- [57] A. Singh *et al.*, “Photo-induced synthesis of polypyrrole-silver nanocomposite films on N-(3-trimethoxysilylpropyl)pyrrole-modified biaxially oriented polyethylene terephthalate flexible substrates,” *RSC Adv.*, vol. 3, no. 16, p. 5506, 2013.
- [58] S. Koltzenburg, M. Maskos, and O. Nuyken, *Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen*. 2014.
- [59] B. Rosenau, “Polyamide (PA),” *Kunststoffe*, pp. 94–99, 2007.
- [60] R. E. S. Granul, C. Il, I. Dans, A. Op, and B. Op, “Polyamide 6,” pp. 6–8, 1986.
- [61] L. MatWeb, “PA6/66 melting point.” [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=3b1cf6a8aae04d4091c9e75ad87601f1&ckck=1>. [Accessed: 30-Oct-2018].
- [62] Y. Ma, T. Zhou, G. Su, Y. Lia, and A. Zhanga, “Understanding the crystallization behavior of polyamide 6/polyamide 66 alloys from the perspective of hydrogen bonds:

- projection moving-window 2D correlation FTIR spectroscopy and the enthalpy.”
- [63] “Glossar,” *RCT Reichelt Chemietechnik GmbH + Co.*, pp. 5–9.
- [64] G. Abts, “Chemikalienbeständigkeit von Polypropylen,” *Kunststoff-Wissen für Einsteiger*, pp. 112–113, 2016.
- [65] B. S. Joachim Buddrus, “Grundlagen der Organischen Chemie,” p. 974, 2015.
- [66] D. C. Nagel-Ogric and P. D. O. Nuyken, “Polypropylen Struktur von Polypropylen,” 2016. [Online]. Available: <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/andere/polypropylen/polypropylen.vlu/Page/vsc/de/ch/9/mac/andere/polypropylen/struktur.vscml.html>. [Accessed: 06-Aug-2018].
- [67] D. B. W. Dr. Johannes Bergmair, Dr. Michael Washüttl, “Prüfpraxis für Kunststoffverpackungen: Lebensmittel-, Pharma- und Kosmetikverpackungen,” p. 42, 2012.
- [68] H. Polystyrene, “HIPS (High-Impact Polystyrene) ist ein thermoplastisches Polymer, das durch Polymerisation von Polybutadien zu Polystyrol gefertigt wird.,” pp. 4–7.
- [69] P. Schwarzmann, *Thermoformen in der Praxis*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2016.
- [70] M. G. Botros, “Fundamentals of the Adhesion Mechanisms at the Plexar ® Tie-Layer Resin / EVOH Interface,” pp. 1–10, 1994.
- [71] H. F. Giles, E. M. Mount, and J. R. Wagner, “Coextrusion Applications,” *Extrus. Defin. Process. Guid. Handb.*, pp. 373–389, 2014.
- [72] T. Koltzenburg, “High-Barrier Packaging: Yesterday, Today, and Tomorrow.” 2000.
- [73] B. A. Morris, “Effect of process and material parameters on interlayer peel strength in coextrusion coating, film casting and film blowing,” *J. Plast. Film Sheeting*, vol. 26, no. 4, pp. 343–376, 2010.
- [74] J. H. Schut, “Microlayer films: New uses for hundreds of layers,” *Plast. Technol.*, vol. 52, no. 3, pp. 54–57, 2006.
- [75] J. Klebstoffe, “Dispersionsklebstoffe,” *Jowat SE*. [Online]. Available: <https://www.jowat.com/de-DE/klebstoffe/dispersionsklebstoffe/>. [Accessed: 12-Dec-2018].
- [76] K. B. S. Walter Brockmann, Paul Ludwig Geiß, Jürgen Klingen, *Klebtechnik: Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*. 2012.
- [77] R. K. GmbH, “Eine kurze Einführung in das Thema Kleben.” [Online]. Available:

- <http://www.kleber-klebstoff-beratung.de/infos/einfuehrung-03-dispersionsklebstoffe-leime.php>. [Accessed: 15-Dec-2018].
- [78] F. Pardal and C. Gandolphi, “Mehrschichten-Folien,” 2003.
- [79] M. Schubert, *Biopolymere als definierte Permeationschicht für aktive Lebensmittelverpackungen*. 2010.
- [80] N. Alipour *et al.*, “Structure and properties of polyethylene-based and EVOH-based multilayered films with layer thicknesses of 150 nm and greater,” *Eur. Polym. J.*, vol. 64, pp. 36–51, 2015.
- [81] J. Costa, “Selecting the proper polyamide for multilayer food packaging films : considerations.”
- [82] H. T. Gmbh, “Oberfolie für MAP-Packungen,” 2018.