Abschlussbericht 2003

Grundlegende Untersuchungen zum Verhalten von PO-Folien im technologischen Verarbeitungsprozess als Voraussetzung für die Ablösung von PVC-Folien in der Möbelindustrie

ihd®
Institut für Holztechnologie
Dresden gGmbH

Arbeitsgebiete ihd/eph

Biologie / Holzschutz

- Holzanatomie
- Mikrotechnologie
- Holzeinsatz
- Holzvergütung
- Holzbiotechnologie
- Holzschutz
- Mykologische Prüfungen
- Schadensgutachten

Bearbeitung von Holz und Holzwerkstoffen

- Verfahrensentwicklung / Verfahrensoptimierung
- Werkzeug- und Maschinenuntersuchung
- Fertigungsprozessanalyse
- Prozeßmeßtechnik

Gestaltung von Fertigerzeugnissen

- Möbelentwicklung
- Entwicklung von Bauelementen
- Innenarchitektur
- Ausstellungsgestaltung
- Grafikdesign
- Gutachten

Werkstoffprüfung / Fremdüberwachung

- Holz / Holzwerkstoffe
- Klebstoffe
- Lacke / Anstrichstoffe
- Dekorfolien / Laminate
- Holzschutzmittel
- Möbel
- Bauelemente

Werkstoffe aus Holz

- Produkt- und Verfahrensentwicklung
- Rohstoffcharakterisierung und Rohstoffeinsatz
- Bindemitteleinsatz
- Werkstoffanwendungen
- Werkstoffvergütung
- Werkstoffverbunde

Produktprüfung

- Büromöbel
- Wohnmöbel
- Schul- und Labormöbel
- Bauelemente (Fenster, Türen, Fußböden, Treppen ...)
- Gerätesicherheit (Möbel)
- Prüf- u. Überwachungsstelle (Fenster/Türen)

Oberflächenbehandlung von Holz und Holzwerkstoffen

- Oberflächenwerkstoffe (feste, flüssige, pulverförmige)
- Verfahrenstechnologie
- Oberflächenvergütung
- Schadensanalyse

Qualitäts- und Umweltmanagement

- Zertifizierung nach DIN EN ISO 9001
- Zertifizierung nach DIN EN ISO 14001
- Validierung nach EMAS-Verordnung

Chemie / Umwelt

- Verfahrensentwicklung
- Schadstoffanalytik
- Emissionsmessungen an Produkten und Anlagen (Stäube, Gase, Lösemittel, Geruch ...)
- Umweltgutachten
- Abfallproblematik
- Holzschutzmittel

Beratung für das holzverarbeitende Gewerbe

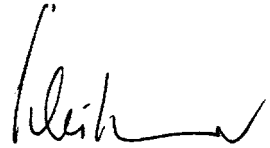
- Arbeitsplatzgestaltung
- Holzstaub / Absaugungsanlagen
- Lärmschutz
- Reststoffverwertung

Qualifizierung / Weiterbildung

- Lehrgänge, Seminare
- Kolloquien
- Workshops
- Vorlesungen / Praktika
- Betreuung von Diplomarbeiten

Informationsvermittlung

- Online-Datenbank „HOLZtechnologie“
- Informationsvermittlung
- Recherchen zu Literatur, Patenten, Normen
- Markt- und Trendanalysen
- Literaturstudien

INSTITUT	Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH
PROJEKT	Grundlegende Untersuchungen zum Verhalten von PO-Folien im technologischen Verarbeitungsprozess als Voraussetzung für eine Ablösung von PVC-Folien in der Möbelindustrie
FÖRDERINSTITUTION	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Projektträger des BMBF Umwelttechnik
FÖRDERKENNZEICHEN	01 RC 0051
BEARBEITUNGSZEITRAUM	01.03.2001 - 28.02.2003
RESSORTLEITER	Dr.-Ing. I. Fuchs
VERANTW. BEARBEITER	Dipl.-Ing. Matthias Weinert
UNTERSCHRIFT	 Dr. rer. nat. M. Scheithauer Geschäftsführerin ihd
DATUM	Dresden, den 26. 08. 2003

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgaben- und Zielstellung 3
1.1 Aufgabenstellung 3
1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 4
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 6

2 Fehleranalyse bei der 3D-Beschichtung in der ALNO Produktion 6
2.1 Produktionsablauf und Probleme 6
2.2 Methode/ Durchführung der Fehleranalyse 8
2.3 Ergebnisse 10

3 Industrieversuche zur Untersuchung verschiedener Fehlerabhängigkeiten 12
3.1 Herstellung der Bauteile 12
3.2 Fehlerbeurteilung 13
3.2.1 Methode/ Durchführung 13
3.2.2 Ergebnisse 13
3.3 Festigkeitsbeurteilung 15
3.3.1 Messmethode 15
3.3.2 Prüfkörperauswahl und -herstellung 17
3.3.3 Ergebnisse 18

4 Horizontale Beschichtung von Prüfkörpern mittels 3D-Laborpresse 22
4.1 Arbeitsweise der 3D-Laborpresse 22
4.2 Versuchsdurchführung 24
4.3 Auswertung/ Ergebnisse 26
4.3.1 Auswertung der Rollenschälprüfungen 26
4.3.2 Mikroskopische Untersuchungen 28

5 3D-Beschichtung von Versuchsbauteilen 29
5.1 Bauteilherstellung 29
5.2 Bestimmung der Festigkeit des Klebverbundes an der Schmalfläche 30
5.3 Prüfung nach AMK-Merkblatt 09/2002 30
5.4 Ergebnisse 32
5.5 Mikroskopische Untersuchungen 33
5.6 Ergebnisse 39

6 Bestimmung von Materialeigenschaften 40
6.1 Eingesetzte Materialien 40
6.1.1 Thermoplastische Folien 40
6.1.1.1 PVC 40
6.1.1.2 Polyolefine 40
6.1.2 PUR-Dispersionsklebstoffe 41
6.1.3 Primer (Haftvermittler) 43
6.1.4 MDF 43
6.2 Thermische Beanspruchung der Materialien im Verarbeitungsprozess 44
6.3 Thermische Analysen 46
6.3.1 Messprinzipien 47
6.3.1.1 DSC 47
6.3.1.2 DMA 48
6.3.1.3 TMA 50
6.3.2 Ergebnisse der thermischen Analysen der Folien 51
6.3.2.1 DSC 51
6.3.2.2 DMA 54
6.3.2.3 TMA 55

6.3.3 Ergebnisse der thermischen Analysen der Klebstoffe 58
6.3.3.1 DSC 58
6.3.3.2 DMA 59
6.4 Weitere Untersuchungen 59
6.4.1 ABES – Zugscherversuch 59
6.4.1.1 Messprinzip 59
6.4.1.2 Durchführung 60
6.4.1.3 Ergebnisse 61
6.4.2 Untersuchungen der Folienrückseite bezüglich Primereigenschaften 61
6.4.2.1 Benetzungsverhalten der Folien vor und nach Verarbeitung 61
6.4.2.2 Mikroskopische Untersuchungen der Folien vor und nach der Verarbeitung 62
6.4.3 Dehnungsverhalten der Folien beim Verarbeitungsprozess 62

7 Zusammenfassung 67

8 Ausblick 69

9 Literaturverzeichnis 70

10 Abbildungsverzeichnis 72

11 Tabellenverzeichnis 73

12 Anlagen 74

1 Aufgaben- und Zielstellung

1.1 Aufgabenstellung

Gesamtziel des Vorhabens ist die Sicherung der qualitätsgerechten Verarbeitung von PO-Folien als Ersatz für PVC-Folien bei der 3D-Beschichtung von Möbelteilen.

Die Verbesserung der Verarbeitbarkeit von PO-Folien hinsichtlich ihres Einsatzes in der Möbelindustrie soll durch folgende Arbeitsschritte realisiert werden:

- Analyse der das 3D-Verfahren qualitativ und quantitativ beeinflussenden technologischen Parameter an den Schwachstellen:
  - Verklebung Platte/Folie im Bereich der Bauteilkanten und Profilierungen,
  - Dehnungs-/Schrumpfverhalten der Folien auf den Flächen und in den Bauteilecken,
  - Temperaturverhalten der Folien beim Thermoform-Verfahren (eingeschränkter Temperaturbereich des Verarbeitungsfensters).
- Ermittlung von physikalischen Kenngrößen zur Charakterisierung der Verklebung von PO-Folien (modifizierte PP-Folie) im Vergleich mit PVC-Folie.
- Optimierung von Folie, Primer und Klebstoff
- Ableitung technologischer Maßnahmen zur sicheren Ablösung von PVC-Folien durch umweltgerechte PO-Folien.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Dieses Forschungsvorhaben wurde als Verbundprojekt bearbeitet.
Zu den Verbundpartnern gehören folgende Firmen:

Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH (ihd)
Zellescher Weg 24
01217 Dresden
Bearbeitung und Koordinierung des Forschungsvorhabens,
Durchführung der Laborversuche auf einer variablen Laborpresse
(sowohl Membran- als auch Thermoform-Verfahren)

Fa. ALNO AG Küchen GmbH – Folienverarbeiter
88629 Pfullendorf
Durchführung der Ist-Stands-Analyse
Durchführung der Industrieversuche
Späterer Hautverwerter der Ergebnisse des Verbundprojektes

Konrad Hornschuch AG – Folienhersteller
Salinenstraße 1
74679 Weißbach
Modifizierung der PO-Folien bezüglich Kristallinitätsgrad (Wärmekapazität),
Primerauftragsmenge, Primerraster,
Bereitstellung vergleichbar konfektionierter PVC-Folien

Forbo-Helmitin GmbH – Klebstoffhersteller
Zweibrücker Str. 185
66954 Pirmasens
Variation des Klebstoffes hinsichtlich Viskosität, Feststoffgehalt, Trocknungstemperatur

Die folgenden Firmen beteiligen sich an dem Verbundvorhaben durch die kostenfreie Bereitstellung von Versuchsmaterial (Trägerwerkstoff) bzw. durch die Gewährung eines Rabattes für die im Vorhaben notwendige 3D-Laborpresse.

Hornitex Werke Nidda – Hersteller MDF-Trägermaterial
Ludwigstraße
63667 Nidda

Robert Bürkle GmbH – Hersteller von 3D- und Thermoformpressen
Postfach 160
72231 Freudenstadt

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Entsprechend der Abstimmung zwischen den Beteiligten an dem Verbundprojekt wurden mehrere Arbeitsetappen vorgesehen.

Etappe 1

Analyse des technologischen Ist-Standes der Folienbeschichtung bei dem Küchenmöbelhersteller, der Fa. ALNO, durch das ihd über einen Zeitraum von 2 Wochen.
Grenzflächenuntersuchungen, d. h. Analyse der Schwachstellen.
Wichtung der Fehlerbilder bei der 3D-Beschichtung mit Thermoformpressen.

Etappe 2:

Applikation bzw. Neuentwicklung von Prüfverfahren, die sich für die Charakterisierung der Verarbeitungseigenschaften der PO-Folien und der Klebstoffe/Primer eignen.
Bestimmung ausgewählter Materialkenngrößen im ihd durch entsprechend applizierte Prüfverfahren.
Vergleichende Untersuchungen an PO- und PVC-Folie.

Etappe 3

Optimierung der eingesetzten Materialien (Folie, Primer, Klebstoff).
(Eine Einbeziehung des Trägerwerkstoffes – Hornitex „Masterwood plus“ – war nach Übereinkunft der Verbundteilnehmer nicht vorgesehen. Dies würde zum einen den Umfang des Projektes sprengen und zum anderen soll das Verfahren für eine Vielzahl von MDF-Plattentypen geeignet sein.)

Etappe 4

Systematische Untersuchung der Abhängigkeiten zwischen Stoffkriterien und technologischen Parametern in Laborversuchen nach mathematisch-statistischer Versuchsplanung. Weitere Optimierung der eingesetzten Materialien auf der Basis der in den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse.

Etappe 5

Bestätigung der erarbeiteten Verfahrensparameter durch Industrieversuche bei der Fa. ALNO.
Abschlussbericht.

Änderungen in der Projektlaufzeit

Die Fa. Hornschuch informierte Ende Juni 2002 die Projektpartner, dass sie im Rahmen ihrer strategischen Ausrichtung zukünftig keine PO-Folien für die 3D-Verformung für Möbelkomponenten mehr produziert und deshalb zum 30.06.2002 ihre Mitarbeit am Vorhaben als Verbundpartner einstellt. Die Fa. Hornschuch war bereit, weiterhin das Projekt zu unterstützen, und zwar in Form der Bereitstellung von Materialien für die weiteren Versuche. Allerdings mit der Einschränkung, dass die projektierte Polymermodifikation nicht durchgeführt werden kann. Die Verbundpartner waren sich jedoch einig, dass die wichtigsten Ergebnisse auch ohne diese Komponente erreicht werden können.

Bezüglich des bestehenden Arbeitsplanes ergab sich damit eine Reduzierung bei der Fa. Hornschuch um die betreffenden Arbeitspunkte. Die Versuche bei der Fa. ALNO und im ihd wurden mit der von Hornschuch bereitgestellten Folie durchgeführt. Anstelle der Variationen

hinsichtlich der Folieneigenschaften wurden zusätzliche Variationen in Bezug auf die Presspa-rameter durchgeführt, die im ursprünglichen Arbeitsplan nicht enthalten waren, z. B. Variation von Vorwärmzeit, Vorevakuierzeit, Vakuumziehen, Dicke und Fläche der Unterlagen, Zeit zwi-schen Ende des Pressvorgangs und Ausschneiden der Musterteile.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Mit der Entwicklung und Bereitstellung von Holzwerkstoffplatten (MDF) in Tieffräsqualität für Möbelfronten begann 1989 der breite Einsatz von PVC-Folien in der Möbelindustrie, begin-nend im Küchenbereich [27]. Inzwischen sind PVC-beschichtete 3D-Möbelfronten nicht nur im Küchenbereich Stand der Technik. Die relativ leichte Verarbeitbarkeit und die Möglichkeit, durch entsprechende Modifikation breiteste Einsatzgebiete abzudecken, unterstützte maßgeb-lich diese Tendenz [28], [29].

Für die spezielle Beschichtung von 3D-Fronten sind zeitlich getrennte und werkstoff- sowie verfahrensmäßig unterschiedliche Prozesse üblich. Während für die Rückseite der 3D-Fronten Melaminharzfilme verwendet werden, ist für die Beschichtung ihrer profilierten Oberseite die Anwendung tiefziehfähiger thermoplastischer Folien üblich.

Die am längsten im Bereich der 3D-Beschichtung eingesetzten Folien sind Folien auf Basis von Polyvinylchlorid (PVC), die großtechnisch preisgünstig herstellbar sind und unproblema-tisch auf allen gängigen Membran- und membranlosen Pressen verarbeitbar sind. Ihr Anteil beträgt derzeit mehr als 80 % [31]. Durch das gewachsene ökologische Bewusstsein sind die-se Folien jedoch aufgrund des Gehalts an Chlor mit einem zunehmend negativen Image ver-sehen. Bereits heute erhält kein Möbel ein Gütezeichen der Deutschen Gütegemeinschaft Möbel oder ein Umweltzeichen nach RAL UZ 38, wenn es halogenorganische Verbindungen, wie sie auch in PVC-Folien vorhanden sind, enthält. Ein Ersatz ist daher zwingend. Demzufol-ge werden verstärkte Anstrengungen spürbar, chlorfreie Folien für die 3D-Beschichtung nutz-bar zu machen. Zunehmend werden Folien auf Basis von Polyolefin (PO), Polyethylentereph-talat (PET) und Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) im 3D-Bereich eingesetzt (siehe Tabelle 1).

PO-Folien erfordern für den Verarbeiter eine präzise Technologie, da die Temperaturtoleranz (Verarbeitungsfenster) materialbedingt kleiner als bei PVC-Folien ist (± 2°C). Außerdem wei-sen PO-Folien ein erhöhtes Temperatur-Dehnungsverhalten auf und sind bei besonders scharfkantigen bzw. tiefen Profilen nur bedingt einsetzbar [31]. Auf Grund höherer Rohstoff-preise und der aufwendigeren Veredelung kosten chlorfreie Folien heute etwa 30 % mehr als PVC-Folien [31].

Tabelle 1 Übersicht über die wichtigsten thermoplastischen Folien für 3D-Beschichtung [31]

Rohstoff	Be-zeich-nung	übliche Dicken [mm]	Verformungs-temperatur [°C]	Heizplatten-temperatur mit/ohne Membrane [°C]	Temperatur in der Leim-fuge [°C]	Wärmebe-ständigkeit in der Leimfuge [°C]
Polyvinyl-chlorid	PVC	0,3-1,0	90-100	125/110	70	80
Polyethylen-teraphtalat	PET	0,4	100-110	130/115	85	90
Polyolefine	PO/PP	0,4-0,5	125	150/135	85	100
Acrylnitril-Butadien-Styrol	ABS	0,4	100-110	130/115	75	85

Die erforderliche Folientemperatur kann je nach Folientyp abweichen. Vorausgesetzt wird eine Verklebung mit PUR 2-K. Die Wärmebeständigkeit wird nicht allein durch die Leimfugentempe-ratur während des Pressvorganges beeinflusst, sondern auch durch die Liegezeit nach dem Beleimen. Günstig ist eine Verarbeitung vier bis sechs Stunden nach dem Leimauftrag. Danach werden die Ergebnisse allmählich schlechter.

Unter dem Gesichtspunkten der thermischen Entsorgung von Altmöbeln ist der Einsatz halogenfreier Werkstoffe auch im Möbelbereich vorgezeichnet und gefordert [30].

Für PO-Folien ist das technologische Verarbeitungsfenster deutlich kleiner als bei PVC-Folien. Die Verarbeitungstemperatur der PO-Folien liegt in Thermoformpressen um mind. 20 °C höher und das Dehn- und Schrumpfverhalten ist gegenüber PVC-Folien zweifach größer. Für eine stabile industrielle Verarbeitbarkeit sind daher grundlegende Untersuchungen notwendig, die mit dem skizzierten Projekt bearbeitet werden sollten.

Im Bereich der 3-D-Folienbeschichtung sind derzeit folgende Klebstoffsysteme im Einsatz:

1. Reine PUR-Dispersionen in Verbindung mit Isocyanat-Vernetzer. Diese werden den höchsten Anforderungen in der Küchen- und Badmöbelindustrie gerecht.
2. Modifizierte PUR-Dispersionen (mit weiteren Zuschlagstoffen) in Verbindung mit Isocyanat-Vernetzer. Hierbei handelt es sich um kostengünstigere Alternativprodukte zu den reinen PUR-Dispersionen.
3. 1-komponentige PUR-Dispersionen mit integriertem Vernetzungssystem. Diese relativ neue Entwicklung bietet vereinfachte Verarbeitungseigenschaften. Durch den Wegfall des separaten Vernetzers entfällt das Anrühren des Klebstoff-Vernetzer-Gemisches. Gleichzeitig entfällt die Topfzeit. Durch das integrierte Vernetzersystem wird außerdem die Isocyanat-Emission auf ein Minimum reduziert.

Eine Zusammenfassung des aktuellen Standes der Technik der 3D-Beschichtung ist auch [25] und [31] zu entnehmen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wegen der notwendigen Änderungen des Arbeitsplanes wurden Untersuchungen zum thermischen Verhalten von Kleber und Folie/Primer mittels modernster Analysetechnik (DSC, DMA u.a.)in das Projekt aufgenommen. Hierzu wurden Kontakte zum Institut für Polymerforschung in Dresden aufgenommen. Die dort durchgeführten Untersuchungen sind im Bericht entsprechend gekennzeichnet. Die Kosten der Untersuchungen wurden durch interne Umwidmung innerhalb des Projektes getragen.

2 Fehleranalyse bei der 3D-Beschichtung in der ALNO Produktion

2.1 Produktionsablauf und Probleme

Die Fertigung folienbeschichteter Fronten ist im Werk 4 der ALNO AG auf einer Ebene untergebracht. Anlage 1 zeigt das Layout des Fertigungsbereiches. Die einzelnen Fertigungsabschnitte:

- Konstruktive Bearbeitung
- Beleimung
- Beschichtung
- Endkontrolle

sind entsprechend farbig hinterlegt.

Für die konstruktive Bearbeitung (gelb) werden die in Fixbreiten von 400 mm und 600 mm und einer Länge von 4000 mm angelieferten MDF-Streifen mittels einer Kappsäge auf Format zugeschnitten. Gefertigt werden die Fronten in 3 Bauteilhöhen von 19,5 mm, 20,5 mm und 22,5 mm. Dazu werden die Ausgangshöhen von 16 mm, 19 mm bzw. 22 mm durch Aufdopplungen verstärkt und/ oder anschließend auf 3 CNC-Bearbeitungszentren gefräst. Die Innenprofile sind dabei 3 – 5 mm tief. In Abhängigkeit von den Profilkonturen werden die Bauteile nach dem Fräsen manuell verschliffen. Anschließend gelangen die Bauteile in ein Zwischenlager über das die Kommissionen zusammengestellt und die Fertigungsaufträge ausgelost werden. Von den 3 CNC-Bearbeitungszentren waren zum Zeitpunkt der Vorhabensbearbeitung 2 Stück gekapselt (eingehaust).

Die Beileimung (blau) erfolgt durch einen Spritzroboter mit angeschlossenem Trockenkanal bzw. an 2 manuellen Spritzständen. Die beleimten Bauteile werden in Hordenwagen abgelegt.

Die Bauteiloberflächen erhalten einen einmaligen Leimauftrag, die Schmalflächen werden zweimal beleimt.

Zur Beschichtung mit PO- oder PVC-Folie (rot) werden die Bauteile aus den Hordenwagen auf entsprechenden Vorlagetischen abgelegt. Diese Tische entsprechen in ihren Abmessungen den Beschicktischen der beiden baugleichen 3D-Pressen. Entsprechend dem Belegungsschema der Vorlagetische werden die Bauteilunterlagen auf den Beschicktischen positioniert. Auf diese Unterlagen werden zuerst die beleimten Bauteile und anschließend die Folie gelegt. Die Folienrollen befinden sich in einem paternosterartigen Rollenlager am anderen Ende des Beschicktisches gegenüber der 3D-Presse. Nach dem Beschichtungsvorgang werden die Bauteile manuell mit Hakenmessern freigeschnitten und auf das hinter der Presse laufende Transportband gelegt. Hier wird der restliche Folienüberstand mittels einer Ziehklinge plan zur Bauteilrückseite abgeschnitten. Anschließend durchlaufen die Bauteile mit der Bauteilrückseite nach oben eine Bürststation mit gegenläufigen oszillierenden Walzen, um eventuell vorhandene Klebstoffreste über eine Absaugung zu entfernen.

Auf der folgenden Transportstrecke werden die Bauteile an den Bereich Endkontrolle (grün) übergeben. Sie werden einer Sichtkontrolle unterzogen und bei Bedarf (korrigierbare Fehler, z.B. Pickel, lose Folie) entsprechenden Handarbeitsplätzen zugeordnet. Bauteile mit nicht zu beseitigenden Fehlerbildern werden als Ausschussteile ausgesondert. Nach der manuellen Fehlerbeseitigung werden die Bauteile in entsprechende Kommissionierwagen eingeordnet und den Montageabteilungen zugeführt.

In dem kurz skizzierten technologischen Ablauf steckt eine Reihe von Problemen, die direkt oder indirekt Einfluss auf die Fertigungsqualität hat. Die nachfolgende Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Staub:
Die konstruktive Bearbeitung (Fräsen, Schleifen) ist räumlich nicht von der Beschichtung getrennt. Nicht alle Maschinen sind gekapselt. Dadurch erhöhen die Staubablagerungen auf Rohteilen den Fehleranteil Pickel.

Rohteilfehler:
Grobe Fehlbearbeitungen werden auch beim manuellen Schleifen erkannt und aus dem Prozess herausgenommen. „Rattermarken“ im Eckbereich der Bauteile markieren sich auch unter der Folie.

Ausbrüche:
Infolge Transporteinfluss (Reiben der Plattenpakete aneinander) bzw. Feuchteeinfluss (Aufquellen der Schmalflächen) können die Bauteilunterseiten im Randbereich wellig werden. Beim Entfernen der Folienüberstände nach dem Freischneiden bzw. bei der rückseitigen Bürstbelastung beim Klebstoffrestentfernung kommt es zu Ausbrüchen an den Bauteilunterseiten.

Leimreste, Leimraupen:
Insbesondere beim maschinellen Leimauftrag kommt es zur Bildung von Leimraupen. Der Overspay wird mittels Infrarotstrahlen gehärtet und mit Walzen abgebürstet. Dabei bilden sich Leimraupen, die nicht vollständig entfernt werden und an der Unterseite von beleimten Bauteilen bis zur Beschichtung dann mitgeführt werden. Mit dem Einsatz eines Transportbandes aus Teflon wurde das Problem entschärft.

Absaugung bei Bauteilauflage:
Die Presstische werden vor dem Auflegen der Unterlagen und Bauteile mit einem Industriestaubsauger abgesaugt. Die Saugleistung erscheint nicht optimal. Teilweise erfolgt statt der Absaugung auch ein „Wegblasen“ mit Druckluft, wodurch ein Verteilungseffekt entsteht.

Metallspäne:
Beim Freischneiden mittels Hakenmesser werden Metallspäne aus den Pressentischen herausgeschnitten. Deren Absaugung ist nicht gewährleistet (s. o.). Die Verwendung von gehärtetem Aluminium für die Pressentische hat das Problem entschärft.

Nicht durchgehende Schnitte:
Beim manuellen Freischneiden werden die Bauteile nicht vollständig freigeschnitten. Es

verbleiben kleine Stege meist im Bereich der Bauteilecken. Beim Abnehmen der Bauteile (Anheben) wird die Klebfuge in diesem Bereich sehr stark belastet bzw. erfolgt keine Klebverbindung und es kommt zu Ablöseerscheinungen.

2.2 Methode/ Durchführung der Fehleranalyse

Für die Analyse wurden uns die laufenden Daten der Industrieproduktion im Zeitraum 34. KW 2000 – 52. KW 2002 durch die Fa. ALNO Qualitätskontrolle zur Verfügung gestellt. Sie beinhalteten die an den einzelnen Wochentagen produzierte Gesamtstückzahl und die davon produzierten Gut-, Ausschuss- und Nacharbeitsteile. Im Bild 1 werden diese Daten dargestellt.

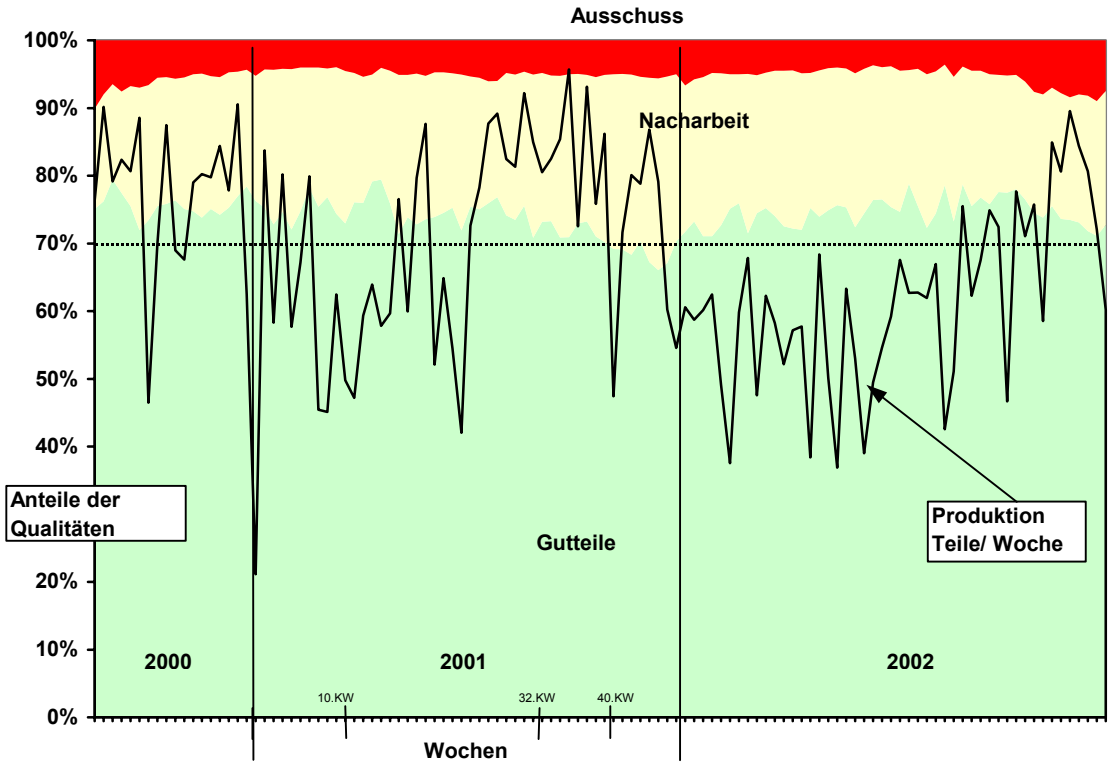


Bild 1: Gesamtproduktion 34. KW 2000 – 51. KW 2002

Im betrachteten Zeitraum kann zunächst deutlich der Produktionsrückgang seit Beginn des Jahres 2002 beobachtet werden.

Die im Bild 1 markierten Fixpunkte sind wie folgt zu erklären:

10. KW 2001: Zu diesem Zeitpunkt wurde mit der Reduzierung der Produktion von Bauteilen mit PO-Folienbeschichtung begonnen und bis Ende 2001 bis auf einzelne Nachlieferungen abgeschlossen.

32. KW 2001: In dieser Woche wurde ein Teflonband für den Transport der Bauteile am Beleimungsstand des Spritzroboter eingebaut. Gleichzeitig wurde ab diesem Zeitpunkt vom Verarbeiter ein 2K-PUR Dispersions-Klebstoff eines anderen Herstellers bei der Beschichtung mit PVC- und PO-Folien verwendet. Dieser wird in den weiteren Ausführungen als PUR2 bezeichnet.

40. KW 2001: Ab dieser Woche arbeitet eine der beiden 3D-Pressen mit neuen Beschicktischen, bei denen die Entstehung von Metallspänen, die beim Bauteilausschnitt auf dem Presstisch entstehen, reduziert wird. Somit können diese Späne nicht mehr durch statische Aufladung unter der Folie auf dem Bauteil fixiert werden und keine Erhebungen auf der Folienoberseite verursachen.

In Tabelle 2 ist eine Übersicht der auftretenden Fehlertypen, deren Ursache und Korrekturmöglichkeiten zusammengestellt worden. Einzelne Fotos zu diesen Fehlerbildern sind in Anlage 2 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht der Fehlerarten

Pickel:

Erscheinungsbild:	-	gestörtes Oberflächenbild durch Erhöhungen auf der Bauteiloberseite
Ursache:	-	Staubpartikel von spanender Plattenbearbeitung, die sich auf beleimte und unbeleimte Bauteile legen und durch ungenügende Reinigung (Absaugung) bis zur Beschichtung verbleiben
Fehlerkorrektur:	-	Einebnung durch mechanischen Druck

Ausbruch:

Erscheinungsbild:	-	rückseitiger Ausbruch von Trägermaterial
Ursache:	-	partielle Feuchteerhöhung bei Lagerung o.ä. im Trägermaterial, bei Beschichtung Aufquellung dieser Bereiche und bei Abbürstung der Klebstoffrückstände (starke Beanspruchung) Ausriss von Trägermaterial
Fehlerkorrektur:	-	nicht möglich, Ausschussteile

Lose Folie:

Erscheinungsbild:	-	Ablösungen der Folie vom Rand im Schmalflächenbereich
Ursache:	-	umlaufender Abstand zwischen Bauteil und Bauteilunterlage nicht vorhanden,
	-	bei unvollständigem Freischnitt des Bauteils wird die Klebverbindung durch Zugkräfte zusätzlich belastet und diese Kräfte bewirken ein Ablösen der Folie, da die Verklebung noch nicht die erforderliche Festigkeit aufweist,
	-	fehlerhafte Beleimung,
	-	verrutschte Unterlagen
Fehlerkorrektur:	-	teilweise nachträgliches Kleben des losen Folienabschnitts

Nasen:

Erscheinungsbild:	-	in den Bauteileckbereichen ein Zuviel an Folie, welches als kleine Längsfalte sichtbar wird (s. g. „Tischtuchfalte“)
Ursache:	-	zu niedrige Bauteilunterlagen,
	-	Abstände zu den benachbarten Bauteilen oder Abstandshölzern sind zu groß
Fehlerkorrektur:	-	nicht möglich, Ausschussteile

Rohteilfehler:

Erscheinungsbild:	-	Markierungen von Unebenheiten
Ursache:	-	geringfügig fehlerhafte Fräsungen kommen durch Beschichtung optisch stärker zur Geltung
Fehlerkorrektur:	-	nicht möglich, Ausschussteile

Klebstoffteile:

Erscheinungsbild:	-	Pickel (Oberflächenerhöhungen) an der Unterkante der Schmalflächenseiten
Ursache:	-	Ablagerung von Klebstoffteilchen, die durch Verschmutzungen des Transportbandes nach Beleimautomat am Bauteilrand verbleiben, antrocknen und sich nach der Beschichtung markieren
Fehlerkorrektur:	-	Glätten der betreffenden Stellen durch Druck

Kratzer:

Erscheinungsbild:	-	Kratzer auf Folienoberfläche und auf Schmalflächenseite
Ursache:	-	individuell fehlerhafte Ausschnitttechnik beim Freischneiden der Bauteile

Fehlerkorrektur: - nicht möglich, Ausschussteile

Streifen:
Erscheinungsbild: - Aufglänzungen in Streifenform über die Bauteiloberfläche
Ursache: - Verunreinigung des Pressenvlies,
- zu hohe Verarbeitungstemperaturen bei PO-Folie
Fehlerkorrektur: - nicht möglich, Ausschussteile

Falten:
Erscheinungsbild: - Folienfalte auf Bauteiloberfläche
Ursache: - geringe Geschwindigkeit bei Folienüberzug (Vakuum)
Fehlerkorrektur: - nicht möglich, Ausschussteile

Folieneinschnitt:
Erscheinungsbild: - teilweises Ein- bzw. Abschneiden von Folie im Schmalflächenbereich
Ursache: - Verkantung des Ausschnittmessers beim Freischneiden des Bauteils nach der Beschichtung
Fehlerkorrektur: - nicht möglich, Ausschussteile

Folienrückzug:
Erscheinungsbild: - Folienrückzug im Abschluss der Schmalflächenkante zur Bauteilrückseite
Ursache: - zu schneller Ausschnitt nach der Beschichtung, bei der noch fortschreitenden Abkühlung der Folie und dem damit verbundenen Rückschrumpf öffnen sich Fugen zwischen Schmalflächenkanten- und Rückseitenbeschichtung
Fehlerkorrektur: - nicht möglich, Ausschussteile

2.3 Ergebnisse

Die in Abschnitt 2.2 aufgelisteten Maßnahmen führten nicht zu einer Senkung fehlerhafter Teile an der Gesamtproduktion. Es kann lediglich eine Verschiebung innerhalb der Anteile der auftretenden Fehlertypen beobachtet werden.
Die Ablösung der ökologisch hochwertigen PO-Folie durch die preislich günstigere und mit einem breiteren Verarbeitungsfenster versehene PVC-Folie führte beim Anwender zu keiner Senkung der Gesamtproduktionsfehlerquote.
In der Umstellungsphase sank der Anteil der Gutteile am Gesamtproduktionsumfang auf hohem Niveau bis zum Jahresende 2001 ab, um dann wieder auf niedrigerem Stückzahlniveau den Stand des Jahres 2000 zu erreichen. Im 4.Quartal 2002 ist ein erneutes Absinken des Anteils an Gutteilen und ein Ansteigen der Ausschussteile zu beobachten.
Aus dem nahezu unveränderten Gesamtfehleranteil nach der Umstellung von PO- auf PVC-Folie ist zu schließen, dass das „schmale“ Verarbeitungsfenster der PO-Folie nicht für den Fehleranteil verantwortlich ist. Maßnahmen zur Senkung der Fehleranteile an der Gesamtproduktion sind somit für beide Folientypen von Bedeutung.

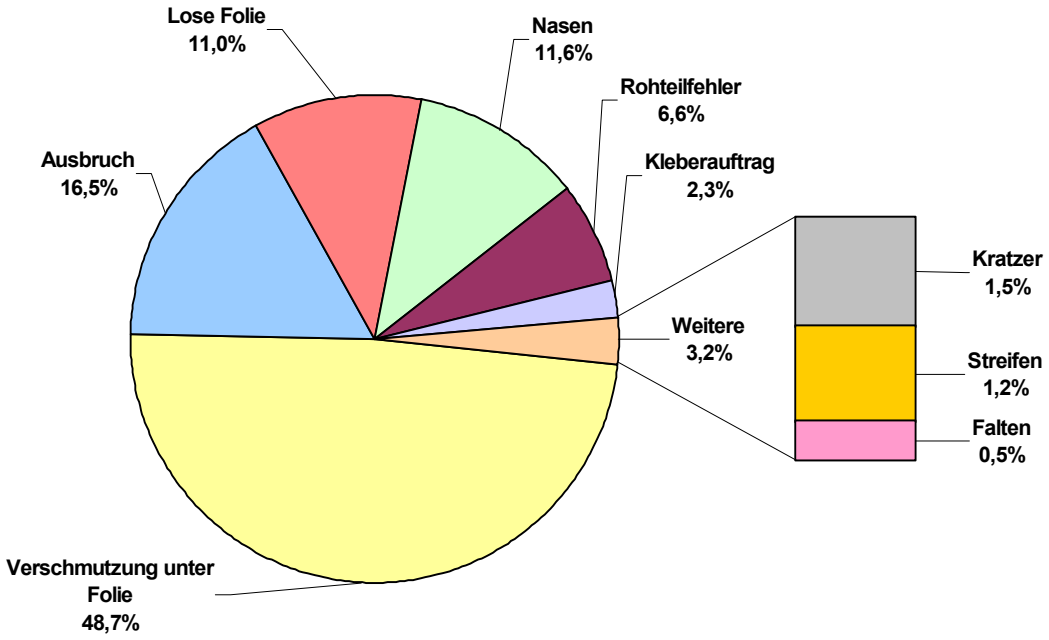
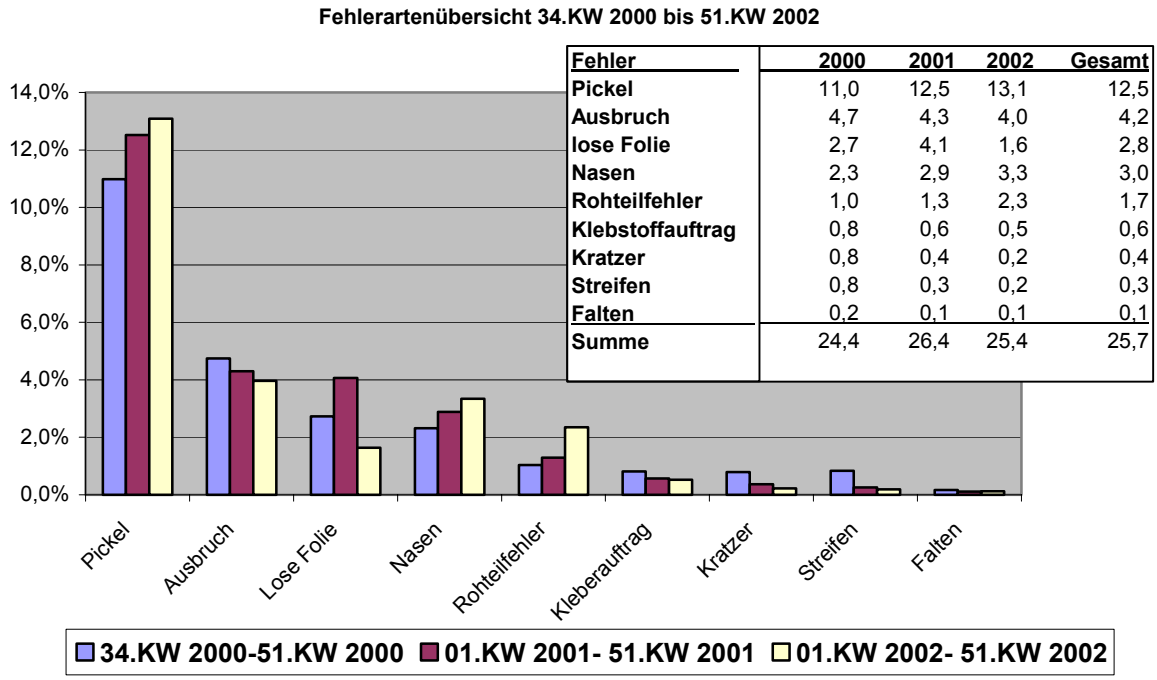


Bild 2: Fehlertypanteile am Gesamtfehlerumfang der Produktion (2000-2002)

Eine genauere Fehleranalyse zeigt sowohl die Anteile der einzelnen Fehler am Gesamtfehlerumfang (Bild 2) als auch die Entwicklung der Fehlertypen bezüglich der Gesamtproduktion über den betrachteten Zeitraum (Bild 3).



Fehler	2000	2001	2002	Gesamt
Pickel	11,0	12,5	13,1	12,5
Ausbruch	4,7	4,3	4,0	4,2
lose Folie	2,7	4,1	1,6	2,8
Nasen	2,3	2,9	3,3	3,0
Rohteilfehler	1,0	1,3	2,3	1,7
Klebstoffauftrag	0,8	0,6	0,5	0,6
Kratzer	0,8	0,4	0,2	0,4
Streifen	0,8	0,3	0,2	0,3
Falten	0,2	0,1	0,1	0,1
Summe	24,4	26,4	25,4	25,7

Bild 3: Entwicklung der Fehlertypanteile an der Gesamtproduktion (2000–2002)

Wie aus diesen Bildern zu erkennen ist, treten die Fehler, die durch die PO-Folienbeschichtung verursacht werden, nur in geringem Umfang auf. Im Einzelnen kann festgestellt werden, dass Hauptfehlerquellen Verschmutzungen unter der Folie (12,5%) sowie Ausbrüche (4,2%) an den Bauteilen sind. Die Ursache für diese Fehler ist bei den derzeitigen Produktionsbedingungen und nicht im Einsatz der PO-Folie zu suchen.
Die geringfügige Fehlersenkung (um 1,3 %) bei Kratzern, Streifen und Falten ist als Ergebnis der Produktionsumstellung PO-/ PVC-Folie zu werten. Durch das Auslaufen des PO-Folieneinsatzes reduzierten sich die Fehlerarten, die stark durch die temperaturabhängigen

Eigenschaften der PO-Folie beeinflusst wurden.
Der zwischenzeitliche Anstieg der „losen Folie“- Fehler (um 1,4%) hätte möglicherweise durch den Einsatz spezieller Klebstoffe für PO- und PVC-Folie verhindert werden können. Ab 3. Quartal 2000 wurde ein Klebstoff als „Universalklebstoff“ für beide Folienarten eingesetzt und bewirkte unter Umständen den Anstieg der „losen-Folie“- Fehler bis ins Jahr 2001. Nachdem weniger Bauteile mit PO-Folie beschichtet wurden, reduzierte sich diese Fehlerart wieder. Der Grund für diese Annahme sind die im folgenden durchgeführten Laboruntersuchungen mit beiden Klebstoffen, die bei dem Universalklebstoff eine schlechtere Verklebungsqualität mit PO-Folien zeigten.
Die Verringerung der Fehlerquote beim „Klebstoffauftrag“ kann auf die Einführung des Teflontransportbandes für die Bauteile beim Beleimen am Spritzroboterstand zurückgeführt werden und ist von der Art der Folienbeschichtung unabhängig.

3 Industrieversuche zur Untersuchung verschiedener Fehlerabhängigkeiten

3.1 Herstellung der Bauteile

Um den Einfluss verschiedener Parameter auf eine qualitätsgerechte Verklebung der PO-Folie charakterisieren zu können, wurden Industrieversuche im Produktionsbetrieb der Fa. ALNO durchgeführt. Es wurde darauf geachtet, dass bei der Herstellung der Bauteile die folgenden Parameter konstant gehalten wurden:

eingesetzte Materialien:	Klebstoff:	PUR-Dispersion, PUR2 mit 5 % Vernetzer	
	Folie:	PO (Fa. Hornschuch), perlweiß gesprenkelt, Chargen-Nr.: HMP3Nr. 826-0082	
	MDF:	Fa. Hornitex, Daten gemäß Eingangsprüfung. Fa. ALNO	
Einstellung an der Beschichtungspresse:		Vorwärmzeit:	120 s
		Presstemperatur:	138 °C
		Vorvakuumzeit:	2 s
		Vakuumzeit:	6 s
		Pressdruck:	0,54 MPa
		Presszeit:	30 s
weitere technologische Parameter:		Handbeleimung mit Spritzpistole Abtrocknungszeit des Klebstoffs (1-3 h) gleiche Unterlagen für jedes Bauteil 1 – 15 gleiche Lage der Bauteile1 –15 auf dem Pressentisch (siehe Anlage 3)	

Viele Einflüsse können nicht konstant gehalten werden, da sie stark subjektiv von der Arbeitstechnik der einzelnen Mitarbeiter bestimmt werden und die Auswirkungen erst in der Fehleraufnahme erkennbar sind. Dazu gehören:

- Gleichmäßigkeit beim Klebstoffauftrag
- Reinigung des Presstisches vor Belegung mit Bauteilen (absaugen /abblasen)
- Lage der Bauteile auf den Unterlagen (gleichmäßige Überstände)
- Reinigung des belegten Presstisches (absaugen /abblasen)
- Liegezeiten der beschichteten Bauteile nach Öffnung der Presse (Zeitfond der Mitarbeiter)
- Ort des Ausschnittbeginns der Bauteile
- Freischnitttechnik der Mitarbeiter (Verkantung Werkzeug-Kratzer, Reißkräfte bei unvollständigem Folienausschnitt)

Es wurden verschiedene Bauteilmodelle (entsprechend der Nachfrage im 1.Halbjahr 2001) und Bauteilgrößen ausgewählt. Um einen saisonalen Einfluss zu erkennen, wurden quartalsweise in jeweils 6 Pressvorgängen mit je 15 Bauteilen gemäß der in Anlage 3 dargestellten Belegung Bauteile hergestellt. Die 90 Bauteile je Saison waren bezüglich Bauteillage – Bauteilform – Bauteilgröße identisch.

An den Bauteilen wurde eine Fehleranalyse (siehe Abschnitt 3.2) durchgeführt und nach der Herstellung von Prüfkörpern aus diesen Bauteilen im Rollenschälversuch die Haftfestigkeit der Folie (siehe Abschnitt 3.3) bestimmt, um mögliche Einflussfaktoren auf die Qualität der Bauteile zu erkennen.

Die folgenden Merkmale wurden bei der Auswertung vorrangig untersucht:

- Jahreszeitlicher Einfluss
  - Bauteilmodell (Profilierung, Bauteilrandgestaltung)
  - Bauteilgröße (Schlankheitsgrad - Verhältnis Länge/ Breite, Bauteilfläche und Bauteilumfang)
  - Lage des Bauteils auf Presstisch (Randlage, Ecklage)
  - Lage der Prüfkörper in den Bauteilen (Eckbereich und mittlerer Schmalflächenbereich)

3.2 Fehlerbeurteilung

3.2.1 Methode/ Durchführung

Die Beurteilung der im Industrieversuch hergestellten Bauteile auf optisch erkennbare Fehler erfolgte an allen - wie unter 3.1 beschrieben - hergestellten Bauteilen. Folgende Fehlerarten wurden erkannt und erfasst:

- Verschmutzung unter der Folie
- Kratzer
- Ausbrüche
- Rohteilfehler
- Nasen
- Lose Folie
- Folieneinschnitte
- Folienrückzug

3.2.2 Ergebnisse

De Häufigkeiten der aufgetretenen Fehler werden im folgenden Diagramm verdeutlicht:

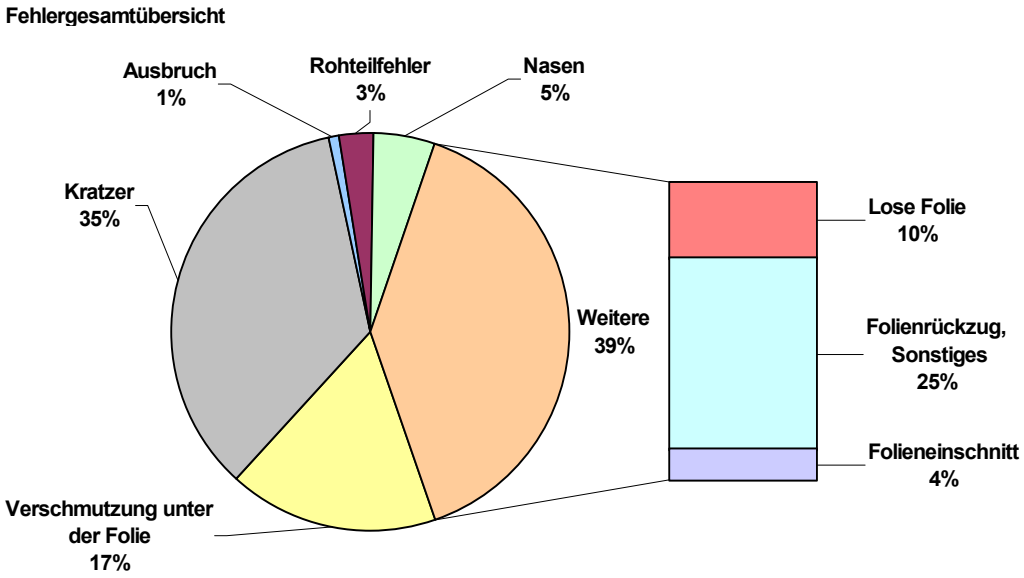


Bild 4: Gesamtübersicht über die Anteile der Fehlerarten

Der Vergleich von Bild 2 und Bild 4 zeigt einige Unterschiede. Hauptgrund ist, dass im Industrieversuch ausschließlich mit PO-Folie beschichtet wurde. Der stark erhöhte Fehleranteil bei den Kratzern (35 %) und den sonstigen Fehlern - neue Fehlerart „Folienrückzug“ enthalten- (25 %) haben die Relationen zu den anderen Fehlerarten etwas verschoben.

Der große Anteil dieser beiden Fehler ist stark mit den Materialeigenschaften der PO-Folie verknüpft. Die Kratzer wurden auf der Schmalfläche der Bauteile durch Verkanten der Ausschnittklinge beim Lösen aus dem Folienverbund verursacht, da die PO-Folie im Gegensatz zur PVC-Folie dann noch eine höhere Temperatur aufweist und damit noch keine ausreichende Kratzfestigkeit erreicht hat. Der Folienrückzug war besonders im Bauteileckbereich erkennbar und wird bei den Materialuntersuchungen der PO-Folie weiter zu betrachten sein.

Die geringe Fehlerquote bei den Verschmutzungen unter der Folie und bei den Ausbrüchen ist damit erklärbar, dass nach der Beleimung eine relativ zügige Weiterverarbeitung (im Rahmen der technologischen Rahmenbedingungen) erfolgte und somit die Ablagerung von Schmutzpartikeln eingeschränkt wurde. Die Ausbrüche werden vor allem, wie schon unter 2.2 in

Tabelle 2 erwähnt, an Schwachstellen des Rohteils durch die starke Belastung beim Entfernen der Klebstoffreste an der Bürstmaschine verursacht. Diese Bearbeitungsstation wurde von diesen Bauteilen nicht durchlaufen.

Einen Überblick über die Fehlerarten bei den Produktionsbauteilen zeigt Bild 5.

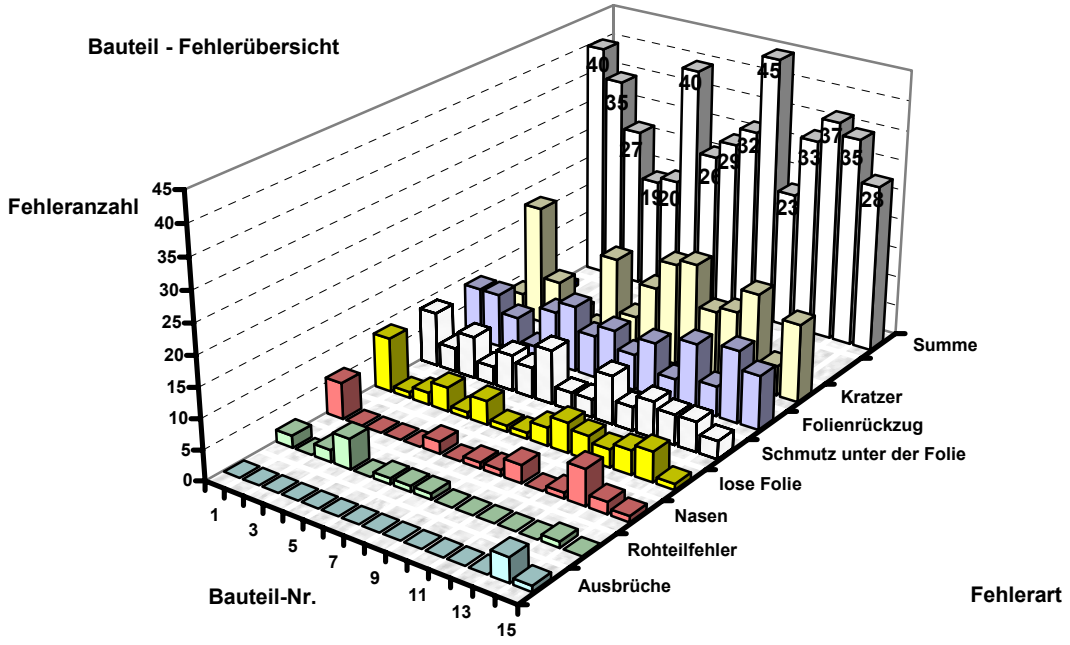


Bild 5: Anzahl der Fehlerarten je Bauteilnummer

Aus Bild 6 ist ersichtlich, welche Gesamtsumme an Fehlern sich bei den einzelnen Bauteilen ergibt. Gleichzeitig sind die Lage auf dem Presstisch, die Bauteilfläche A, der Bauteilumfang U und die Schlankheit L/B bezüglich der Presseneinlaufrichtung (entspricht auch Folienherstellrichtung) der entsprechenden Bauteile bezeichnet.

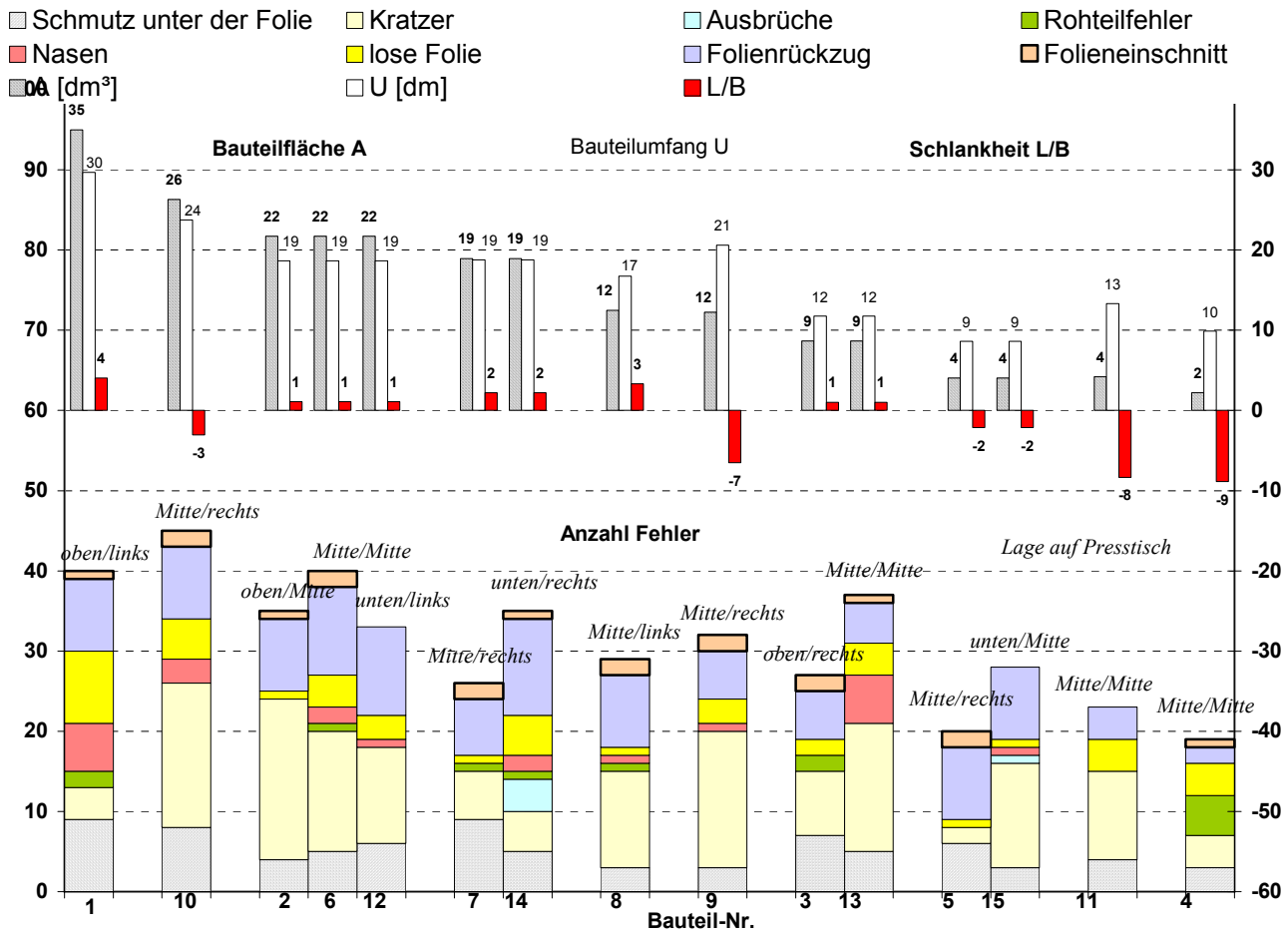


Bild 6: Übersicht der Fehlersummen der einzelnen Bauteile bzgl. Bauteildimensionen und Lage in der Presse

Auf viele Ursachen der verschiedenen Fehlerarten wurde bereits bei der Fehleranalyse der ALNO Produktion eingegangen. Durch die bauteilspezifische Beurteilung der im Industrieversuch hergestellten Bauteile bezüglich Bauteilgröße, Bauteillage auf Pressentisch, Liegezeiten der Bauteile nach der Beschichtung bis zum Freischneiden sind noch zusätzliche Aussagen möglich.

Der Einfluss der Bauteilabmessungen zeigt, dass kleinere Bauteilfläche auch weniger Fehler aufweisen. Bezüglich der Schlankheit oder dem Bauteilumfang sind keine bedeutende Abhängigkeiten zur Fehleranzahl erkennbar.

Bei sehr kurzen Liegezeiten der Bauteile nach der Pressenöffnung tritt Folienrückzug häufiger auf. Die Bauteile werden teilweise schon aus dem Folienverbund geschnitten, wenn der Presstisch gerade die Presse verlässt. Das hat zur Folge, dass diese Bauteile einen höheren Anteil an Folienrückzug aufweisen. Die Stelle des Beginns des Freischneidens ist vom Standort des Arbeiters und von dessen individueller Arbeitsweise abhängig. Überwiegend im Eckbereich der Bauteile zeigt sich der Folienrückzug darin, dass das Bauteil von der Folie nicht mehr bis zum Abschluss der Schmalfläche beschichtet wurde. Die Ursache dafür ist möglicherweise auf die zu hohen Temperaturen im Materialverbund nach dem Beschichten zurückzuführen. Weitere Untersuchen und Erläuterungen zum thermischen Verhalten der Materialien werden später(Kapitel 6.3) erörtert.

3.3 Festigkeitsbeurteilung

3.3.1 Messmethode

Für die Qualität von Klebungen zwischen der Bauteilfläche und dem Beschichtungsmaterial gibt es derzeit keine Norm. Um vergleichbare Werte für die Festigkeit der Klebverbindung an

dieser Stelle zu erhalten, hat die Technische Kommission Holzklebstoffe im Industrieverband Klebstoffe e.V. für flexible Kanten eine Empfehlung in Anlehnung an DIN EN 28510 erstellt. Für flexibles Kantenmaterial (z.B. sämtliches thermoplastisches Material, wie PVC, ABS, PP u.a.) eignet sich der Rollenschälversuch. Der Rollenschälversuch dient zur Ermittlung des Widerstandes von Verklebungen gegen abschälende Kräfte bei flexiblen Kantenbeschichtungsmaterialien (siehe Bild 7). Die gemessene Schälfestigkeit wird durch die Dicke des Kantenmaterials, die Prüftemperatur und die Prüfgeschwindigkeit bestimmt. Diese Werte sind bei den Ergebnisübersichten anzugeben.

Prüfkörper: Länge: 230 mm (Abschällänge: ca.180 mm)
Breite: 10 mm
Höhe: 30 mm

Prüfklima: Normalklima (23 °C, 50 % rel. Luftfeuchte)
Prüfgerät: Universalprüfmaschine TIRATEST 24100 (Kraftmessbereich 5kN)
Schälgeschwindigkeit: 100 mm/ min
Rollendurchmesser: 25 mm

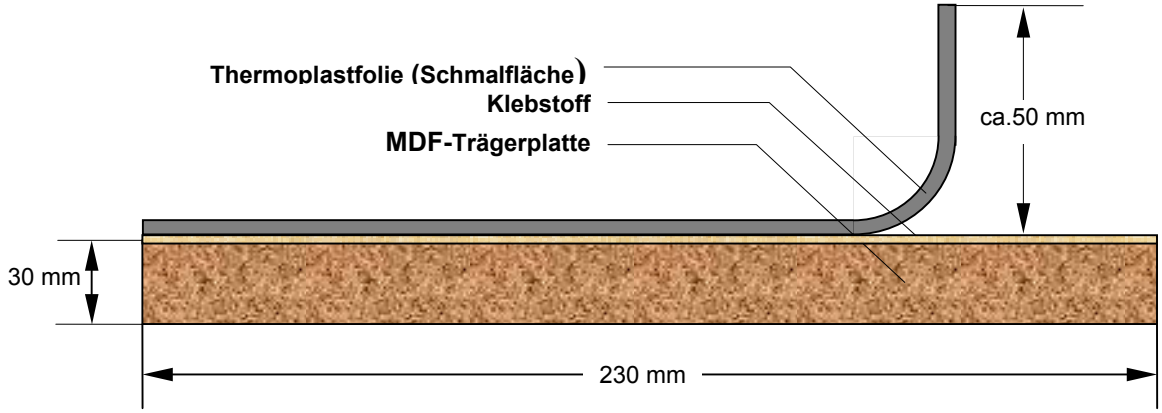


Bild 7: Rollenschälversuch – Prüfung von flexiblen Kantenmaterial

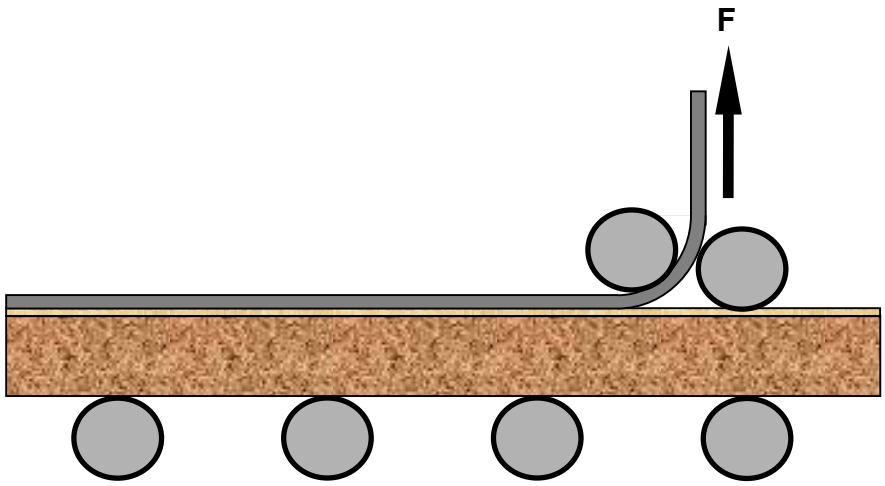


Bild 8: Schematische Darstellung der Prüfvorrichtung

Vor Beginn der Schälprüfung wird die überstehende Zunge von dem restlichen Prüfkörper abgebrochen und für das Einspannen gemäß Bild 8 benutzt. Die Prüfung erfolgt durch Abschälen der flexiblen Folie im Winkel von 90°. Gemessen wird die Kraft entlang eines definierten Wegabschnittes während des Abschälens. Dabei wird über eine Rolle der Folienanfang mit einer Zugkraft so lange belastet, bis die Verbindung zwischen Folie und MDF-Träger getrennt wird. Während dieser Zugbelastung erfolgt ein konstanter Vorschub des Prüfkörpers

von 100 mm/min. Die dafür erforderliche Kraft wird in Abhängigkeit von dem durch den Messkopf zurückgelegten Traversenweg in einer Messreihe registriert. Dieser Traversenweg entspricht aber nicht in jedem Fall der geprüften Klebschichtlänge. Die Ursache dafür liegt in einer Überlagerung der Abschäl- und Dehnungskräfte. Je höher die Klebfestigkeit, umso größer wird der Anteil der Dehnung des Folienstreifens an der Kraftmessung. Die ermittelte Wegkomponente ist größer als die eigentlich abgeschälte Wegstrecke. Dabei wird deutlich, dass die gemessene Schälkraft stark von der Flexibilität des verwendeten Klebstoffes bzw. der Folie beeinflusst wird. Das zeigt, dass nur vergleichende Betrachtungen möglich sind und keine Wertung der absolut erreichten Kraftmesswerte.

Für alle Prüfkörper wurde der Schälkraftverlauf aufgenommen und ausgewertet. Um eine Verfälschung der Werte durch den Anfangskraftanstieg zu vermeiden, wurde die Messstrecke um diese Werte bereinigt. Dafür wurde das 1. lokale Maxima ermittelt und die davor gelegenen Messwerte für die weiteren Auswertungen nicht berücksichtigt. In der Literatur [7], [9] werden konstante Wegstrecken aus der Betrachtung ausgeschlossen bzw. festgelegte prozentuale Anteile zu Beginn der Messstrecke nicht berücksichtigt. Da diese Anfangsanstiege sehr unterschiedlich verlaufen, ist die o.g. flexiblere auf den Kurvenverlauf angepasste Datenkorrektur verwendet worden. Das Prinzip der Datenauswertung zeigt Bild 9.

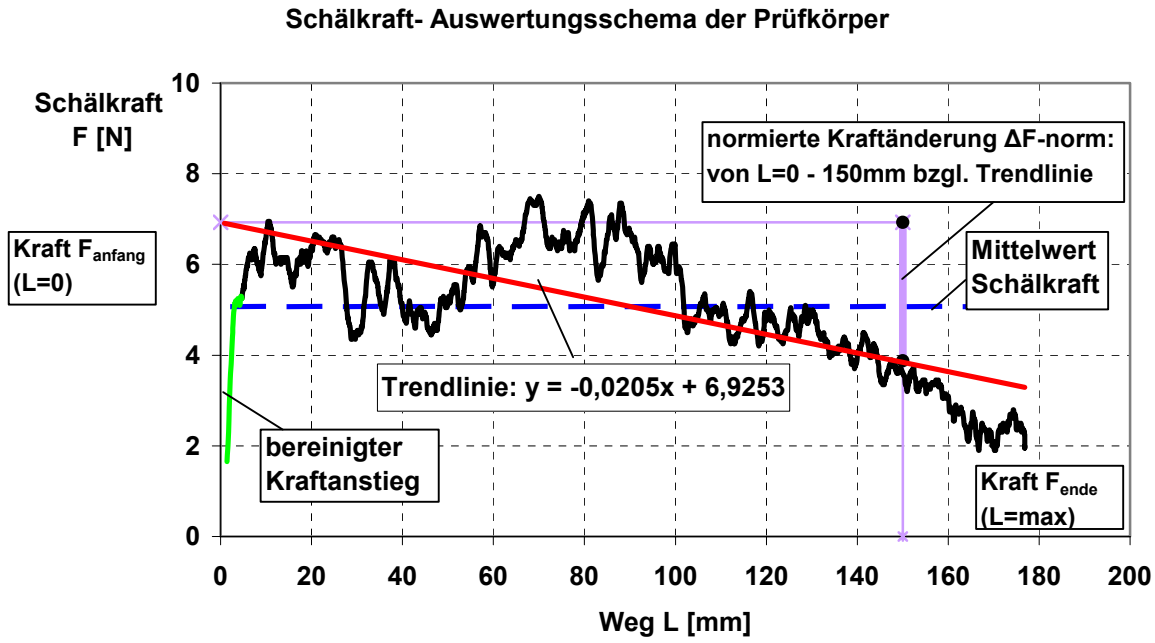


Bild 9: Prüfkörper- Schälkraft- Auswertungsschema

3.3.2 Prüfkörperauswahl und -herstellung

Die Lage der Prüfkörper im Pressbelegungsplan (Bauteillage auf Presstisch) einschließlich der Abschälrichtung sind aus der Übersicht in Anlage 3 erkennbar. Gleichzeitig sind dieser Darstellung die Ecknummerierungen der Bauteile und deren Zählrichtung zu entnehmen. Um den Einfluss der Ecken der Bauteile auf die Klebfestigkeit charakterisieren zu können, wurden bei den Eckprüfkörpern die Schälrichtungen in Richtung der Bauteilecke festgelegt.
Bei der 3D-Folienbeschichtung werden Trägerober- und Schmalfläche in einem Vorgang beschichtet. Wichtigstes Qualitätskriterium ist die Verklebung der Folie auf den Bauteilschmalflächen.
Entsprechend Anlage 3 wurden Prüfkörper aus den Bauteilen geschnitten. Um eine Vergleichbarkeit der Schälkraftwerte zu gewährleisten, wurden die unterschiedlichen Kantenkonturen dadurch eliminiert, dass die Prüfkörper eine einheitliche Breite von 10 mm - beginnend an der Bauteilunterseite - aufweisen und das darüber befindliche Material weggefräst wurde. Zum Fassen des Folienbandes in der Prüfmaschine blieb an den Prüfkörpern eine Zunge

überstehen. Diese Zunge hatte eine Länge von ca. 50 mm und eine Dicke (MDF) von ca. 2 mm.

3.3.3 Ergebnisse

Für die in Anlage 3 dargestellten Prüfkörper wurde die Schälkraft nach dem o.g. Prinzip bestimmt und der Einfluss der in 3.1 genannten Merkmale (z. B. Herstellungssaison, Lage auf Presstisch, Abmessungsverhältnisse der Bauteile) bezüglich der Schälkraft ermittelt.
Eine Abhängigkeit der Festigkeitswerte von saisonalen Einflüssen kann aus den ermittelten Werten (siehe Bild 10) nicht abgeleitet werden. Es ist nur die prinzipielle Verringerung der Kraft mit zunehmender Abschälstrecke erkennbar.

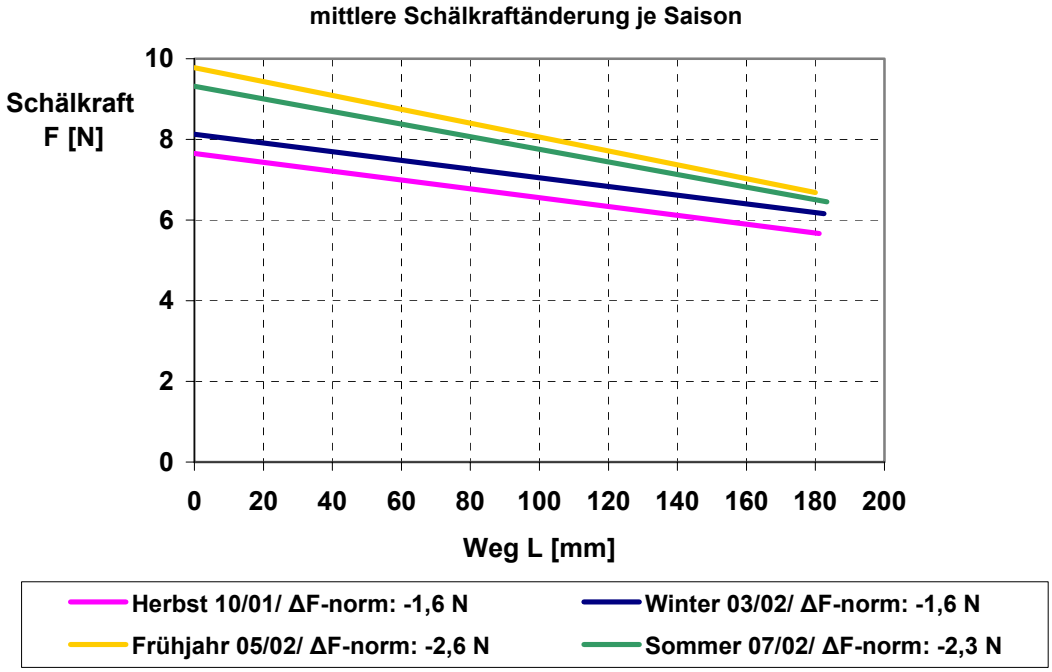


Bild 10: Einfluss der Herstellungssaison auf den Schälkraftverlauf

Um diese Feststellung weiter untersetzen zu können, erfolgte der Vergleich in Bezug auf die Lage der Prüfkörper. Es werden Prüfkörper im Eckbereich (vertikale und horizontale Lage zur Beschickrichtung der Presse (= Folienherstell- bzw. Abrollrichtung)) und mittige Prüfkörper (Lage im mittleren Schmalflächenbereich einzelner Bauteile) unterschieden. Bei den Prüfkörpern im Eckbereich wurde immer zur Ecke hin abgeschält (siehe Anlage 3).

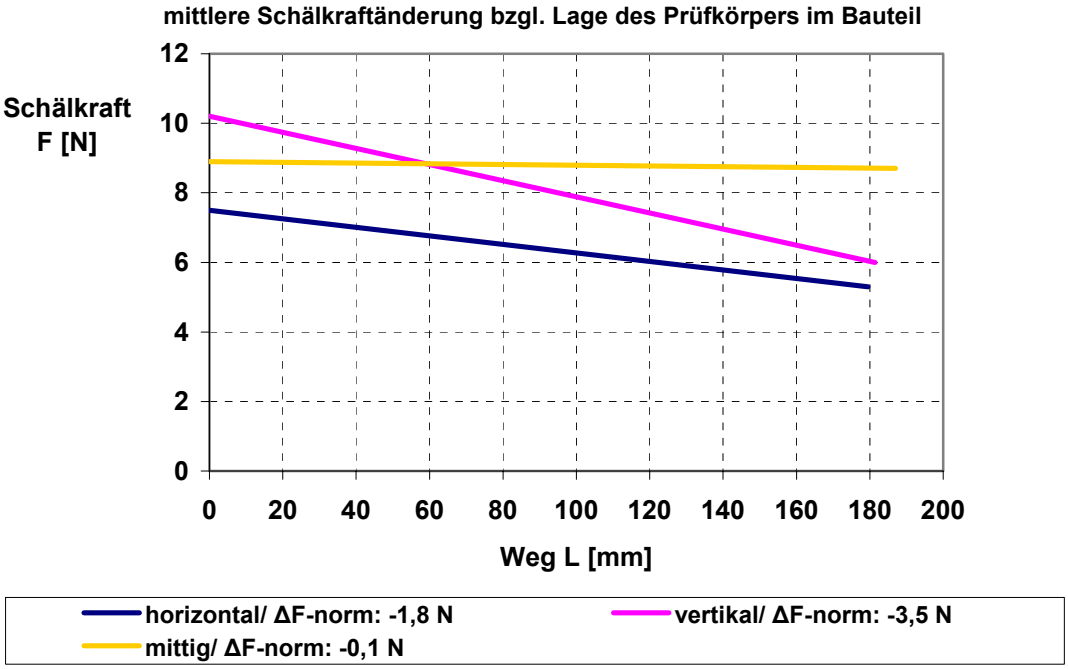


Bild 11: Einfluss der Prüfkörperlage auf den Schälkraftverlauf

Es ist deutlich erkennbar, dass ein Festigkeitsverlust in Richtung der Bauteilecken auftritt und sich im Bauteilmittenbereich konstante Festigkeitsverhältnisse einstellen (Bild 11). Um den Einfluss der absinkenden Festigkeitswerte einzugrenzen, werden die Werte der Prüfkörper, die sich mittig im Bauteil befinden, in den folgenden Auswertungen nicht mehr berücksichtigt. Diese Prüfkörper verfälschen durch ihren gleichbleibenden Kraftverlauf („positiven“ Einfluss) die Aussagen bezüglich der Bauteile in denen solche mittigen Prüfkörper enthalten sind. In dieser Darstellung wird deutlich, dass die Festigkeitsänderung bei den vertikal ausgerichteten Prüfkörpern fast doppelt so groß ist wie bei den horizontal ausgerichteten. Ursache ist das richtungsabhängige Rückzugsverhalten der Folie.

Anschließend zeigt ein Vergleich der einzelnen Bauteilecken (Bild 12), dass sowohl in Bezug auf die Lage, als auch hinsichtlich der normierten Kraftänderung keine relevanten Unterschiede erkennbar sind.

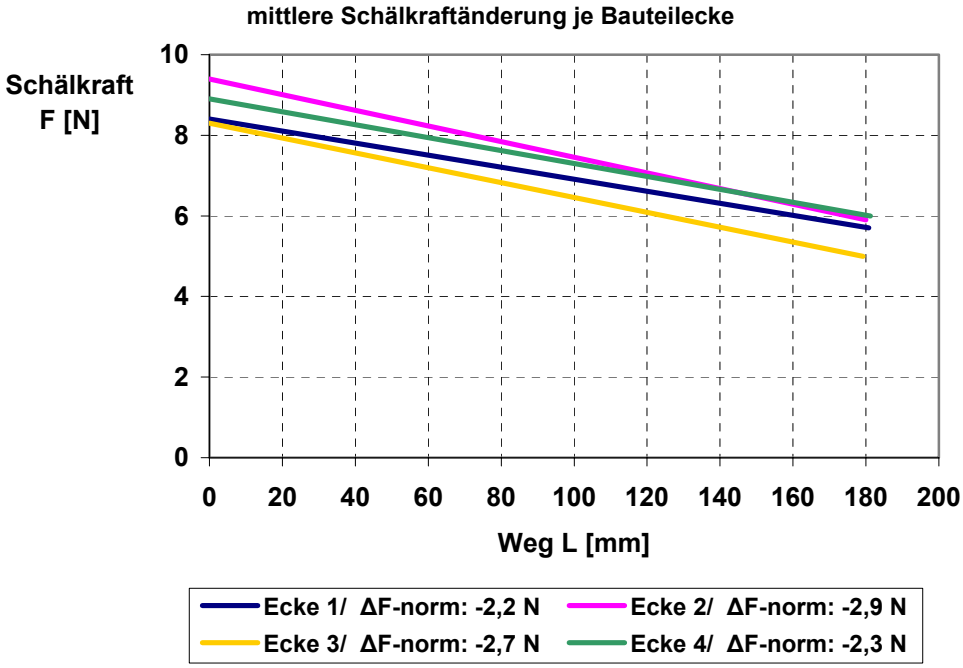


Bild 12: Einfluss der Ecklage auf den Schälkraftverlauf

Für die weiteren Untersuchungen wurden die Prüfkörper in Abhängigkeit von Bauteilmodell und Bauteilgröße nach folgenden Merkmalen eingeteilt:

Bauteilmodell:
- Eckradius r_E
- Kantenradius r_K
- maximale Bauteilhöhe (h_{max})
- nach Verarbeitung verbleibende Höhe der Schmalfläche mit 90° zur Bauteilunterkante (h_{90})

Bauteilgröße:
- Bauteillänge L
- Bauteilbreite B
- Bauteilgrundfläche A
- Bauteilumfang U
- Bauteilschlankheit L/B

Tabelle 3: Ausgewählte Merkmale der verwendeten Bauteilmodelle

Modell	**Eckradius r_E in mm**	**Kantenradius r_K in mm**	**max. Bauteilhöhe h_{max} in mm**	**Schmalflächenhöhe h_{90} in mm**	**Bauteil (Profil, Bearbeitung)**
I	5,0	10,0	22,5	8,7	vor Kantenradius, bereits Abflachung mit r= 41 mm
II	6,0	6,0	19,5	10,4	vor Kantenradius, bereits Abflachung mit r= 50 mm
III	5,0	5,0	19,5	11,0	gefrästes umlaufendes Innenprofil
IV	8,0	5,5	19,5	11,7	vor Kantenradius, bereits Abflachung mit r= 125,5 mm
V	6,0	7,0	19,5	12,5	
VI	7,5	5,0	19,5	14,5	gefrästes asymmetrisches Profil
VII	5,0	5,0	20,5	16,0	aufgedoppelter Rahmen (d= 4 mm)
VIII	5,0	3,0	19,5	16,5	

Das ermittelte Festigkeitsverhalten über die Abschällänge dieser Modelle ist in Bild 13 dargestellt.

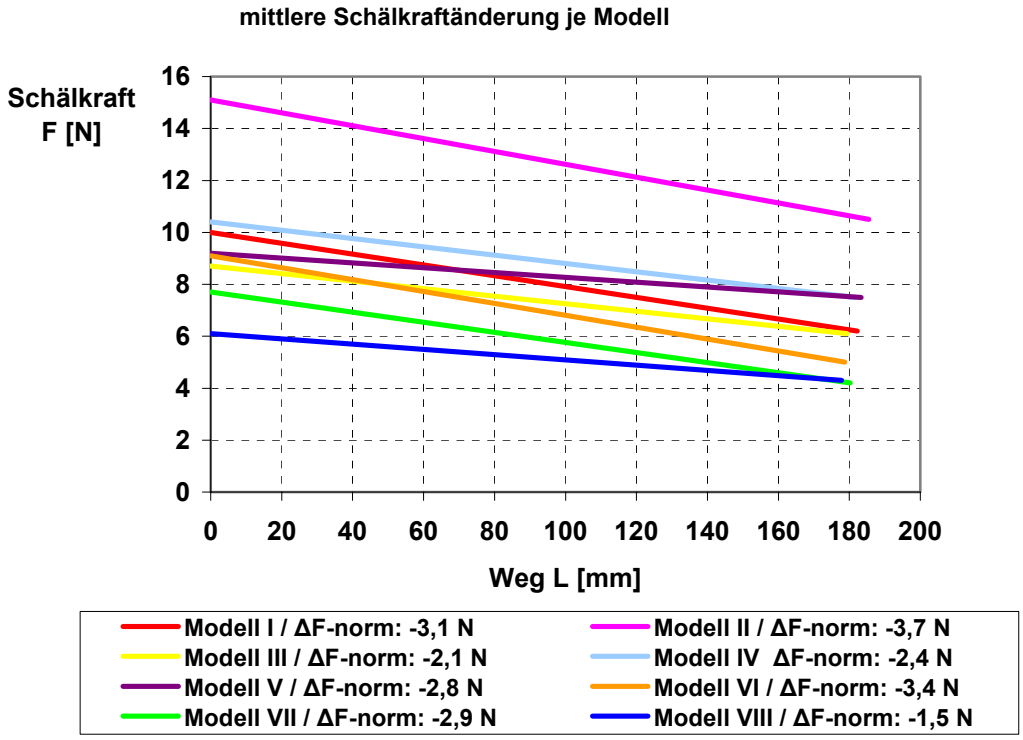


Bild 13: Einfluss des Bauteilmodells auf den Schälkraftverlauf

Dabei ist erkennbar, dass die Modelle mit den 3 größten h_{90}-Höhen und gleichzeitig kleinsten Kantenradien die niedrigsten Festigkeitswerte erreichen. Die Ursache für das hohe Schälkraftniveau des Modell II ist aus den ausgewählten Merkmalen der Bauteilmodelle nicht erkennbar.

In Tabelle 4 sind die ausgewählten Parameter zur Bauteilgröße dargestellt. Es wurde die Abhängigkeit der Schälkraft von den verschiedenen Bauteilgrößen untersucht. Der Schlankheitsgrad wurde als Verhältnis von Länge zu Breite - bezogen auf die Beschickrichtung der Bauteile in der Presse - festgelegt. Die sich daraus ergebenden Festigkeitsverläufe sind in Bild 14 dargestellt.

Tabelle 4: Ausgewählte Merkmale für die Bauteilgröße

Größen-gruppe	Länge L in mm	Breite B in mm	Fläche A in dm²	Umfang U in dm	Schlankheit L/B
A	50	444	2,22	9,88	0,11
B	71	594	4,22	13,3	0,12
C	137	894	12,25	20,62	0,15
D	294	894	26,28	23,76	0,33
E	137	294	4,03	8,62	0,47
F	294	294	8,64	11,76	1,00
G	489	444	21,71	18,66	1,10
H	644	294	18,93	18,76	2,19
I	644	194	12,49	16,76	3,32
J	1190	294	34,99	29,68	4,05

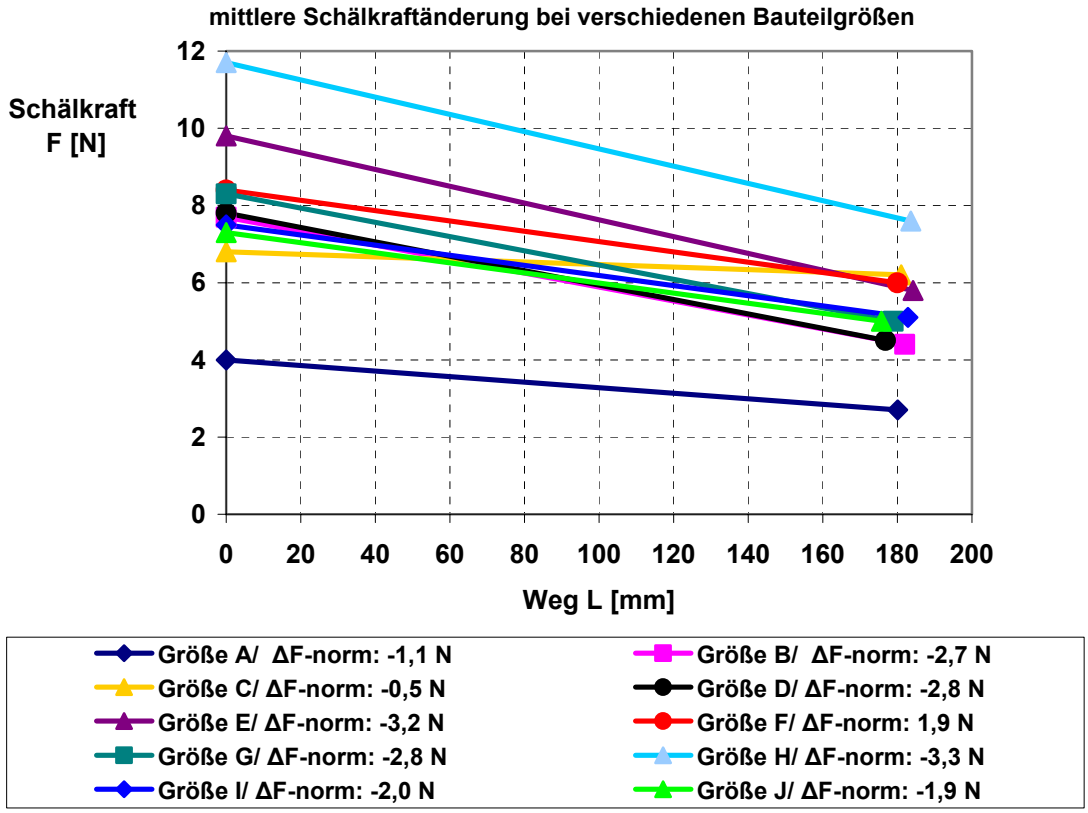


Bild 14: Einfluss der Bauteilgröße auf den Schälkraftverlauf

Im Bild 14 zeigt eine Mehrheit der Größen ein ähnliches Festigkeitsverhalten über die Schälstrecke, sowohl hinsichtlich des Kraftbereiches, als auch der normierten Kraftänderung. Auffallend ist Größe C, die kaum einen Kraftabfall aufweist. Größe H hebt sich durch ihre größeren absoluten Kraftwerte von den anderen Größen ab. Eine relevante Ursache kann anhand der Größendaten nicht abgeleitet werden. Im Gegensatz dazu wird angenommen, dass die ermittelten, sehr kleinen absoluten Kräfte bei Größe A einige Parameter so ungünstig verbinden, dass sich ein derartig niedriges Schälkraftniveau ergibt. Neben der Querlage des Bauteils zur Beschickrichtung der Presse wirkt sich vermutlich die Teilegeometrie mit den sehr kleinen Abmessungen, besonders L = 50 mm, negativ aus. Die Folie, die Klebstoffschicht und der gesamte Werkstoffverbund unterliegen an den Bauteilecken den größten Belastungen. Bei dem Bauteil der Größe A liegen die Ecken 1 und 2 sowie 3 und 4 (s. Anlage 3) in Beschickrichtung besonders eng zusammen. Es überlagern sich die Kraftabfallsbereiche in Ecknähe, was die in stark verminderten Festigkeitswerten bewirken könnte.

4 Horizontale Beschichtung von Prüfkörpern mittels 3D-Laborpresse

4.1 Arbeitsweise der 3D-Laborpresse

Für die Beschichtung der hergestellten Prüfkörper wurde die Multiformlaborpresse LAMP 0909/60 der Fa. Bürkle (s. Bild 15) eingesetzt.

Einige technische Daten (lt. Anlagenbeschreibung):

max. Fläche (Teilegröße):	590 x 590 mm
Höhe (Bauteil):	max. 30 mm
Druck:	max. 0,6 MPa
Betriebstemperatur:	max. 140 °C

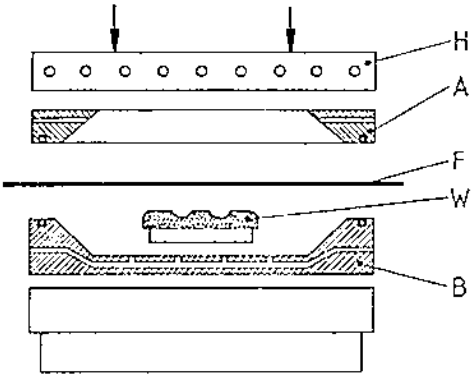
beide Platten sind beheizbar

Arbeitsfunktionen:

- Flachpressen
- Thermoformpressen mit und ohne Membran

Bild 15: Multiformlaborpresse LAMP 0909/60 der Fa. Bürkle

Es wurde das Thermoformpressen ohne Membran angewendet, das mit folgender Funktionsbeschreibung (Bild 16– 18) nach [12] zusammenfassend dargestellt werden kann:

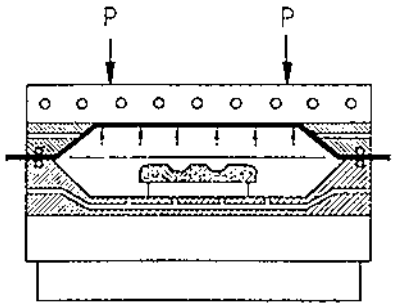


1. Phase:

Die Folie (F) wird zwischen zwei getrennte Rahmenhälften (A/ B) gelegt und überdeckt dabei das darunter liegende beleimte Bauteil (W)

Bild 16: Thermoformpressen ohne Membran – 1. Phase

links: Schema [12]
Mitte: Beleimtes Bauteil auf Presstisch
rechts: Auflage der Folie

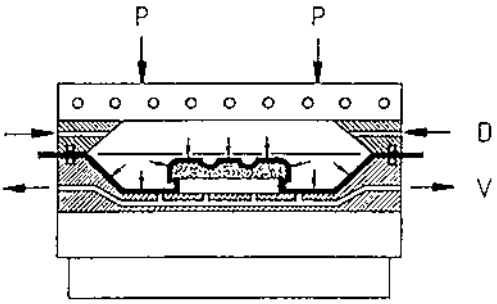


2. Phase:

Die obere Heizplatte (H) wird hydraulisch abgesenkt (P) und die eingespannte Folie gleichmäßig an die obere Heizplatte gedrückt und optimal erwärmt

Schema [12]

Bild 17: Thermoformpressen ohne Membran – 2. Phase



3. Phase:

Die erwärmte Folie wird von unten mit Vakuum (V) über das Bauteil gezogen. Von oben wird Druckluft (D) eingeblasen, um die vollständige Ausformung der Profile zu erreichen.

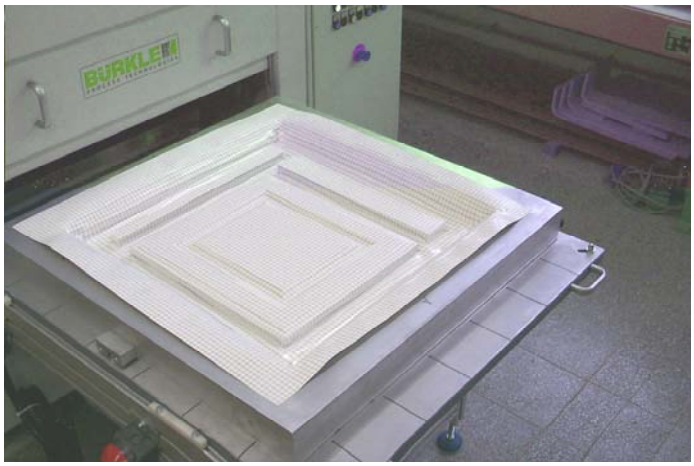


Bild 18: Thermoformpressen ohne Membran – 3. Phase

links: Schema [12]
rechts: Ausgeformte Bauteilbeschichtung

4.2 Versuchsdurchführung

Die Schmalflächen der 3D-Bauteile gelten als Schwachstellen bei dieser Beschichtungsart. Um einen Vergleich der horizontalen und vertikalen Klebflächen herstellen zu können, mussten Prüfkörper mit gleicher Oberflächenqualität (gefräste MDF-Schmalfläche) hergestellt werden. Dieses einzelne Prüfkörper wurden in ihren benötigten Abmessungen schon vor der Beschichtung aus den Bauteilen aus der Industrie hergestellt. Dabei erfolgte der Prüfkörperzuschnitt aus der ehemals gefräste Bauteilschmalfläche so, dass die Prüfkörperklebfläche bei entsprechender Anordnung auf dem Presstisch, dann als horizontale Klebfläche zur Verfügung stand. (siehe Bild 19)

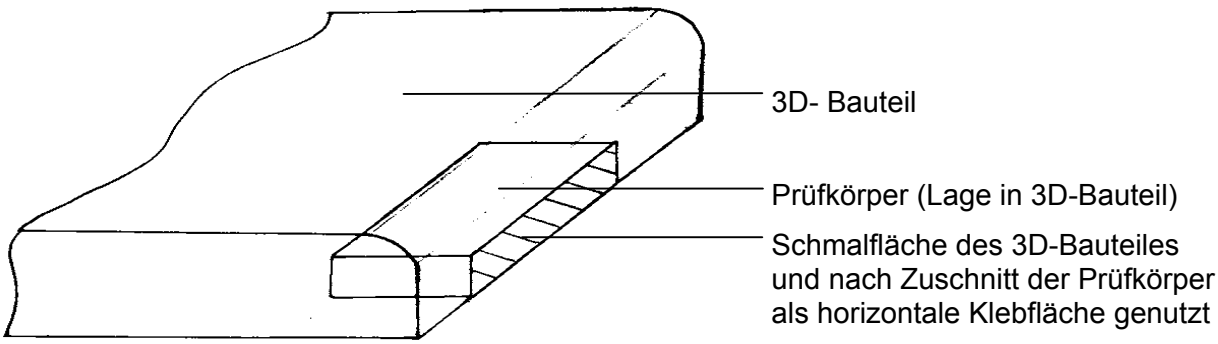


Bild 19: Schematische Darstellung der Prüfkörperherstellung

Die Presse wurde so bestückt, dass 12 Prüfkörper (PK) gleichzeitig beschichtet (s. Bild 20) und nach der festgelegten Ausschnittzeit aus dem Folienverbund gelöst wurden. Jeweils 3 PK wurden nach der Herstellung für 30 min, 120 min, 24 h und 7 d bei Normalklima gelagert und anschließend mit Rollenschälversuch (siehe Bild 7) geprüft.

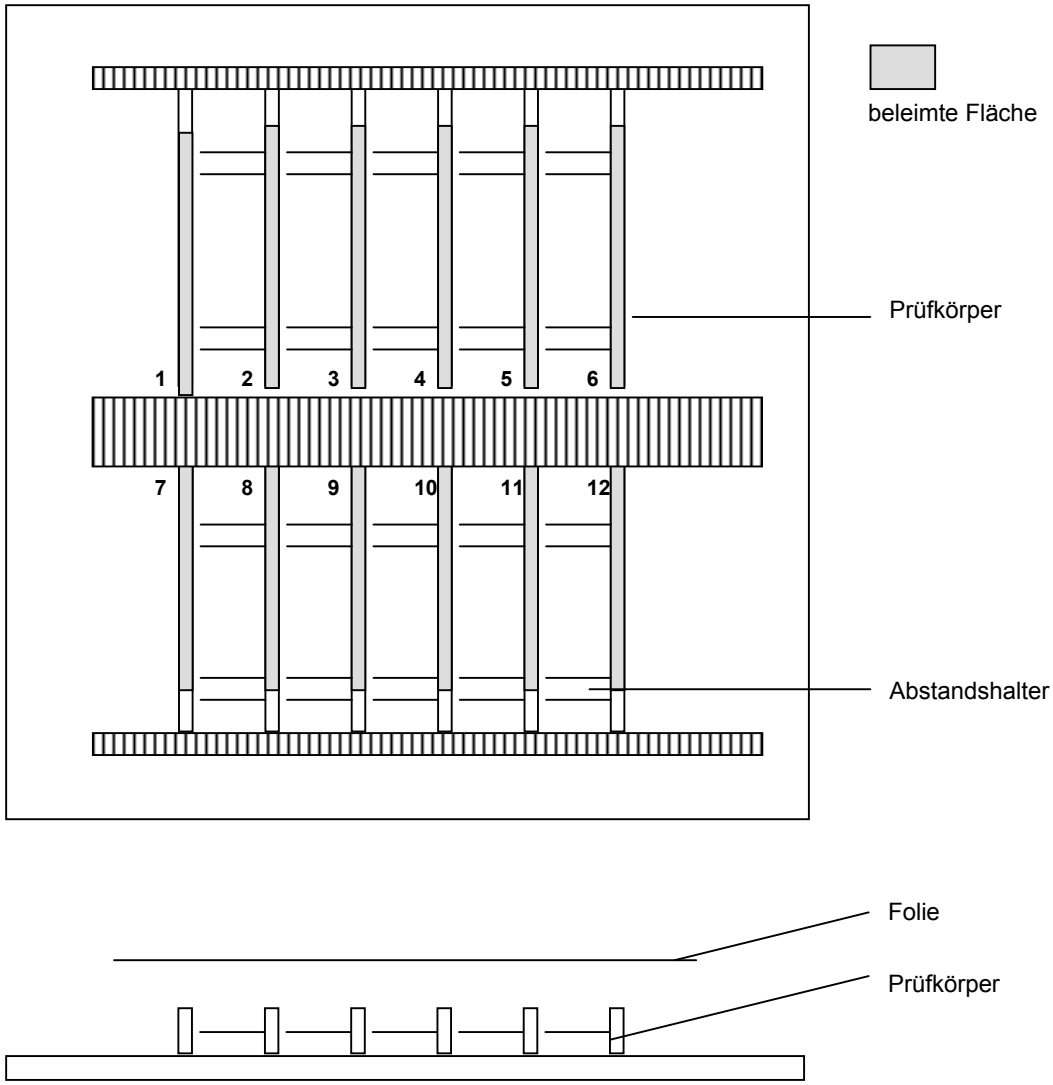


Bild 20: Pressenbelegung zur Prüfkörperherstellung

Für die Beschichtung von Bauteilen mit der Presse wurden bei allen Beschichtungen die Pressparameter in Anlehnung an die bei ALNO verwendeten Parameter gemäß Tabelle 5 eingestellt.

Tabelle 5: Verwendete Pressparameter mit der LAMP 0909/60 der Fa. Bürkle

		PVC	PO
Vorwärmzeit	s	100	120
Presszeit	s	40	30
Pressdruck	MPa	0,45	0,50
Presstemperatur	° C	126	139
Vorevakuierzeit/ Vakuumziehzeit	s/s	1/4	0/6

Eingesetzte Materialien:

MDF- Prüfkörper: Abmessung: 220 x 10 x 30

Folie: PVC–Folie : d = 0,4 mm
PO–Folie : d = 0,5 mm

Klebstoff: Helmitin 34333 mit 5 % Vernetzer D
PUR2 mit 5 % Vernetzer

Variierte Parameter:

Folienart	PVC/ PO
Klebstoffart	Helmitin/ PUR2
Klebstoffauftragsmenge	einfach/ doppelt
Bauteilausschnittzeiten	10 s/ 120 s
Liegezeiten im NK nach Beschichtung:	30 min, 4 h, 24 h, 7 d

4.3 Auswertung/ Ergebnisse

4.3.1 Auswertung der Rollenschälprüfungen

Bei dem Schälwiderstand handelt es sich, wie bereits unter 3.3.1 erläutert, um die Kraft, die dem Abschälen durch den Materialverbund entgegengesetzt wird. (im weiteren auch Schälkraft genannt). Die ausgewerteten Schälkräfte sind Mittelwerte von jeweils 3 Prüfkörpern.

Bei der Untersuchung der Abhängigkeiten durch die variierten Größen konnten folgendes festgehalten werden:

Ausschnittzeit:
Zeit zwischen Pressenöffnung und dem Ausschnitt aus dem Folienverbund. Bezüglich der ermittelten Schälkräfte konnte keine Abhängigkeit zu diesem Parameter nachgewiesen werden. Deshalb wird in der folgenden Messwertauswertung nur die Ausschnittzeit 120 s dargestellt.

Klebstoffauftragsmenge:
Hier wird nur zwischen einmaligem und zweimaligen Klebstoffauftrag unterschieden. Die höheren Schälkräfte sind bei der höheren Klebstoffauftragsmenge nachweisbar.

Folien:
Bei der verwendeten PVC-Folie kann festgestellt werden, wie auch in Bild 21 zu erkennen, dass mit Ausnahme des einfachen PUR2- Klebstoffauftrages, hohe Schälkräfte erreicht wurden.

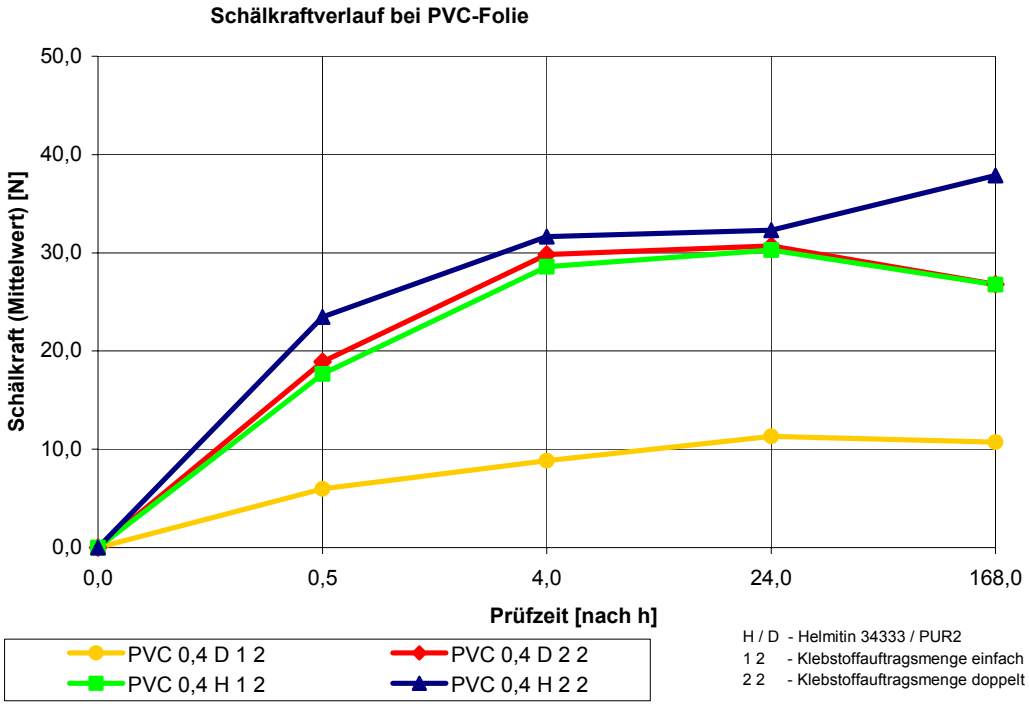


Bild 21: Schälkraftverlauf bei ebenflächigen PVC- Beschichtungen

Bei der PO-Folienbeschichtung (s. Bild 22) ist erkennbar, dass der PUR2-Klebstoff gegenüber dem Helmitin-Klebstoff deutliche Festigkeitsverluste aufzeigt, sowohl zu Beginn der Verklebung als auch nach der Lagerung von 7 Tagen bei NK. Da es sich bei beiden Klebstoffen um PUR-Dispersionen (s. auch 6.1.2) handelt und auch die anderen Parameter konstant gehalten wurden, liegen die Ursachen für die verschiedenen Festigkeiten im Benetzungsverhalten der einzelnen Klebstoffe gegenüber der PO-Folie.

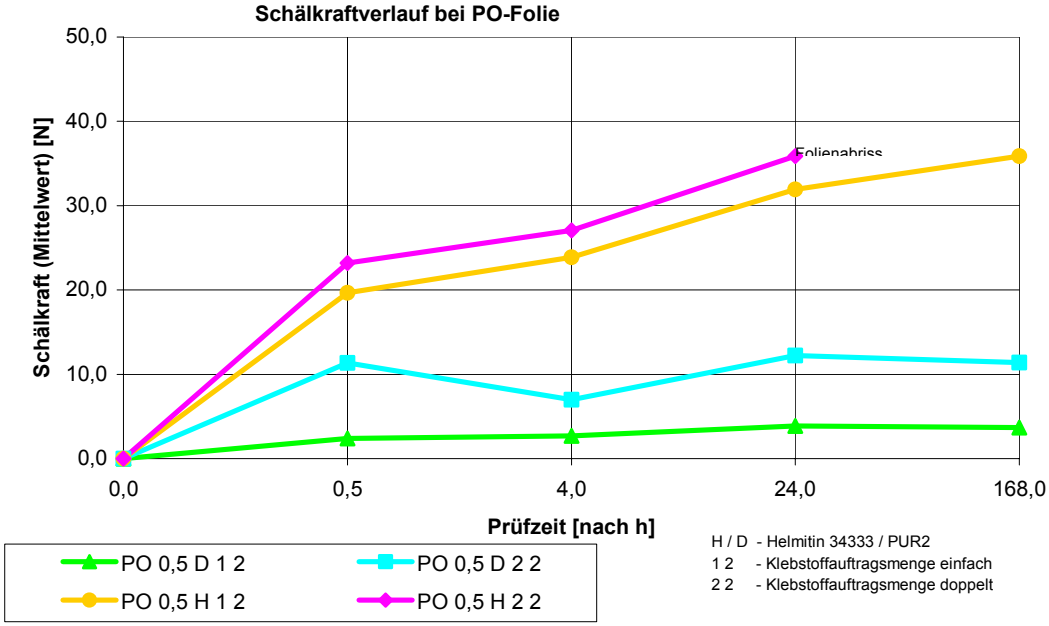


Bild 22: Schälkraftverlauf bei ebenflächigen PO-Beschichtungen

Der Vergleich der Klebstoffe ergibt, dass der Helmitin eine stabil hohe Schälfestigkeit bewirkt, sowohl bei einfachem als auch bei doppeltem Klebstoffauftrag, unabhängig von der verwendeten Folienart.
Bei einer optischen Beurteilung ohne technische Hilfsmittel ist durch den blau eingefärbten Klebstoff die unterschiedliche Haftung des Klebstoffes an der Folie gut erkennbar (Bild 23).

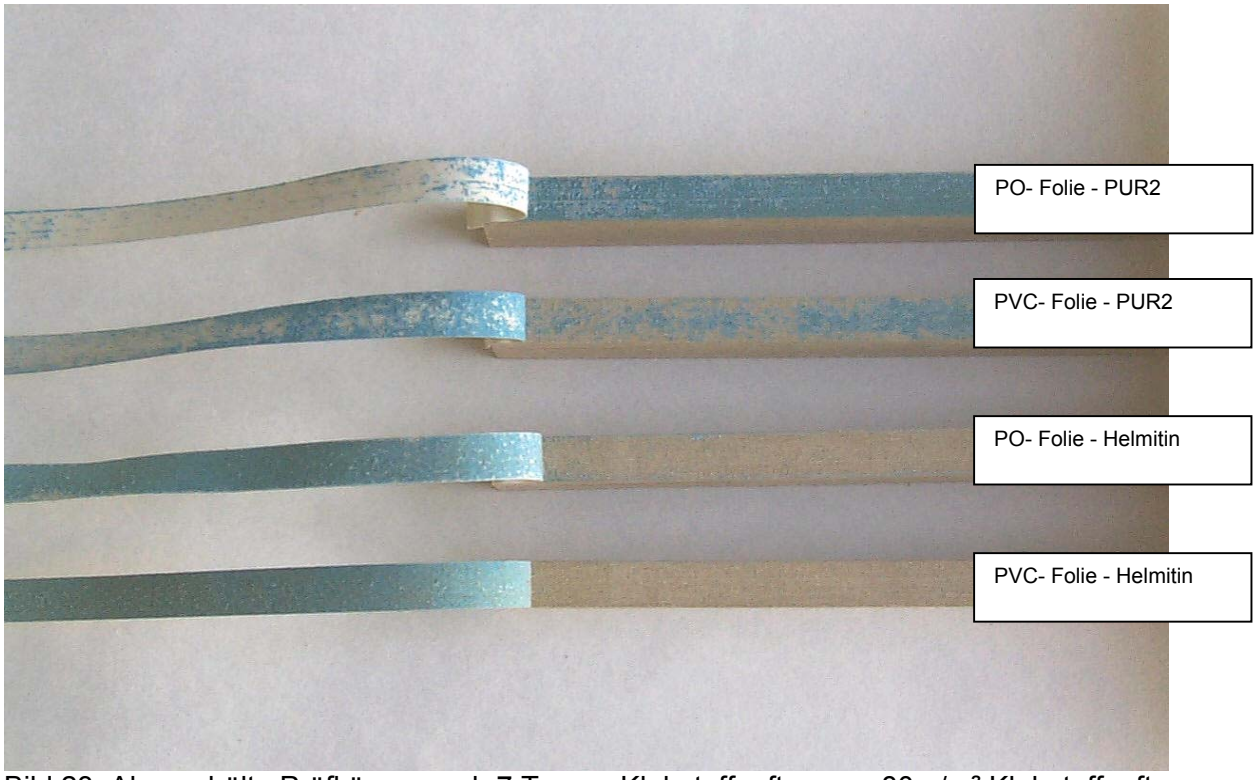


Bild 23: Abgeschälte Prüfkörper nach 7 Tagen, Klebstoffauftrag ca. 80 g/m² Klebstoffauftrag

4.3.2 Mikroskopische Untersuchungen

Von den im Bild 23 gezeigten abgeschälten Prüfkörper wurden mit dem Auflichtfluoreszenzmikroskop „ECLIPSE-E 800“ der Firma Nikon die Klebstoffeindringtiefen (in die MDF- Oberfläche) bei 100facher Vergrößerung im UV-Licht untersucht und die an den Folien anhaftenden Klebstoffschichten gemessen.
MDF-Oberflächen und Folienrückseiten wurden außerdem mit dem Auflichtmikroskop SMZ 1500, Vergrößerungsmaßstab 20:1, untersucht und die Anteile an anhaftendem Klebstoff eingeschätzt.

In Anlage 4 sind die mikroskopischen Untersuchungsergebnisse mit den erfassten Messergebnisse und Fotografien zusammengestellt.

Bei dem Helmitin-Klebstoff kann festgestellt werden, dass der an der Folie haftende Klebstoffanteil eine Fläche von 75 ... 90 % einnimmt. Diese Klebstoffmenge hat bei einer Dicke von 90...120 µm auch noch einen hohen Anteil an Faserausriss zur Folge, womit eine gute Verklebung sowohl mit PVC- als auch mit PO-Folie durch diesen Klebstoff gezeigt wurde. Die Eindringtiefen in die MDF-Oberfläche konnten bei PO-Folie beschichteten Prüfkörpern mit 70-100 µm ermittelt werden.

Der PUR2-Klebstoff kann bei größeren Klebstoffeindringtiefen (75...150 µm) in die MDF-Oberfläche nur eine haftende Klebstoffdicke von 30...70 µm aufweisen. Die Fläche des haftenden Klebstoffs an der Folienrückseite ist im Vergleich zum Helmitin mit maximal 50 % bedeutend kleiner.

5 3D-Beschichtung von Versuchsbauteilen

5.1 Bauteilherstellung

Um vergleichende Untersuchungen bzgl. Klimabeständigkeit und Klebfestigkeit der Beschichtung sowie mikroskopische Betrachtungen an 3D-beschichteten Bauteilen durchführen zu können, wurden vorgefertigte Industrierohteile von ALNO, wie in Pkt. 3. in der Abmessung: 137 x 294 mm verwendet. (siehe Bild 24)

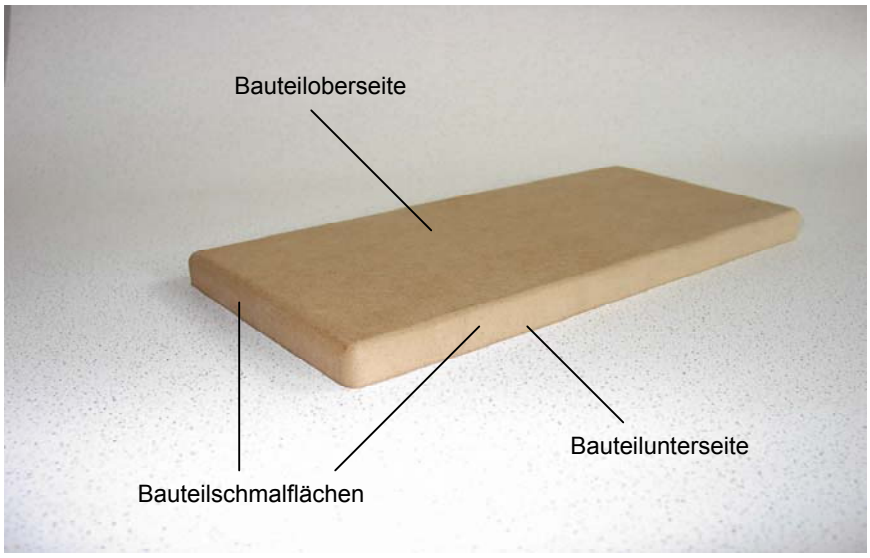


Bild 24: Bauteil für die 3D-Beschichtung in der Laborpresse

Sie wurden nach Varianten gemäß Tabelle 6 und mit den unter 4.2 genannten Pressparametern beschichtet:

Tabelle 6: Übersicht der Herstellungsvarianten und der ermittelten Schälkräfte

Variante	Folie	Klebstoff	Zeit bis zum Ausschnitt [s]	Bauteilunterlagenhöhe [mm]	Feuchte des MDF-Rohteils [%]	Schälkraft (Mittelwert) [N]
1	PVC2	Helmitin	10	8	6,5	20,4
2	PVC2	Helmitin	120	8	6,5	23,5
3	PO2	Helmitin	10	8	6,5	20,5
4	PO2	Helmitin	120	8	6,5	20,4
5	PO2	Helmitin	10	12	6,5	26,8
6	PO2	Helmitin	120	12	6,5	19,4
7	PO2	Helmitin	10	8	5,4	19,9
8	PO2	Helmitin	120	8	10,8	19,3
9	PVC2	PUR2	10	8	6,5	20,2
10	PVC2	PUR2	120	8	6,5	24,9
11	PO2	PUR2	10	8	6,5	13,2
12	PO2	PUR2	120	8	6,5	16,6

13	PO2	PUR2	120	8	5,4	7,3
14	PO2	PUR2	120	8	10,8	15,4
15 (ALNO-Produktion)	PO1	PUR2	10	8	nicht ermittelt	6,8
16 (ALNO-Produktion)	PO1	PUR2	120	8	nicht ermittelt	7,5

Eine Gesamtdarstellung der Varianten mit allen hergestellten Versuchsbauteilen und den durchgeführten Prüfungen sowie deren Ergebnisse ist in Anlage 5 enthalten. Je Herstellungsvariante wurden 20 Bauteile beschichtet. Nach mindestens 7 Tagen Lagerung bei Normalklima (23 °C/ 50 % rel. Luftfeuchte) wurden Klimaprüfungen, die Bestimmung der Schälkraft mittels Rollenschälprüfung und mikroskopische Untersuchungen durchgeführt.
Die Klimaprüfungen wurden nach der AMK-Richtlinie 09/2002 ([22], [23]) durchgeführt und beinhalten folgende 5 Prüfungen mit jeweils 3 Versuchsbauteilen:

Küchenmöbel – Ermittlung der Oberflächentemperatur (Wärmestand):

1. Prüfung: Temperaturbeständigkeit von Möbelfronten

Feuchte- und Klimabeständigkeit von Küchenmöbelbauteilen:

2. Prüfung: Prüfmodul 1: Wasserbeaufschlagung
3. Prüfung: Prüfmodul 2: Wasserdampfbeaufschlagung
4. Prüfung: Prüfmodul 3: Feuchtklimabeständigkeit
5. Prüfung: Prüfmodul 4: Wechselklimabeständigkeit

4 Versuchsbauteile je Herstellungsvariante mit je 2 Prüfkörpern wurden zur Schälkraftbestimmung genutzt. Ein Bauteil je Herstellungsvariante stand für zusätzliche Untersuchungen zur Verfügung.

5.2 Bestimmung der Festigkeit des Klebverbundes an der Schmalfläche

Aus 4 Bauteilen/Beschichtungsvariante wurden jeweils 2 Prüfkörper hergestellt und mit dem Rollenschälprüfung gemäß 3.3.1 die Festigkeiten der Verklebung an den Schmalflächen nach 7 Tagen NK bestimmt.

Ergebnisse:

Aus Tabelle 6 ist erkennbar, dass die Mittelwerte der gemessenen Schälkräfte der Varianten 3 – 8 (PO-Folienbeschichtung mit Helmitin-Klebstoff) im gleichen Wertebereich liegen, wie die der PVC-Beschichtungen. Ein Einfluss von Ausschnittzeit, Bauteilunterlage und Klimalagerung vor der Beschichtung ist nicht erkennbar. Die Schälkraftmittelwerte der PO-Folienbeschichtungen mit dem PUR2-Klebstoff (ALNO- und Laborbauteile) bestätigen mit den deutlich geringeren Werten, dass dieser Klebstoff weniger geeignet ist. Für diese Verbundkombination ist eine längere Liegedauer vor dem Ausschnitt und eine etwas höhere Bauteilfeuchte von Vorteil für die Verklebung.

5.3 Prüfung nach AMK-Merkblatt 09/2002

Jeweils 3 Prüfkörper jeder Herstellungsvariante wurden den Prüfklimaten der AMK-Richtlinie vom September 2002 ausgesetzt. Diese Richtlinie beinhaltet folgende Teilprüfungen (gemäß [22], [23]):

<u>Küchenmöbel – Ermittlung der Oberflächentemperatur (Wärmestand) - Temperaturbeständigkeit von Möbelfronten (gem. Pkt. 3.3)</u>

Durchführung: Prüfling wird in einem Wärmeschrank mit erzwungener Umluft folgender Temperaturbelastung unterworfen.

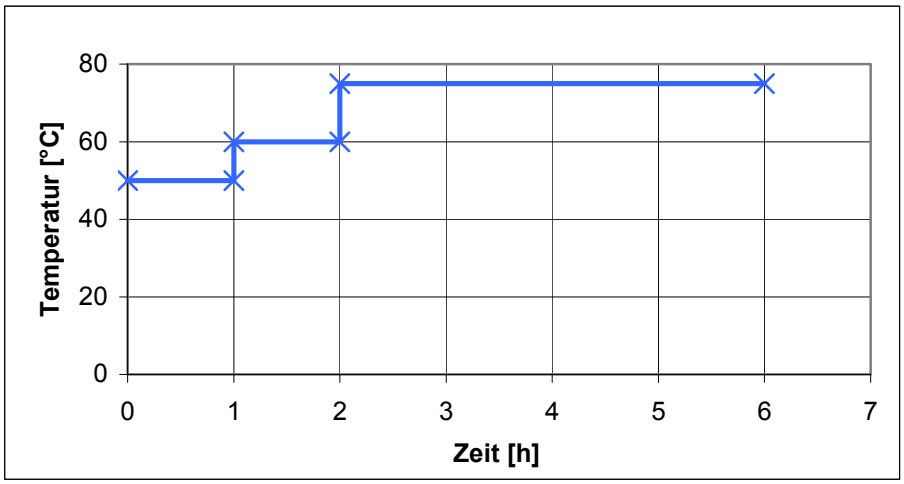


Bild 25: Temperaturzyklus

Beurteilung: nach 1 h bei 50 °C bzw. 60 °C Kurzbeurteilung und nach 4 h bei 75 °C Endbeurteilung - visuell auf Schädigungen/ Veränderungen (Quellungen, Ablösungen, Fugenbildung)

Anforderung: keine Veränderungen zulässig

Feuchte – und Klimabeständigkeit von Küchenmöbelbauteilen

- Prüfmodul 1: Wasserbeaufschlagung

Durchführung: Prüflinge stehen mit dem Schmalflächenbereich im Wasserbad (T = 20 ± 2 °C)
Mindesteintauchtiefe über Klebfuge: 20 mm
Prüfdauer: 2 h für Korpusmaterial, Fronten, Wangen und Panelverkleidungen
48 h für Arbeitsplatten

Beurteilung: visuell und haptisch auf Schädigungen (Quellungen, Ablösungen, Fugenbildung)

Anforderungen: keine Schädigungen zulässig (nach 24-stündiger Klimalagerung)

- Prüfmodul 2: Wasserdampfbeaufschlagung

Durchführung: Prüflinge hängen mit zu prüfendem Schmalflächenbereich über Wasserdampfbad
Abstand Probenunterkante zur Wasseroberfläche: ca. 300 mm
Prüfdauer: 5 Zyklen a 30 min Dampfbeaufschlagung und 30 min Trocknung (außerhalb der Vorrichtung)

Beurteilung: am Ende jedes Zyklus und nach abschließender 24-stündiger Lagerung (23 °C, 50 % rel. LF) visuell und haptisch auf Schädigungen (Quellungen, Ablösungen, Fugenbildung)

Anforderungen: keine Schädigungen zulässig

- Prüfmodul 3: Feuchtklimabeständigkeit

Durchführung: Prüflinge sind im Klimaschrank so gelagert, dass das Klima überall gleichzeitig wirken kann

Mindestabstand zwischen den Proben: 30 mm
Prüfdauer: 14 Tage
Prüfklima: (40 ± 2) °C und (85 ± 5) % rel. Luftfeuchte

Beurteilung: nach 4, 7, 10 und 14 Tagen visuell auf Schädigungen (Quellungen, Ablösungen, Fugenbildung)

Anforderungen: keine Schädigungen zulässig

- Prüfmodul 4: Wechselklimabeständigkeit

Durchführung: Prüflinge sind im Klimaschrank so gelagert, dass das Klima überall gleichzeitig wirken kann
Mindestabstand zwischen den Proben: 30 mm

Prüfdauer: Zyklus gemäß Bild 26 ist 20mal zu absolvieren

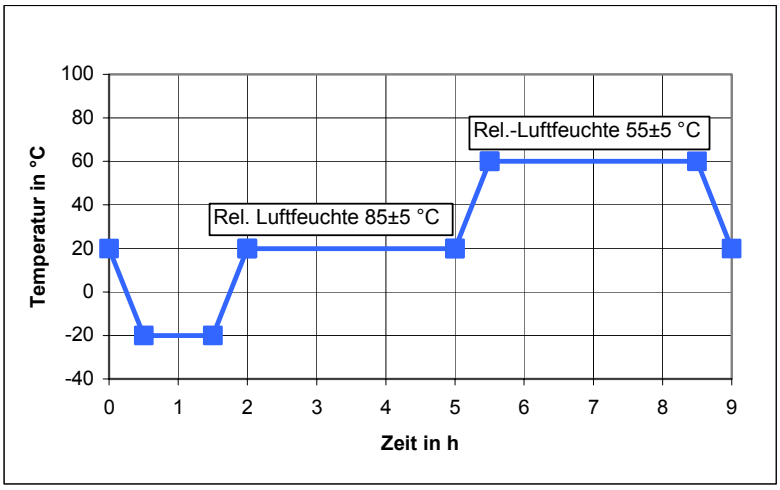


Bild 26: Zyklus zum Wechselklimatest

Beurteilung: nach 3, 5, 10, 14 und 20 Zyklen visuell auf Schädigungen (Rissbildung, Ablösungen, Fugenbildung, Verfärbungen)

Anforderungen: keine Schädigungen zulässig

5.4 Ergebnisse

Die erreichten Prüfergebnisse der einzelnen Prüflinge sind in der Anlage 5 zusammengefasst.

Es wurde festgestellt, dass alle Versuchsbauteile mit PO- Folienbeschichtung (bis auf eine Ausnahme) die Wärmestandprüfung bestanden haben, unabhängig von der Herstellungsvariante. Die Mehrheit der PVC-beschichteten Bauteile haben diese Prüfung nicht bestanden. Sie heben sich bei der differenziert durchgeführten Bewertung erheblich von den PO-beschichteten Bauteilen ab, was in dieser Deutlichkeit bei keiner anderen Prüfmethode erkennbar ist. Es wird vermutet, dass der Materialverbund mit der PVC-Folie, aufgrund des thermischen Verhaltens von PVC (siehe 6.1.1.1) und der damit verknüpften Anforderung an den Klebstoff, nicht in der Lage ist, dieser Belastung standzuhalten. Durch die höhere Temperaturbelastbarkeit des PO-Materials ist auch die Auswirkung auf den Klebstoff und somit auf den Materialverbund geringer.

Bei den Prüfungsmodulen Feuchte- und Klimabeständigkeit kann zusammenfassend festgestellt werden, dass bei Prüfmodul 1 - Wasserbeaufschlagung - bis auf einzelne Ausnahmen die Prüfung bestanden wurde. Es ist dabei kein deutlicher Einfluss der variierten Größen erkennbar. Einzelne Ausfälle sind möglicherweise auf Klebstoffauftragsschwankungen zurückzuführen. Besonders schlechte und stark schwankende Prüfungsergebnisse sind bei der Wasserdampfbeaufschlagung unabhängig von der Bauteilherstellungsvariante festgestellt

worden. Bei dieser Variante kommt zu den hohen Temperaturen noch die zusätzliche Belastung durch Feuchte. Bei den Modulen 3 und 4 sind keine Zusammenhänge zu dem Einfluss der Herstellvariante ableitbar. Ursache dafür ist möglicherweise die geringe Anzahl der Prüflinge.
Im Vergleich zu den ermittelten Schälkräften bei den einzelnen Varianten muss festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Schälkraftmessungen (Kantenfestigkeit) keine Rückschlüsse auf das Standhalten gegenüber klimatischen Beeinflussungen zulassen. Beim Wärmestand kann eher die Aussage von [25] unterstützt werden, dass dieser einzig von der Folienverformungstemperatur bestimmt wird.

5.5 Mikroskopische Untersuchungen

Mittels mikroskopischer Untersuchungen wurden die Klebfugen ausgewählter Bauteile nach den unter 5.3 durchgeführten Klimaprüfungen und einem Bauteilaufschnitt an den in Bild markieren Stellen analysiert. Insbesondere wurde der Übergangsbereich Schmalfläche/ Bauteilunterseite, an dem technologisch bedingt die Klebfuge offen liegt, betrachtet. Hier zeigten sich nach den Klimaprüfungen vielfach Ablöse- und Quellungserscheinungen. Es wurde festgestellt, wo Ablösungen auftraten (Klebstoff-MDF oder Klebstoff-Folie) und Messungen bezüglich der Klebstoffdicke und Klebstoffeindringtiefe durchgeführt.

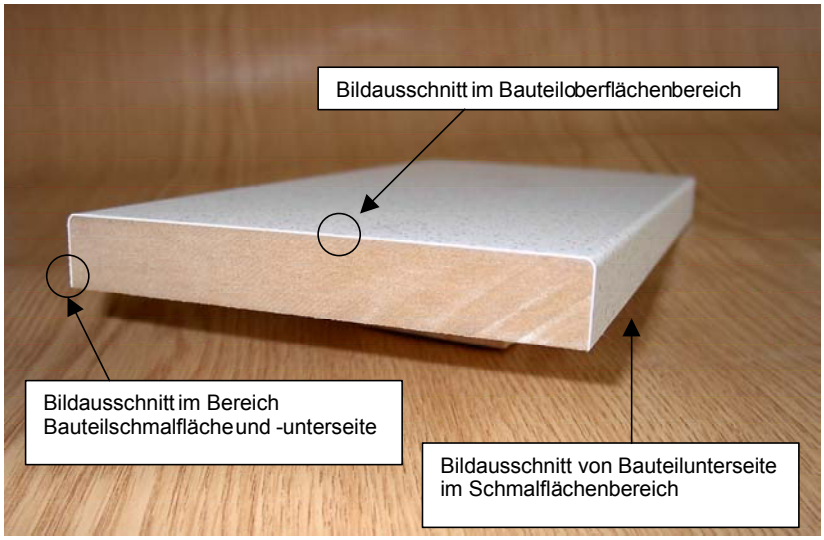


Bild 27: Mikroskopische Untersuchungsbereiche am Bauteil

Mit dem Auflichtmikroskop SMZ 1500 erfolgten Untersuchungen im Normallicht (bei 10 ... 30 facher Vergrößerung). Es wurden die Kantenbereiche untersucht, Aufquellungen festgestellt und vermessen. Diese Untersuchungen wurden durch Betrachtungen mit dem Auflichtfluoreszenzmikroskop „ECLIPSE-E 800“ (bei 100 facher Vergrößerung im UV-Licht) ergänzt. Dabei wurden die Klebstoffeindringtiefen (in die MDF) sowie die Klebstoffdicken gemessen und Ablösebereiche lokalisiert. Auftretende Besonderheiten wurden festgestellt und fotografiert.

Es wurde pro Klimaprüfung je ein Bauteil mit positivem und negativem Prüfergebnis, das mit PO-Folie unter Verwendung von Helmitin-Klebstoff beschichtet worden war, ausgewählt. Bei allen 10 untersuchten Bauteilen wurden Folienablösungen an den Bauteiloberseiten über die gesamte Bauteilbreite festgestellt.

Ergebnisse :

Es wurden Folieablösungen bei allen Bauteilen an den Bauteiloberseiten über die gesamte Bauteilbreite (130 mm) festgestellt. An der Folie haftet eine Faserschicht von 50 ... 100 ... 150 µm, die mit Klebstoff durchdrungen ist. Die Ablösung erfolgt bis unmittelbar vor die Rundung im Kantenbereich zur Bauteilschmalfläche. Zwischen den abgelösten Bereichen und der MDF ist ein etwa 50 ... 120 µm breiter Spalt zu erkennen.

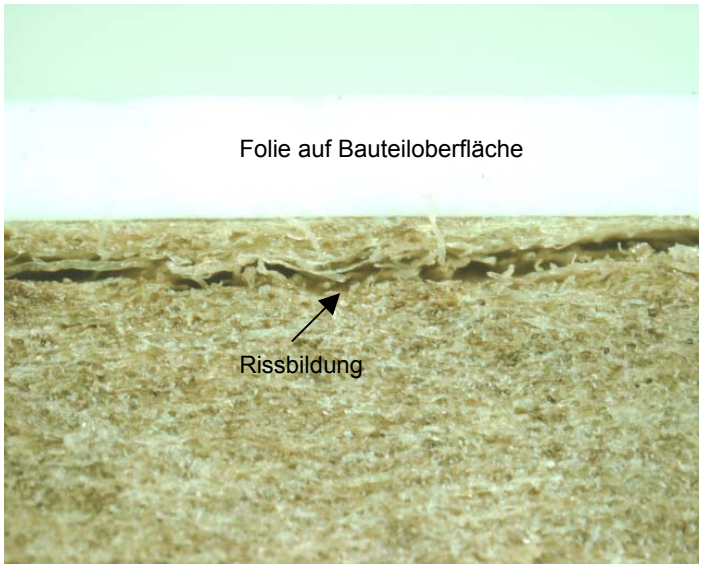


Bild 28: Ablösung der Folie an Bauteiloberseite

Die in Bild 28 dargestellte Ablöseerscheinung ist vermutlich auf die Rückstellkräfte der PO-Folie zurückzuführen. Die Verformung der Folie über den Eckbereich ist als Ursache dafür zu sehen, dass diese Erscheinung in diesem Bereich nicht beobachtet wurde. Es wird aufgrund der Richtungsänderung der Folie ein Gegendruck auf den Eckbereich der MDF erzeugt, der diesen Schrumpfkräften entgegen wirkt. Die wirksamen Schrumpfkräfte der Folie reichen für eine solche Ablöseerscheinung wie an der Oberfläche nicht aus. Somit ist die Folie an diesen Kanten „fixiert“. Das verstärkt die Belastung der Bauteiloberflächenverklebung aufgrund der Dimensionsverringerung der PO-Folie, die durch die Abkühlung nach der Fixierung auf der Bauteiloberfläche einsetzt. Diese wirkenden Kräfte werden zwar durch den Klebstoff aufgefangen (kein Folieabriss von der Klebschicht), aber die oberste MDF-Schicht hält diese Belastung nicht aus und es kommt zu den erkennbaren Rissen. Da an den Schmalflächen diese Erscheinungen nicht auftraten, werden die Schrumpfkräfte als Ursache dieser Beobachtung bestätigt. Weil an den Bauteilschmalflächen ein Ende „frei beweglich“ ist, werden die Kräfte des Folienrückzugs durch die Elastizität des Klebstoffes nicht in diesem Maße auf den MDF-Untergrund übertragen. Es ist der Folienrückzug an der unteren Bauteilschmalflächenkante erkennbar.
Eine Art Dampfstoßeffekt als Ursache für diese Rissbildung kann ausgeschlossen werden, weil die dafür notwendigen Temperaturen im Bauteil nicht erreicht werden.

Die dargestellten Effekte bedürfen weiterführender Untersuchungen, bei denen das Trägermaterial MDF wesentlich stärker einbezogen werden muss.

Im Bereich der Schmalfläche wurden bei allen ausgewählten Bauteilen im unteren Bereich (Kantenbereich) Schrumpf- bzw. Rückzugserscheinungen der Folie und des Klebstoffes in der Größe von etwa 230 µm deutlich. So entsteht unmittelbar im Kantenbereich eine Fehlstelle von etwa 50 µm Breite, die als Eintrittspforte für Feuchtigkeit, insbesondere Wasserdampf zugänglich ist.

Die Kantenbereiche (Ecke Schmalfläche unten/ Folie Bauteilunterseite) zeigten in den meisten Fällen Fehlstellen in Form von Fugenbildungen. Ursachen hierfür sind in erster Linie Schrumpferscheinungen der Folien (mehr oder weniger bei allen Bauteilen), aber auch Ablöseerscheinungen im Schmalflächenbereich. Bei den mikroskopischen Untersuchungen musste auch festgestellt werden, dass die nach Klimalagerung optisch als fehlerfrei eingestuften Bauteile auch derartige Fehlstellen zeigen. Damit sind Spätschäden vorprogrammiert. Die

Übersicht zu den detaillierten Messwerten enthält Tabelle 7 und eine Auswahl an mikroskopischen Aufnahmen Tabelle 8.

Zur Klebstoffschicht wurden folgende Messwerte ermittelt:

Klebstoffschicht (Oberseite): etwa 0-10 µm
Klebstoffschicht (Schmalfläche): etwa 10-20 µm

Ähnliche Klebstoffschichtdicken wurden bei allen Bauteilen gemessen.
Die Eindringtiefen des Klebstoffes sind nicht (sicher) erkennbar.

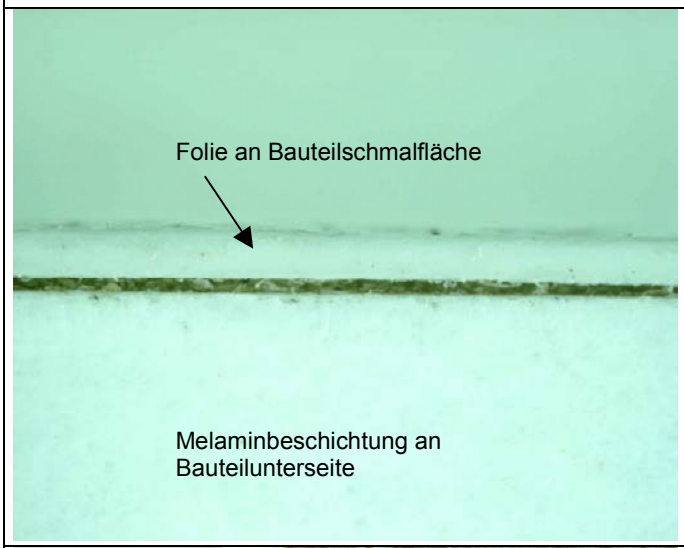
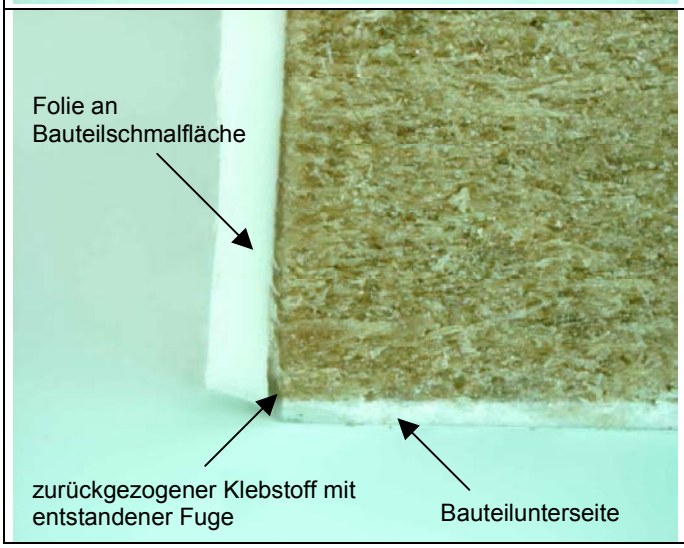
Tabelle 7: Mikroskopische Auswertungen ausgewählter Bauteile nach Klimaprüfung

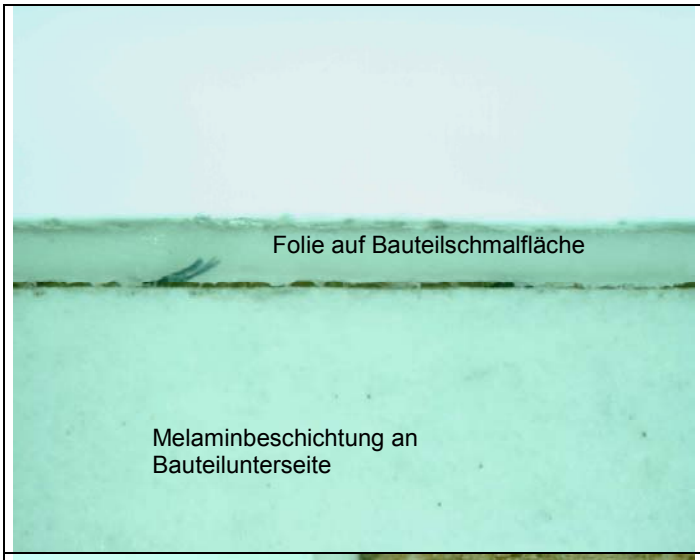
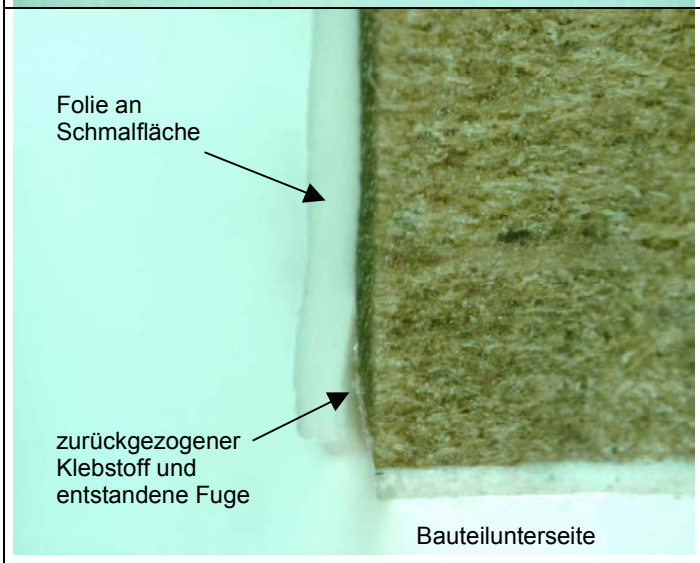
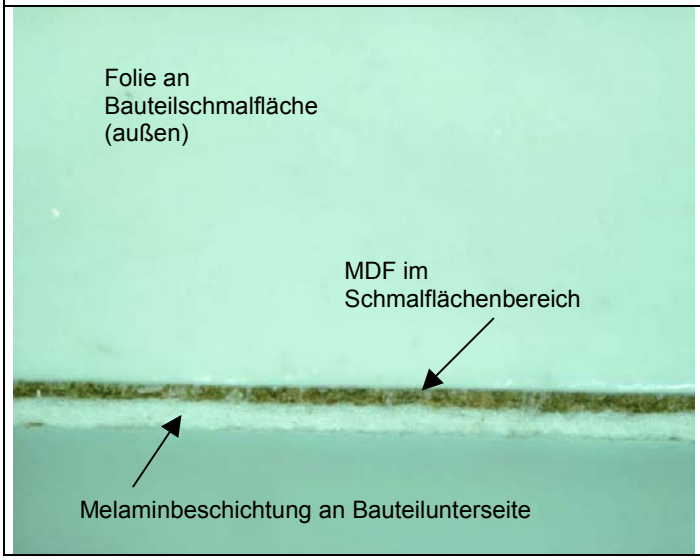
Bauteil(*)	**Bewertung**	**Mikroskopische Bewertung der Klebfuge im Kantenbereich zur Unterseite**
1. Wärmestand		
142**	fehlerhaft	- Enthaftungen auf der Bauteiloberseite - Folie zurückgezogen, im Eckbereich (unten) 55 ... 60 µm breite Fuge - Foliendicke: Oberseite: 480 µm, Schmalfläche: 200 µm
63	fehlerfrei	- Enthaftungen auf der Bauteiloberseite - Folie zurückgezogen, im Eckbereich (unten) 55 ... 60 µm breite Fuge - Foliendicke: Oberseite: 490 µm, Schmalfläche: 240 µm
2. Wasserbeaufschlagung		
46	fehlerhaft	- Enthaftungen auf der Bauteiloberseite - Folie zurückgezogen, im Eckbereich (unten) 55 ... 60 µm breite Fuge - Foliendicke: Oberseite: 470 µm, Schmalfläche: 240 µm
66	fehlerfrei	- Enthaftungen auf der Bauteiloberseite - Folie zurückgezogen, im Eckbereiche (unten) 55 ... 60 µm breite Fuge - Foliendicke: Oberseite: 470 µm, Schmalfläche: 280 µm
3. Wasserdampf		
68	fehlerhaft	- Enthaftungen auf der Bauteiloberseite - Folie zurückgezogen, im Eckbereich (unten) 55 ... 60 µm breite Fuge, deutliche Quellerscheinungen - Foliendicke: Oberseite: 470 µm, Schmalfläche: 260 µm
69**	fehlerfrei	- Enthaftungen auf der Bauteiloberseite - Folie zurückgezogen, im Eckbereiche (unten) 55 ... 60 µm breite Fuge - Foliendicke: Oberseite: 470 µm, Schmalfläche: 240 µm
4. Feuchtklima		
230	fehlerhaft	- Enthaftungen auf der Bauteiloberseite - Folie zurückgezogen, im Eckbereich (unten) 55 ... 60 µm breite Fuge - Foliendicke: Oberseite: 480 µm, Schmalfläche: 200 µm
70	fehlerfrei	- Enthaftungen auf der Bauteiloberseite - Folie zurückgezogen, im Eckbereich (unten) 55 ... 60 µm breite Fuge - Foliendicke: Oberseite: 480 µm, Schmalfläche: 280 µm
5. Wechselklima		
95	fehlerhaft	- Enthaftungen auf der Bauteiloberseite - Folie zurückgezogen, im Eckbereich (unten), an einer Schmalseite Enthaftungen - Foliendicke: Oberseite: 470 µm, Schmalfläche: 210 µm
93**	fehlerfrei	- Enthaftungen auf der Bauteiloberseite - Folie zurückgezogen, an einer Schmalseite Enthaftungen - Foliendicke: Oberseite: 480 µm, Schmalfläche: 230 µm

* Versuchsbauteilnummerierung ist Anlage 5 zu entnehmen

** Abbildungen in Tabelle 8

Tabelle 8: Ausgewählte Aufnahmen der mikroskopischen Untersuchungen nach Klimaprüfungen

	Bauteil 142; M 50:1 Bauteilquerschnitt; Blick auf Bauteiloberflächenbereich. Bei allen 10 untersuchten Bauteilen wurden Folienablösungen an den Bauteiloberseiten (über die gesamte Bauteilbreite 130 mm) festgestellt. An der Folie haftet dabei eine Faserschicht von 50 ... 100 ... 150 µm, die mit Klebstoff durchdrungen ist. Die Ablösung erfolgt bis unmittelbar vor die Rundung. Zwischen den abgelösten Bereichen und der MDF ist ein etwa 50 ... 120 µm breiter Spalt zu erkennen.
	**Bauteil 142; M 50:1** Blick auf die Bauteilunterseite Fuge im Kantenbereich etwa 55 ... 60 µm breit.
	**Bauteil 142; M 50:1** Bauteilquerschnitt, Blick auf Eckbereich Bauteilschmalfläche und -unterseite Folie einschließlich Klebstoff leicht zurückgezogen, dadurch entsteht im Kantenbereich eine offene Fuge.

	**Bauteil 69; M 50:1** Blick auf die Bauteilunterseite; Fuge im Kantenbereich auch bei dem vermeintlich intakten Bauteil.
	**Bauteil 93; M 50:1** Bauteilquerschnitt, Blick auf Eckbereich Bauteilschmalfläche und -unterseite Folie stark zurückgezogen, dadurch entsteht im Kantenbereich eine offene Fuge.
	**Bauteil 93; M 50:1** Blick auf die Bauteilschmalfläche (unterer Bereich); Folie einschließlich Klebstoff haben sich stark zurückgezogen, dadurch wird die MDF im Kantenbereich freigelegt.

Um die Ursachen der Ablöseerscheinungen bei den untersuchten Bauteilen umfassender analysieren zu können, wurden weitere Bauteile der mikroskopischen Betrachtung unterzogen. Es wurden 4 Bauteile ohne Klimalagerung mit PO- bzw. PVC-Folie und Helmitin bzw. PUR2 Klebstoff untersucht. Außerdem wurden auch noch 2 Versuchsbauteile gleicher Bauteilgröße, die bei der Fa. ALNO (PO-Folie/PUR2) beschichtet wurden, betrachtet.

Ablöseerscheinungen im Schmalflächenbereich traten besonders bei den in der ALNO- Produktion hergestellten Prüfkörpern auf. Da hier der PUR2-Klebstoff verwendet wurde, bestätigt sich, dass dieser Klebstoff für die Verarbeitung mit PO- Folie ungeeignet ist.

Die bei dem Teil 2 der mikroskopischen Untersuchungen festgestellten Beobachtungen sind in Tabelle 9 zusammengestellt und mit ausgewählten Bildern in Tabelle 10 veranschaulicht.

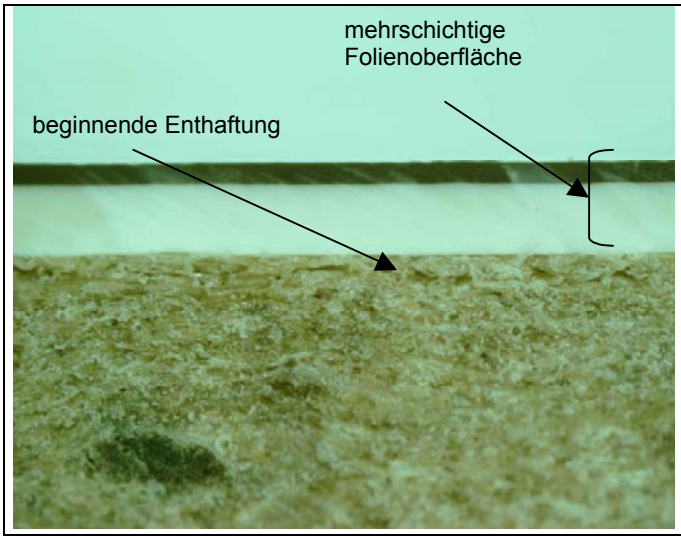
Tabelle 9: Weitere mikroskopischen Auswertungen ausgewählter

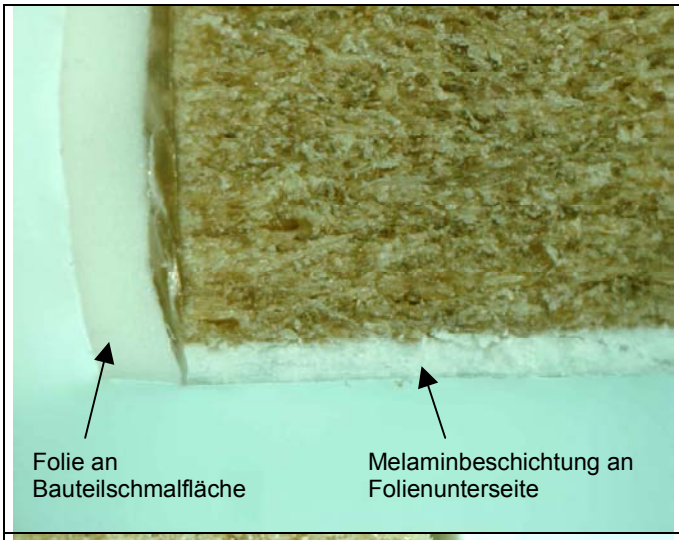
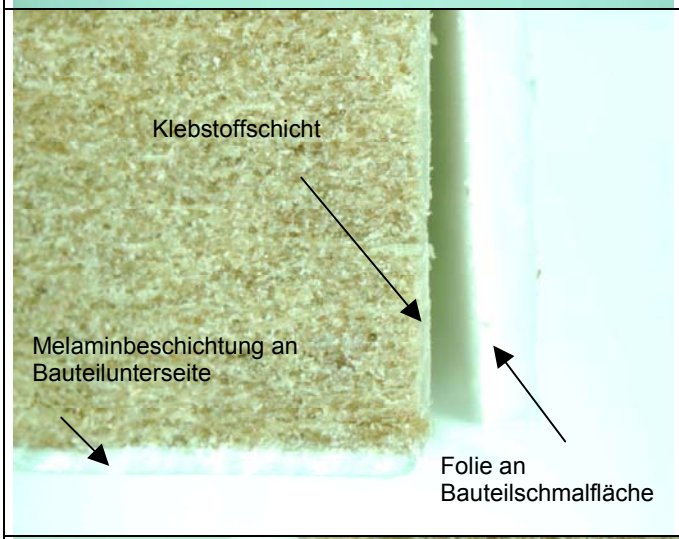
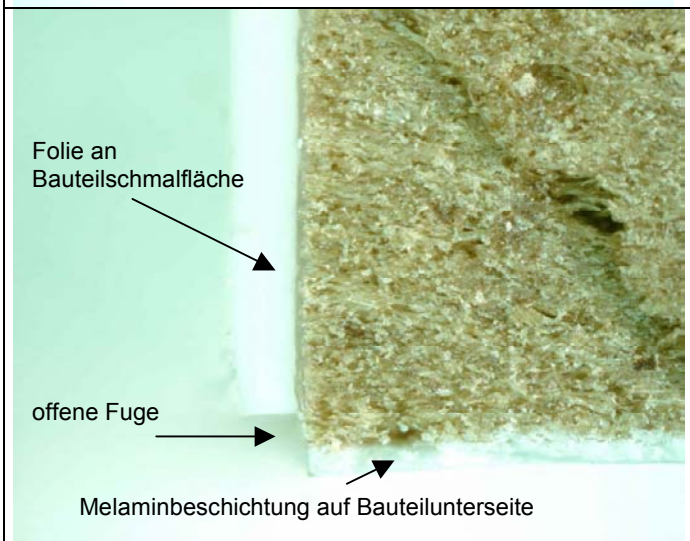
Bauteil*	**Material**	**Mikroskopische Bewertung der Klebfuge im Kantenbereich zur Unterseite**
40**	PVC-Helmitin (ohne Klima)	- Enthaftungen an der Bauteiloberseite deuten sich an Eckbereiche (unten) i. O. - Foliendicke: Oberseite: 345 µm, Schmalfläche: 270 µm
160**	PO-Helmitin (ohne Klima)	- keine Enthaftungen an der Bauteiloberseite - Foliendicke: Oberseite: 460 µm, Schmalfläche: 270 µm
200	PVC-PUR2 (ohne Klima)	- keine Enthaftungen an der Bauteiloberseite - Foliendicke: Oberseite: 370 µm, Schmalfläche: 270 µm
280	PO-PUR2 (ohne Klima)	- keine Enthaftungen an der Folienoberseite - Foliendicke: Oberseite: 490 µm, Schmalfläche: 260 µm
331**	PO-PUR2 (Wärmestand, o. Fehler)	- keine Enthaftungen an der Folienoberseite, aber starke Ablösungen an einer Schmalfläche (nur Folie; Klebstoff an MDF) - deutlicher Versatz/ Schrumpfung im Eckbereich (250 µm) - Foliendicke: Oberseite: 420 µm, Schmalfläche: 250 µm
335**	PO-PUR2 (Wasserdampf, fehlerhaft)	- keine Enthaftungen an der Folienoberseite, aber starke Ablösungen an einer Schmalfläche (nur Folie; Klebstoff an MDF) - deutlicher Versatz/Schrumpfung im Eckbereich (250 µm) - Foliendicke: Oberseite: 440 µm, Schmalfläche: 280 µm

* Versuchsbauteilnummerierung ist Anlage 5 zu entnehmen

** Abbildungen in Tabelle 10

Tabelle 10: Weitere ausgewählte Aufnahmen von den mikroskopischen Untersuchungen

	**Bauteil 40; M 50:1** Bauteil quer aufgetrennt; Blick auf Folie und MDF. Enthaftungen an der Folienoberseite deuten sich an.

	**Bauteil 160; M 50:1** Bauteilquerschnitt, Blick auf Eckbereich: Bauteilschmalfläche und -unterseite Folie zurückgezogen
	**Bauteil 331; 50:1** Bauteilquerschnitt, Blick auf Eckbereich: Bauteilschmalfläche und -unterseite Folie zurückgezogen, löst sich an einer Schmalfläche ab. Der Klebstoff verbleibt am Bauteil**.**
	**Bauteil 335; M 50:1** Bauteilquerschnitt, Blick auf Eckbereich: Bauteilschmalfläche und -unterseite Folie stark zurückgezogen, dadurch entsteht im Kantenbereich eine offene Fuge**.**

5.6 Ergebnisse

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass unter dem Mikroskop zahlreiche Schwachstellen und verborgene Fehler sichtbar werden, die bei den visuellen Prüfungen nach den Klimatest nicht erkannt werden konnten. Für eine künftige Bestimmung der Qualität der Verklebung hinsichtlich der Klimaprüfungen ist damit eine absolute Aussage in Frage gestellt. Ebenso ist der Folienabrisstest kurz nach der Herstellung der Verklebung, der von vielen Herstellern bei Materialwechsel durchgeführt wird, zumindest bei PO-Folien, fragwürdig. Bei einem guten Rissbild (MDF-Partikel auf Folienrückseite) kann möglicherweise auch nur die Rissfuge aufgezeigt werden, wie sie hier aufgetreten ist.

Auf die Frage, warum die Enthaftungserscheinungen der Folie nur an den Bauteiloberflächen nach den verschiedenen Klimatests auftraten, kann vorerst keine überzeugende Antwort gegeben werden. Vermutlich treten diese Spaltbildungserscheinungen durch die Klimabelastung erst in Erscheinung. Sie sind auch unabhängig von der Folienart, wie beim Bauteil 40 (Bild 7 in Tabelle 10) mit der beginnenden Rissbildung erkennbar. Detailliertere Untersuchungen während der Klimabelastungen und der damit verbundenen Ursachenforschung zu diesen Erscheinungen waren im Rahmen dieses Projektes nicht mehr realisierbar.

Es bleibt somit offen, wie die Verklebungsqualität bei 3D-beschichteten Bauteile bestmöglich geprüft werden kann.

An dieser Stelle sei noch einmal auf die in Bild 9 (Tabelle 10) erkennbare schlechte Haftung und die daraus resultierende unzureichende Verklebung des PUR2-Klebstoffes mit der PO-Folie bei den in der ALNO-Produktion hergestellten Bauteil hingewiesen. Diese Beobachtung bestätigt die bereits unter 4.3 getroffenen Aussagen bzgl. der Eignung des PUR2-Klebstoffes für die PO-Folienbeschichtung.

6 Bestimmung von Materialeigenschaften

6.1 Eingesetzte Materialien

6.1.1 Thermoplastische Folien

6.1.1.1 PVC

Das durch Polymerisation entstehende Polyvinylchlorid (PVC) gehört zu den amorphen Thermoplasten. Bei diesen amorphen Thermoplasten liegt weitgehend keine Ordnung der Makromoleküle vor. Dieser Zustand beeinflusst das Temperaturverhalten dieses Materials wesentlich. Das thermische Verhalten dieser amorphen Thermoplasten kann gemäß [10] wie folgt zusammengefasst werden. Bei tiefen Temperaturen im sogenannten Glaszustand, d. h. unterhalb der Glastemperatur (Tg), liegt das Material in einem spröden, glasartig harten Zustand vor. Es finden keine mikro- und makrobrownsche Bewegungen der Moleküle statt. Die Polymere verhalten sich nur geringfügig temperaturabhängig.
Der sich bei steigender Temperatur anschließende Glasübergangsbereich wird durch die beginnenden mikrobrownschen Bewegungen der Moleküle (Kettensegmente und Seitenketten des Moleküls) charakterisiert. Bei Temperaturen oberhalb der Glastemperatur werden die Molekülhauptketten beweglich und können Platzwechsel ausführen. Deutlich erkennbar sind diese Änderungen, die zu einem gummielastischen Zustand führen, durch den damit verbundenen starken Abfall des Moduls (entsprechend der Lastbeanspruchung z. B. als Schub- oder Biegemodul bezeichnet). Dieser Bereich wird auch als Haupterweichungsbereich bezeichnet. Die mittlere Temperatur dieses Glasübergangsbereiches wird als Glasübergangstemperatur bezeichnet und deshalb häufig als Materialkennwert angegeben. Sie kann mit verschiedenen Messmethoden bestimmt werden und weist deshalb bei Veröffentlichungen teilweise abweichende Werte auf. In [10] wird z.B. für reines PVC eine Tg von 81°C genannt.
Bei weiterem Temperaturanstieg lösen sich die physikalischen Vernetzungsstellen (Verhakungen und Verschlaufungen) und das Material geht in den Fließbereich über. Dabei bewegen sich die Molekülketten frei und gleiten aneinander ab. Das Polymer ist flüssig. Der Zersetzungsbereich wird durch fortschreitende Temperaturerhöhung erreicht, wobei die chemischen Bindungen der Makromoleküle zerstört werden.

6.1.1.2 Polyolefine

Polyolefine (PO) sind thermoplastische Materialien, die durch Additions- und Polymerisationsreaktionen entstehen. Olefine sind Alkene, d. h. ungesättigte Kohlenwasserstoffverbindungen, die Doppelbindungen im Molekül enthalten. Der Begriff „Olefine“ resultiert gemäß [18] aus der früheren Verwendung der Bezeichnung „ölbildendes Gas“ für das Alken: Äthen.
Zu den Polyolefinen gehören auch das Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP), die im Gegensatz zum PVC überwiegend eine teilkristalline Struktur aufweisen. Ein kristalliner Zustand wird gemäß [18] durch die regelmäßige Anordnung der Molekülabschnitte in den drei Raumrichtungen charakterisiert. Eine vollständige Kristallisation ist kaum möglich. Somit liegt ein

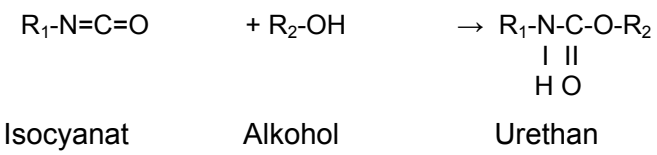
teilkristalliner Zustand vor, wobei der kristalline Anteil im wesentlichen die Eigenschaften des Materials bestimmt.
Das thermische Verhalten der teilkristallinen Polymere unterscheidet sich somit von dem der amorphen und kann nach [10] wie folgt zusammengefasst werden:
Unterhalb der Glasübergangstemperatur, d. h. im Glaszustand, liegt ebenfalls ein sprödes und glashartes Material vor. Der Glasübergangsbereich, der mit zunehmender Temperatur erreicht wird, ist nicht so ausgeprägt, wie bei den amorphen Materialien, da nur der geringe amorphe Anteil reagiert. Somit bleibt auch der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften infolge des Modulabfalls eher unbedeutend. Für PE wird in [10] entsprechend der Kristallinität und Dichte eine Tg von –31..-51 °C angegeben. Die Tg von PP wird durch deren Molekülkettenarten bestimmt und liegt bei ca. -10 °C.
Es schließt sich der weite Bereich des viskoelastischen Zustandes an. Die PO-Folie besitzt daher bei normalen Gebrauchstemperaturen eine relativ hohe Dehnbarkeit und Flexibilität, wobei die typischen visko-elastischen Eigenschaften stark durch die Höhe der Kristallinität beeinflusst werden. Bei weiterer Wärmezufuhr gehen die PO in den geschmolzenen Zustand über. Nach der Schmelze ist das kristalline Gefüge vollständig aufgehoben und die Moleküle sind leicht gegeneinander verschiebbar. Die PO sind in den hochviskosen Zustand übergegangen. Der Schmelzpunkt bzw. der Schmelzbereich sind für jedes Polyolefin charakteristisch. Die Schmelzbereiche bei PE sind, ähnlich der Glastemperatur, direkt von der Dichte des PE abhängig und stehen damit in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Kristallisationsgrad, Bei PE-niedriger Dichte (PE-ND) z.B. liegt ein hoher Verzweigungsgrad vor, der wiederum der Kristallinität entgegen wirkt und somit geringe Festigkeiten und niedrigeren Schmelzbereich bewirkt. Bei PP beeinflusst die Art der Makromolekülketten den Schmelzbereich und somit auch die Materialeigenschaften.

Mechanische Eigenschaften

Thermoplaste haben nur in einem kleinen Belastungsbereich eine Proportionalität zwischen Spannung und Verformung. Das Hookesche Gesetz ist in einem geringen Bereich gültig und der E-Modul kann dadurch nicht als konstante Materialgröße betrachtet werden.
Bei den Thermoplasten setzt sich die Verformung unter dem Einfluss einer äußeren Kraft im allgemeinen aus einem reversiblen und einen irreversiblen Anteil zusammen. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Verformung sind Temperatur, Höhe der Belastung und Beanspruchungsgeschwindigkeit. Für den Vergleich der verschiedenen Thermoplaste ist die zerstörungsfreie Prüfung bei Wechselbeanspruchung (Dynamisch-mechanische Analyse – DMA) und der damit dargestellte Kurvenverlauf von Modul und mechanischer Dämpfung (mechanischen Verlustfaktor) über einen großen Temperaturbereich charakteristisch. Die Art des dynamischen Moduls ist von der Prüfmethode abhängig (z.B. Schub- oder Biegemodul). Es werden bei den folgenden Untersuchungen jeweils 2 PVC- und PO- Folien untersucht, um für verschiedene Materialvarianten einen möglichen Streuungsbereich und dessen Einfluss auf Verarbeitungsparameter zu erkennen. Anlage 6 enthält eine Zusammenstellung der verwendeten Folien einschließlich der ermittelten Materialkennwerte. Die Untersuchungsergebnisse der eingesetzten Materialien werden in 6.3.2 dargestellt.

6.1.2 PUR-Dispersionsklebstoffe

Bei der 3D-Beschichtung mit thermoplastischen Folien werden in der Möbelindustrie Polyurethandispersionsklebstoffe (PUR-Klebstoff) verwendet.
Die Dispersion wird durch die Umsetzung der Isocyanate mit Hydroxylgruppen nach dem Prinzip der Urethanbildung hergestellt.

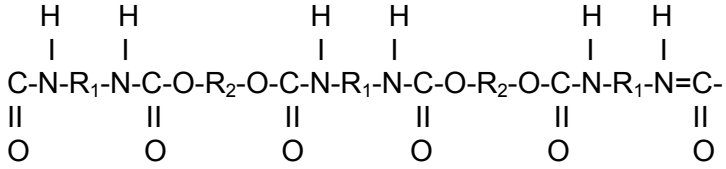


Damit ein Polymer entstehen kann, müssen mehrwertige Hydroxyverbindungen (mindestens 2 Hydroxylgruppen im Molekül) und als Reaktionspartner mehrwertige Isocyanate (mindestens 2

Isocyanate = Diisocyanat) eingesetzt werden. Bei bifunktionellen Basissystemen entstehen lineare (kettenförmige) Polyurethane.

$$O{=}C{=}N\text{-}R_1\text{-}N{=}C{=}O + HO\text{-}R_2\text{-}OH + O{=}C{=}N\text{-}R_1\text{-}N{=}C{=}O + HO\text{-}R_2\text{-}OH + O{=}C{=}N\text{-}R_1\text{-}N{=}C{=}O\ldots$$

Diisocyanat — Diol — Diisocyanat — Diol — Diisocyanat



Polyurethan (linear)

Kettenförmige Polyurethane sind als Klebstoff nicht geeignet. Um die an die Verklebung gestellten Anforderungen zu erfüllen, sind räumlich vernetzte Polyurethane notwendig. Diese erhält man, indem eine Komponente mindestens drei funktionelle Gruppen aufweist. Diese Vernetzung wird durch die Zugabe von Vernetzer (= 2.Komponente = Isocyanate) erreicht. Die räumliche Strukturbildung ermöglicht eine hohe Endfestigkeit bei gesteigertem Wärmestand und bessere Beständigkeit gegenüber Wasser, Weichmachern u.a..
Die zusätzlich stattfindende Nebenreaktion der NCO-Gruppen des Polyisocyanates mit den OH- Gruppen des Wassers ist gemäß [3] als nicht bevorzugt von Seiten der NCO-Gruppen zu betrachten.

Im Verarbeitungsprozess erfolgt die Filmbildung, indem nach dem Aufsprühen des Reaktionsgemisches das Dispersionsmittel Wasser verdunstet. Dabei rücken die Polyisocyanattröpfchen und die Polyurethanmoleküle enger zusammen und bei Berührung der Teilchen erfolgt eine Diffusion ineinander. Der entstandene homogene, geschlossene Klebfilm wird beim Beschichtungsprozess durch die Wärmeübertragung der erhitzen Folie bei Temperaturen von ca. 70 °C aktiviert (Thermoaktivierprinzip). Dabei schmelzen die kristallinen Polyestersegmente des Polyurethans auf und die Benetzung der Folie und der MDF wird möglich. Parallel dazu verläuft seit der Mischung der 2 Komponenten die chemische Reaktion des Isocaynates des Vernetzers mit den noch vorhandenen OH-Gruppen der Polyurethandispersion (lineares Polyurethan) über einen längeren Zeitraum ab. Sie ist mit der räumlichen Vernetzung des Klebstoffes abgeschlossen und dauert ungefähr 7 Tage. Eine schematische Übersicht des Festigkeitsverlaufs während des Verarbeitungsprozesses ist in Bild 29 dargestellt

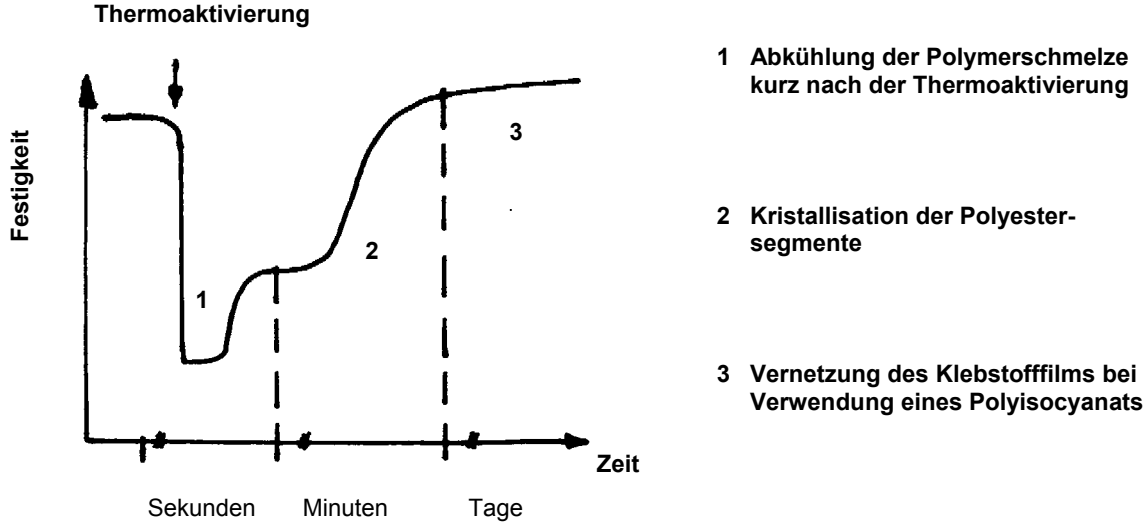


Bild 29: Festigkeitsaufbau bei Thermoaktivierung von PUR- Klebstoffen [11]

Beim anschließenden Freischneiden der beschichteten Bauteile aus dem Folienverbund ist der Klebstoff noch als ein „wachsendes“ Klebstoffpolymer vorhanden. Die Belastungen des Klebstoffes beim Freischneiden, die durch die Rückstellkräfte beim Abkühlen der Folie entstehen, müssen durch die Kohäsionskräfte des Klebstoffes aufgenommen werden. Diese bilden sich mit der Rekristallisierung der Polyestersegmente (Unterschreitung der Rekristallisierungstemperatur von ca. 48 °C) wieder aus.

Materialeigenschaften der beiden verwendeten Klebstoffen aus Klebstoffdatenblättern und eigenen Untersuchungen sind in Anlage 7 zusammengestellt.

6.1.3 Primer (Haftvermittler)

Eine gute Benetzung der Folie durch den Klebstoff gilt als Grundvoraussetzung für eine sichere Haftung des Klebstoffes an der Folie (Adhäsion). Dieser Zustand wird erreicht, wenn sich die Oberflächenspannungen der Folienrückseite und des Klebstoffes annähern. Damit ist eine Art Kräftegleichgewicht hergestellt. Der Klebstoff kann sich auf der Folienrückseite verteilen (spreiten) und eine Benetzung erfolgt.

Bei PVC liegt diese Oberflächenenergie (auch Oberflächenspannung) bei 40 mN/m. Mit dieser Oberflächenenergie von > 35 mN/m gehören sie damit zu den polaren Kunststoffen und sind mit den meisten Klebstoffen verklebbar.

Die Oberflächenspannung der PO- Materialien (u.a. PE,PP) ist < 35 mW/m. Damit zählen sie zu den unpolaren Kunststoffen. Sie gelten als schwer verklebbar, da die geringe Oberflächenspannung für das Benetzungsmittel (Klebstoff) schwer einstellbar ist. Dadurch erfolgt eine schlechte Benetzung dieser Folienmaterialien. Aus diesem Grund werden aufwändige zusätzliche Vorbehandlungen, wie z.B. Coronisieren, Beflammen, Plasmaverfahren an den Folien durchgeführt, um eine Verbesserung der Oberflächenhaftung des Klebstoffe zu erreichen. Es werden Haftungsstellen „erzeugt“. Die Wirkung dieser Behandlungsmethoden nimmt mit zunehmender Zeit zwischen Vorbehandlung und Klebstoffauftrag ab. Um eine hohe Liegezeit der Folien bis zur weiteren Verarbeitung zu gewährleisten und damit eine verbesserte Verklebbarkeit der Folie zu sichern, erfolgt unmittelbar nach der Vorbehandlung der Primerauftrag. Der Primer nutzt somit die verbesserte Oberflächenhaftung und bildet einen haltbaren und gut verklebbaren Untergrund für die eigentliche Verklebung des künftigen Materialverbundes. Er dient somit als Haftvermittler. Bei dem aufgetragenen Primer handelt es sich um eine verdünnte Lösung des Klebstoffgrundstoffes, speziell bei der 3D-Möbelfolienherstellung auf PUR-Basis. Er wurde bei den verwendeten Folien im Tiefdruckverfahren aufgebracht.
Die PO-Folien werden mit der doppelten Primermenge im Vergleich zu PVC bedruckt. Aus Sicherheitsgründen ist es üblich, auch die PVC-Folien mit einem einfachen Primerauftrag zu beschichten.

Zur Zusammensetzung des Primers lagen bei der Projektbearbeitung keine Informationen vor.

6.1.4 MDF

Es wurden ausschließlich MDF-Bauteile der Fa. Hornitex verwendet, die über den Verarbeiter, die Fa. ALNO, zur Verfügung gestellt wurden.
Von der Firma ALNO wurden folgende Kriterien für MDF-Platten festgelegt und von deren Wareneingangsprüfung zugelassen.

Faseranteil:	Buche/ Eiche < 10 %
Rohdichte:	mind. 680 kg/m³ (nach DIN EN 323)
Biegefestigkeit:	mind. 28 N/mm² (nach DIN EN 310)
Querzugfestigkeit:	mind. 0,6 N/mm² (nach DIN EN 319)
Dickenquellung nach 2h:	max. 2,5 % (nach DIN EN 317)

einseitige Rückseitenbeschichtung mit Melaminharz
Verpressung erfolgte mit chloridfreiem Bindemitteln

Die MDF-Rohteile werden von der Fa. ALNO in eigener Bearbeitung hergestellt. Von den im ihd verwendeten Bauteilen wurden der Rauhheitswert R_Z mittel Perthometer S3P für die ge-

fräste Schmalfläche und die pressplanke Bauteiloberfläche ermittelt und in Tabelle 11 zusammengestellt.

Messgerät: Perthometer S3P mit Messtaste FRW 750 und 10 µm Tastspitzenradius

Messstrecke: je 3 Messbahnen längs und quer über eine Länge von 56 mm
Grenzwellenlänge: 2,5 mm

Tabelle 11: Gemittelte Rauhtiefen des eingesetzten MDF-Materials

	Pressplanke Bauteiloberfläche		gefräste Bauteilschmalfläche (längs)
	längs	quer	
Mittelwert [µm]	41,70	36,20	84,43
Standardabweichung [µm]	5,10	1,20	8,07
Variationskoeffizient [%]	12,33	3,31	9,55

Um keine weiteren Einflussgrößen auf den Verklebungsprozess berücksichtigen zu müssen, wurde bei allen durchgeführten Untersuchungen das gleiche Material verwendet.

6.2 Thermische Beanspruchung der Materialien im Verarbeitungsprozess

Um die Temperaturbeeinflussung der Materialien während des Beschichtungsprozesses festzustellen, wurden mit folgendem Messaufbau (siehe Bild 30) mittels 5 Temperaturfühler (Thermoelementedraht NiCr) in der Presse die Temperaturen bei der PVC- und bei der PO-Beschichtung erfasst. Mit der Raumtemperatur wurden gleichzeitig 6 Temperaturverläufe aufgenommen.

In Bild 31 sind die Temperaturverläufe für die PVC- Beschichtung und in Bild 32 für die PO-Beschichtung mit den entsprechenden Verarbeitungsparametern wiedergegeben.

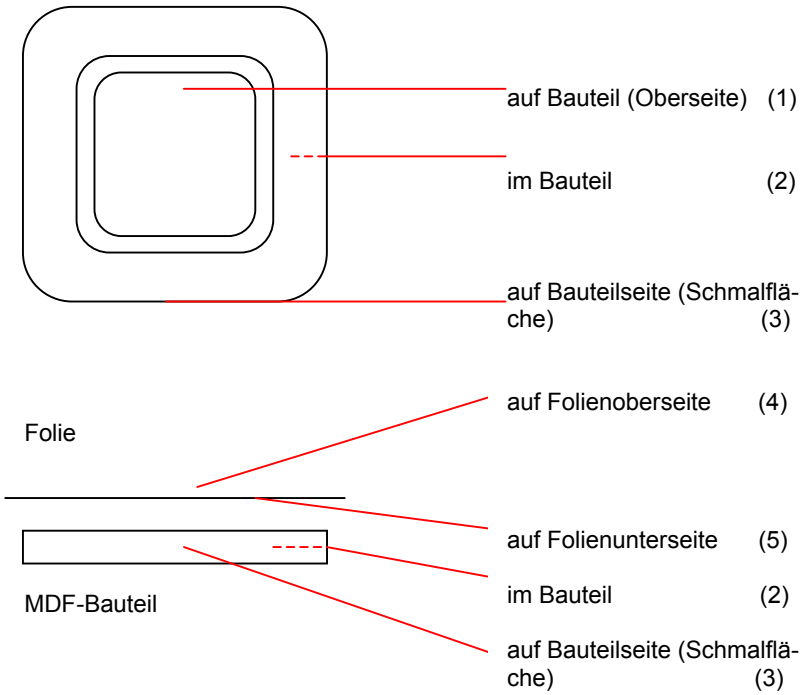


Bild 30: Versuchsaufbau für die Temperaturmessung in der Laborpresse

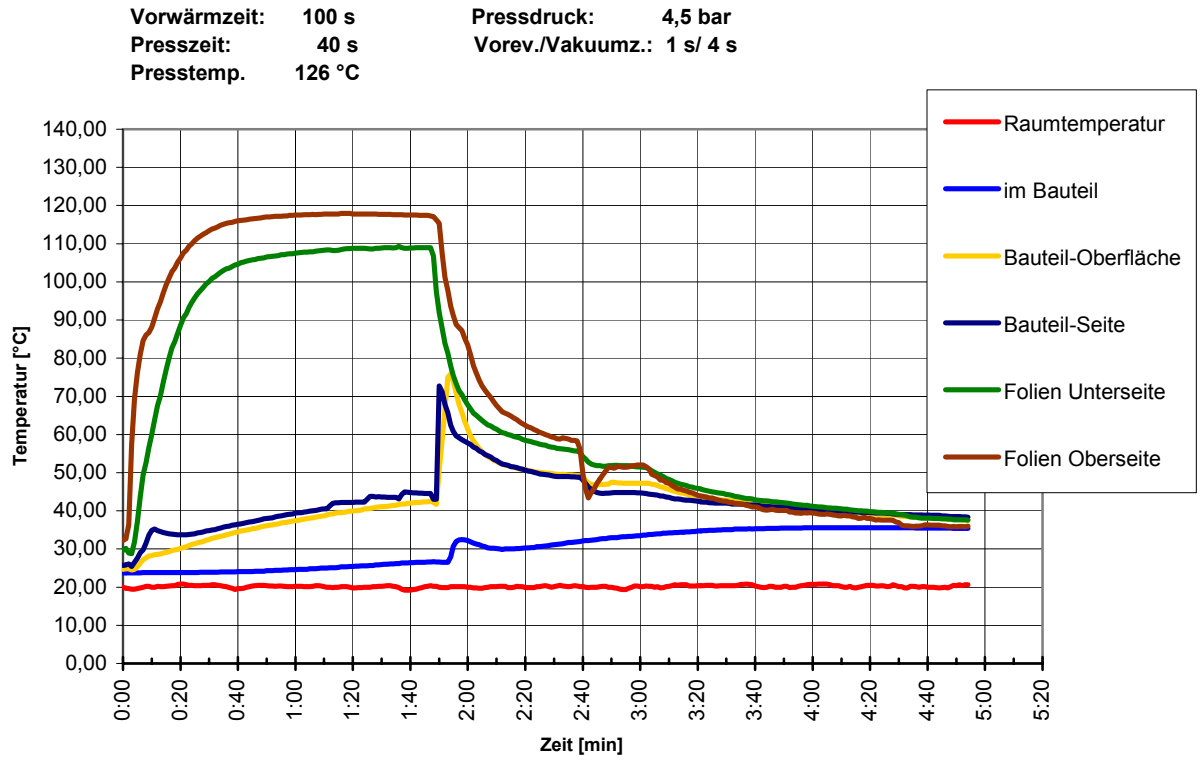


Bild 31: Temperaturverläufe beim Beschichten mit PVC- Folie in 3D- Laborpresse

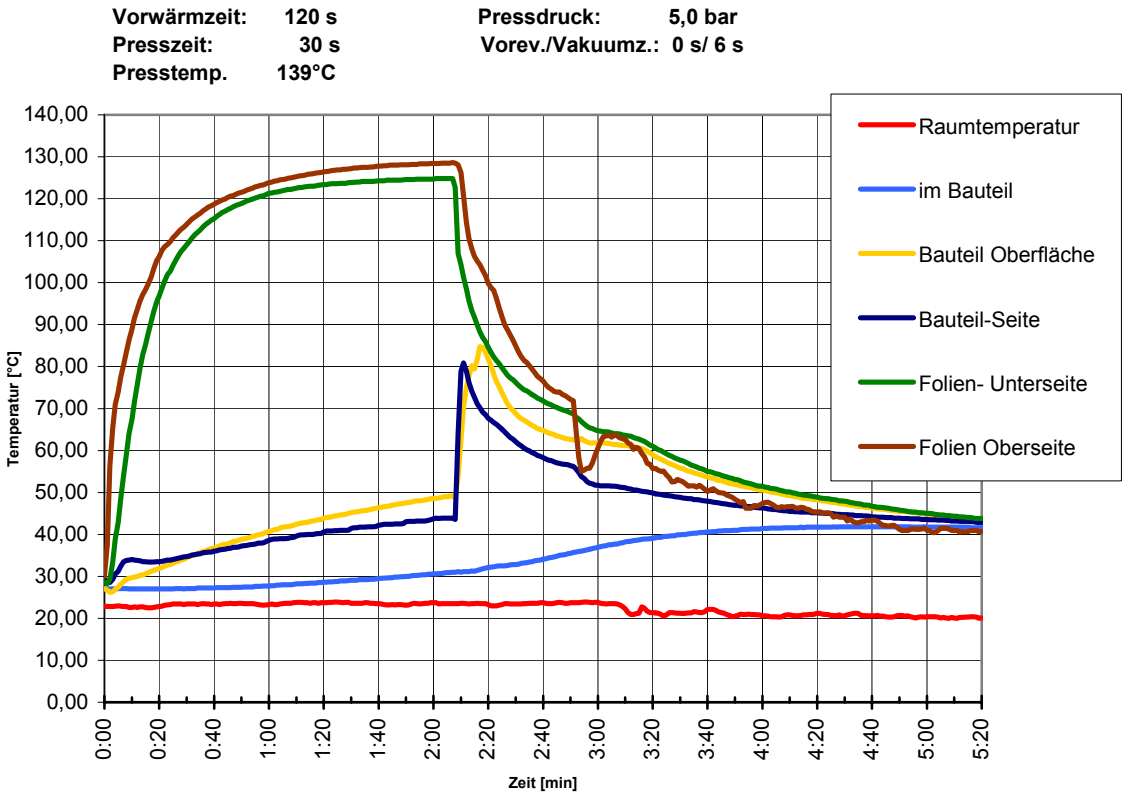


Bild 32: Temperaturverläufe beim Beschichten mit PO- Folie in 3D- Laborpresse

Um eine Vergleichbarkeit der Beschichtungsbedingungen zu ermöglichen, wurden die Temperaturkurven der beiden Beschichtungsabläufe im einem Diagramm (Bild 33) ab dem Moment des 1. Kontaktes der Folie mit dem Bauteil (= beleimte Fläche) dargestellt. Es werden damit

die unterschiedlichen Verklebungsbedingungen für den Materialverbund hinsichtlich der Abkühlung der Materialien in Abhängigkeit von der Folienart deutlich.

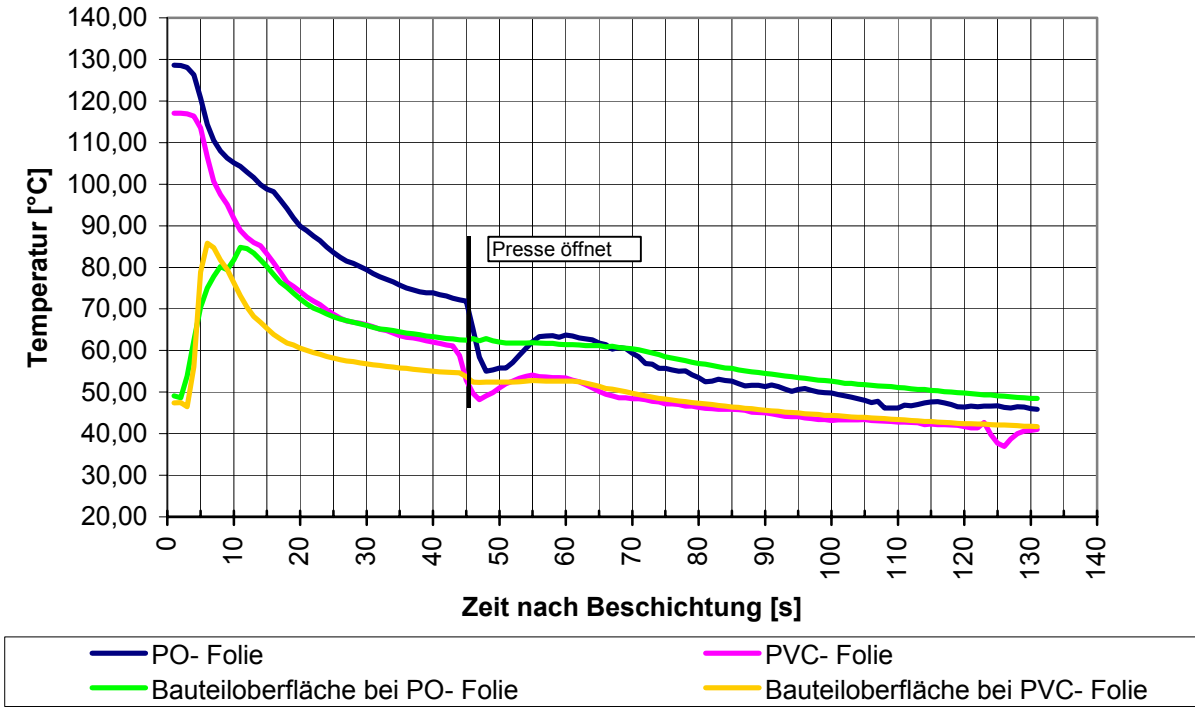


Bild 33: Abkühlverhalten bei PO- und PVC- Beschichtung

Von der Pressenöffnung bis zur Abkühlung auf Raumtemperatur ist bei der Beschichtung mit PVC-Folie ein geringeres Temperaturgefälle für die Folie und den Klebstoff zu überwinden. Damit verringert sich die Zeit für einen möglichen Folienrückzug. Der Klebstoff verringert schneller seine Temperatur und kann die Folie schneller „festhalten“. Er erreicht damit auch zu einem früheren Zeitpunkt als bei der PO-Beschichtung eine höhere Anfangshaftung, was sich wiederum günstiger auf die nachfolgende Belastung des Verbundes auswirkt. Es wird bei dieser Darstellung deutlich, dass das für die Anfangshaftung notwendige Temperaturniveau von ca. 50 °C bei der PVC-Beschichtung unmittelbar nach der Pressenöffnung und somit bis zum Bauteilfreischnitt erreicht wird. Bei der PO-Beschichtung ist die gleiche Voraussetzung für den Klebstoff erst bis zu 60 s später gegeben. Damit wird deutlich, dass sich ein zu rascher Bauteilausschnitt nach der PO-Beschichtung ungünstiger auf die Verklebungsqualität auswirkt.

6.3 Thermische Analysen

Gemäß DIN 51005 [13] ist die Thermische Analyse (TA) der Oberbegriff für Methoden, bei denen physikalische und chemische Eigenschaften einer Substanz, eines Substanzgemisches und /oder von Reaktionsgemischen als Funktion der Temperatur oder der Zeit bestimmt werden, wobei die Probe einem kontrollierten Temperaturprogramm unterworfen wird.
Bei der TA wird der Temperatureinfluss genutzt, um die Änderung chemischer und physikalischer Eigenschaften, sowie Massenänderungen der Materialprobe zu bestimmen.

Die TA ist geeignet für:

- Vergleiche ähnlicher Produkte (Qualitätskontrolle)
- Qualitative und quantitative Analyse von Materialien (Fehleranalyse)
- Bestimmung physikalisch-chemischer Kenngrößen von Stoffen
- Simulierung technischer und thermischer Prozesse zur Optimierung von technologischen Abläufen

Es gibt lt. DIN 51005 [13] folgende Methoden der TA:

1.Thermogravimetrie (TG)
2. Differenzthermoanalyse (DTA)
3. Dynamische Differenz-Kalorimetrie (DDK, engl. DSC)
4. Dynamisch-mechanische Analyse (DMA)
5. Thermisch Mechanische Analyse (TMA)

Es wurden bei den folgenden Untersuchungen die Methoden 3 –5 genutzt, wobei die DMA und TMA Messungen im Institut für Polymerforschung Dresden durchgeführt wurden.

6.3.1 Messprinzipien

6.3.1.1 DSC

Die international DSC (Differential Scanning Calorimetry) genannte Methode wird auch als DDK (Dynamische Differenz Kalorimetrie) bezeichnet.
Die Grundlage dieses Messverfahrens besteht in der Bestimmung des Unterschiedes der Wärmeströme zwischen dem Probentiegel und einem Referenztiegel gemäß des Wärmestrom-Prinzips. Beide werden dabei einem definierten Temperaturprogramm ausgesetzt, welches vor Messbeginn festgelegt wird. Die Wärmestromdifferenzmessung ist möglich, weil der Referenztiegel (leerer Tiegel) keine thermischen Effekte zeigt, so dass die ermittelten Wärmestrommengen dem Temperaturverhalten der Probe zugeordnet werden können.

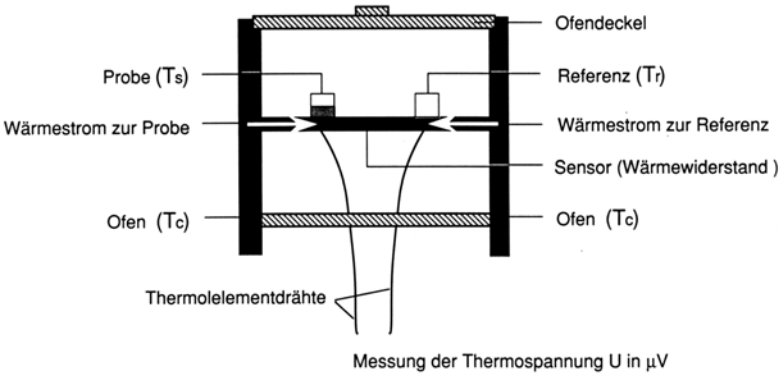


Bild 34: Schematische Darstellung einer DSC- Messzelle [15]

Die Empfindlichkeit und Genauigkeit der Methode erlaubt schon bei sehr kleinen Probenmengen zuverlässige und reproduzierbare Aussagen über das Verhalten von Werkstoffen bei Vorgängen, die mit thermischen Effekten verbunden sind. Es lassen sich u.a. spezifische Wärme, Glasumwandlung , Erweichungs-, Schmelz- und Kristallisationsverhalten und chemische Reaktionen bestimmen. Der Wärmestrom entspricht einer übertragenen Leistung und wird in W oder mW gemessen.

Liegt eine endotherme Reaktion vor, nimmt die Probe Energie auf. Eine exotherme Reaktion findet bei der Abgabe von Energie durch die Probe an die Umgebung statt. Beide Reaktionsarten sind in DSC- Kurven erkennbar.

Es wurde ein Mettler Toledo DSC 821e Messmodul mit den entsprechenden Auswertegeräten (Bild 35) verwendet.

Technische Daten

- Temperaturbereich:-150 ... 700 °C (± 0,2 °C)
- Heizrate: 0 ... 100 °C/min
  (kleinstes Inkrement 0,01 °C/min)
- Messbereich:± 350 mW (100 °C)
  ± 250 mW (300 °C)
  ± 200 mW (700 °C)
- Auflösung: < 0,7 µW
  Abtastrate: max. 10 Messwerte pro Sekunde

Bild 35: DSC- Messplatz im ihd

6.3.1.2 DMA

Bei der dynamisch-mechanischen Analyse (DMA) werden die viskoelastischen Eigenschaften (Elastizität und Dämpfungsverhalten) einer Probe unter periodischer Krafteinwirkung gemessen, während die Probe einem Temperaturprogramm unterworfen werden kann.

Wie in [17] beschrieben, wird bei der DMA eine sinusförmige mechanische Belastung (z.B. Zug-, Biege-, Scherbelastung) auf die Probe ausgeübt und somit eine sinusförmige Verformung hervorgerufen. Für eine vollkommen elastische Probe befindet sich die Verformungswelle genau in Phase zur Spannungswelle, während für eine vollkommen viskose Probe die Phasenverschiebung zwischen den beiden Sinuswellen genau 90° beträgt. (s. Bild 36)

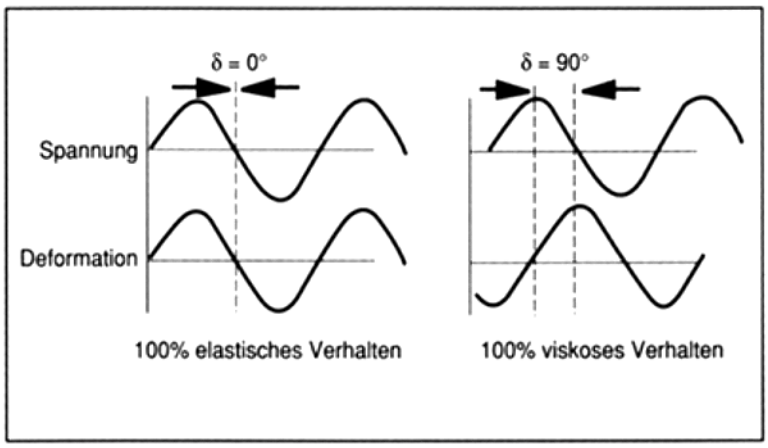


Bild 36: Darstellung von viskosem und elastischem Verhalten [17]

Die meisten Stoffe sind jedoch viskoelastisch, d.h. die Phasenverschiebung wird zwischen den beiden in Bild 36 dargestellten Extremen liegen.
Das Verhalten einer viskoelastischen Probe in einem dynamischen Experiment kann somit gemäß [21] als additive Überlagerung von elastischem und viskosem Verhalten betrachtet werden.
Aus den Amplituden beider Sinuskurven lässt sich der Phasenverschiebungswinkel bestimmen. Dieser Wert ermöglicht es, Materialkennwerte, wie Speicher- und Verlustmodul sowie Verlustwinkel zu ermitteln (s. Bild 37).

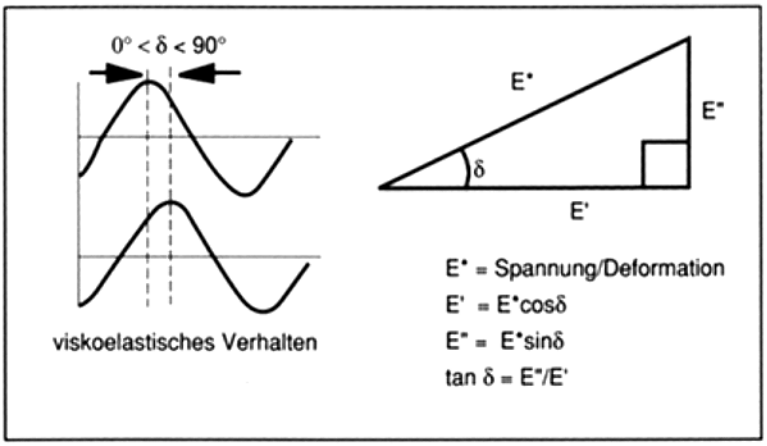


Bild 37: Darstellung des viskoelastischen Verhaltens [17]

Der elastische Anteil der zugeführten Energie wird in der Probe gespeichert und als Speichermodul E' (engl.: Tensile storage modulus) bezeichnet.
Der irreversibel in Wärme umgewandelte Energieanteil wird von dem plastischen Anteil einer Probe bestimmt. Dieser Verlustanteil wird daher als auch als Verlustmodul E'' (engl.: tensile loss modolus) genannt. Das Verhältnis von Verlustmodul zur gespeicherten Energie wird durch den Verlustfaktor δ angegeben.

$$tan\ \delta = \frac{E''}{E'}$$

Der Tangens dieses Verlustwinkels wird auch als Dämpfungsmaß bezeichnet. Mit steigendem tan δ –Wert verändert sich das Material vom elastischen, federnden Zustand zum plastischen und flüssigkeitsähnlichen Verhalten.
Der Speichermodul ist laut [21] der anschaulichere Wert. Er beschreibt die Elastizität des Materials. Ein hoher E´- Wert zeigt, dass sich die Probe nur schwach deformiert, d. h. es liegt eine geringe Dehnbarkeit und eine hohe Steifigkeit vor. Ein niedriger Speichermodul zeigt eine hohe Dehnbarkeit und Flexibilität an. Der Nachteil dieser DMA Messungen im visko- elastischen Bereich liegt darin, dass bei großen Deformationen nur recht pauschale Auswertungen des Verhaltens möglich sind.

Für die DMA- Untersuchungen wurde der Dynamisch- Mechanische Analysator DMA 2980 von TA Instruments verwendet

Technische Daten:

- Temperaturbereich: -145 bis 600 °C
- Thermische Stabilität:
  ± 0,1 °C über 50 °C
  ± 1 °C unter 50 °C
- Belastung: 0,001 bis 18 N
- dyn. Deformation:
  ± 0,5 bis 10.000 µm
- Auflösung: 1 nm

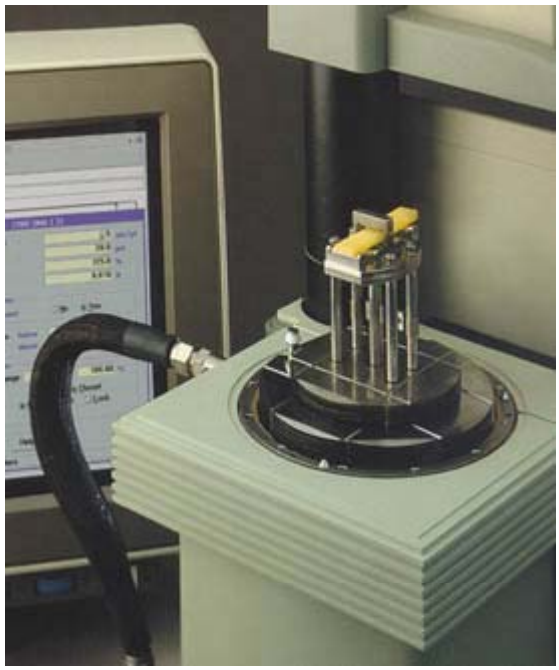


Bild 38: Dynamisch- Mechanische Analysator DMA 2980 [17]

Für die durchgeführten Materialuntersuchungen wurden folgende Messarten angewendet:

1. Biegeversuch nach Single Cantilever

Der Probekörper wird an einem Ende eingespannt und gemäß [17] wirkt die Biegekraft auf das Ende der Probe (einseitige Beanspruchung). Das wird als Biegeversuch mit freiem Kräfteverlauf bei einseitiger Beanspruchung bezeichnet. Diese Messart eignet sich besonders gut zur Bestimmung von Kennwerten von Thermoplasten.
Es sind entsprechend der verwendeten Einspannvorrichtung folgende Probenabmessungen notwendig:
Länge: 4; 10 oder 17,5 mm
Breite: maximal 15 mm
Dicke: maximal 5 mm

Bild 39: Probeneinspannung für Biegeversuch mit freiem Kräfteverlauf [17]

2. Zugversuch

Bei dieser Messart wird die Probe zwischen einer stationären und einer beweglichen Klemme eingespannt und mit einer geringen statischen Kraft vorgespannt. Die Vorspannung ist für eine straffe Halterung der Probe notwendig. Es wird die Dimensionsänderung bzgl. der Temperaturänderung erfasst.

Bild 40: Probeneinspannung für Zugversuch [17]

6.3.1.3 TMA

Die Thermisch- Mechanische Analyse (TMA) beschreibt gemäß DIN 51005 [13] das Ausdehnungs- und Schrumpfverhalten von Materialien. Dabei werden die Dimensionsänderungen (Länge, Dicke) der Probe als Funktion der Temperatur oder Zeit gemessen. Die Probe kann dabei einer zusätzlichen mechanischen Belastung unterworfen werden. Sie ermöglicht, wie auch die DMA-Untersuchungen, Aussagen zum mechanischen Materialverhalten.

Der Messablauf kann nach [15] wie folgt charakterisiert werden. Die zu untersuchende Probe befindet sich innerhalb eines Ofens auf einer Auflage aus Quarz und auf der Probe liegt ein Messfühler aus Quarz. Dieses Material wird aufgrund seines konstanten und gegen Null gehenden thermischen Ausdehnungswiderstandes verwendet. Die Deformation der Probe wird über den Messfühler an einen Differentialtransformator (LVDT - linear- variabler Differential-Transformator) außerhalb des Ofens gegeben, der die Information in ein proportionales elektrisches Signal umwandelt. Bei diesem Messprinzip wird der temperaturabhängige Wärmeausdehnungskoeffizient der Kunststoffe ausgenutzt.

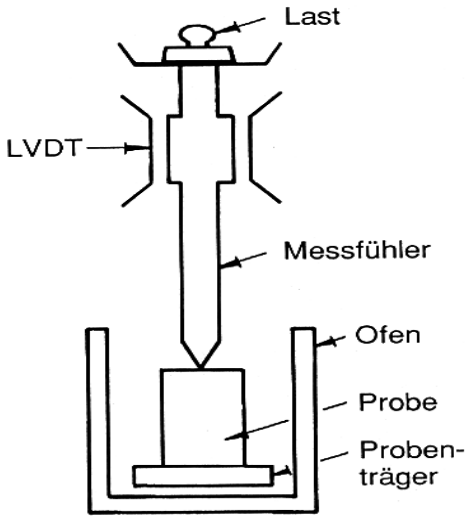


Bild 41: Schematische Darstellung eines TMA- Gerätes [15]

Es wurden folgende Messprinzipien genutzt:

1. Penetrationsmessung

Bei dieser Messart wird senkrecht auf das Material eine Kugelsonde aufgesetzt, die dann mit sehr geringer Fläche aufliegt. Bei statischer Messung wird die Sonde mit konstanter Kraft belastet und ihr Eindringen in das erwärmte Material registriert. Es kann somit die Deformation der Probe unter konstanter Last bei einem bestimmten Temperaturprogramm ermittelt werden. Es sind aufgrund der ermittelten Eindringtiefen Aussagen über die Erweichungsbereiche möglich.
Diese Messungen wurden mit dem unter 6.3.1.2 genannten Messgerät durchgeführt.

2. Bestimmung des Ausdehnungs- und Schrumpfverhalten

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde die Zugdehnungs-Messeinrichtung für Folien genutzt. Dabei wurde das Ausdehnungs- bzw. Schrumpfungsverhalten in Längs- und Querrichtung bei einem vorgegebenen Temperaturregime bestimmt.

Als Messgerät wurde eine Mettler Messzelle TMA 40 mit folgenden technischen Daten [16] verwendet:

Temperaturbereich:	-100.....+1000 ° C
Heiz- /Kühlgeschwindigkeit:	0...100 ° C/ min
Kühlmittel:	Luft, flüssiger Stickstoff
Probengröße:	Höhe max. 20 mm
	Durchmesser max. 10 mm
Auflagekraft des Messfühlers:	0...0,5 N in Stufen von 0,0025 N
Längenmessung:	in 3 Bereichen automatisch umschaltend
	(± 0,2 mm; ± 1 mm und ± 5 mm
mit maximalen Auflösungen:	4,5 nm; 22,5 nm und 112,5 nm

6.3.2 Ergebnisse der thermischen Analysen der Folien

6.3.2.1 DSC

Durchführung:
Um das thermischen Verhalten der Folien zu ermitteln, wurde mit den folgenden Einstellungen (Tabelle 12) eine DSC- Analyse durchgeführt.

Tabelle 12: Einstellungen bei der DSC- Analyse

	PVC	**PO**
Einstellungen		
Temperaturverlauf	10 °C → 120 °C (2 min) → 10 °C	10 °C → 220 °C (2 min) → 10 °C
Heizrate	20 K/min	10 K/min
Kühlrate	20 K/min	10 K/min
Programm	1. Aufheizen	
	1. Abkühlen	
	2. Aufheizen	
	2. Abkühlen	

Die End- und Anfangswerte der Messungen wurden an die zu erwartenden Glasübergangs- bzw. Schmelztemperaturen angepasst. Für die Darstellung des Glasübergangs der PVC-Folien wird eine Heizrate von 20 K/min empfohlen. Die höhere Heizrate verstärkt Effekte (erhöhte Empfindlichkeit) und ist damit für den Glasübergang geeignet. Die geringere Heizraten der PO-Folien sind für die Darstellung der Schmelzvorganges günstiger, da die Peaktrennung besser erreicht wird (verbesserte Auflösung).
Es wurden immer 2 Läufe (je eine Aufheizphase und eine Abkühlphase) durchgeführt, da sich Effekte, z. B. Relaxationsvorgang und Glasübergang bei PVC-Folie, überlagern können und so Messwerte schwer bestimmbar sind.

Bei den folgenden Auswertungen wurde eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse durch eine Normierung auf die eingewogene Menge erreicht.

Auswertung

PVC-Folien

Die DSC-Analyse dieser Folien lässt die Messkurve eines amorphen Polymers (Anlage 8 und Anlage 9) erkennen. Im Glasübergangsbereich nimmt die spezifische Wärme so zu, dass eine Stufe im Wärmestromverlauf deutlich sichtbar wird. Dieser Bereich erstreckt sich meist über 10 – 30 K. Bei den untersuchten Folien liegt dieser Bereich bei 50 – 80 °C.

Im 1. Aufheizen der Proben sind noch Reaktionen der Folie enthalten, die aus ihrer thermischen Vorgeschichte (Tempern im Herstellungsprozess) resultieren und als Relaxationspeak den Glasübergangsbereich überlagern. Um den Glasübergang deutlicher darstellen und auswerten zu können, wird ein zweiter Aufheizvorgang durchgeführt. Dabei wurden die Glasübergangstemperaturen Tg = 66 °C von PVC1 und Tg = 65 °C von PVC2 ermittelt. Da die Glasübergangstemperatur von weichmacherfreiem PVC bei 80°C liegt, ist die niedrigere Tg auf den Anteil Weichmacher in der Folie zurückzuführen.

PO-Folien

Diese Folien gehören aufgrund ihrer Hauptsubstanzen (Polyethylen und Polypropylen) zu den teilkristallinen Polymeren. Charakteristisch ist bei der DSC-Analyse der Schmelzbereich, bei dem die kristallinen Polymere ihre Kristallinität beim Erhitzen verlieren.
Bei der durchgeführten DSC-Analyse der PO-Folien im Bereich von 10 °C – 220 °C (Anlage 10) wurde der Glasübergangsbereich nicht miterfasst. Der Glasübergang der PO- Folien wurde beim Biegeversuch der DMA-Analyse (siehe 6.3.2.2) bestimmt. Die Messkurve zeigt deutlich, dass es sich bei beiden Folien um ein Copolymer (Polymere chemisch verknüpft) oder ein Polymergemisch (Polymere existieren nebeneinander) aus Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) handelt. Erkennbar ist das an den beiden Schmelzpeaks.
Der vordere Schmelzpeak bei den niedrigeren Temperaturen (ca.125°C) ist dem PE- Anteil zuzuordnen. PP schmilzt in reiner Form bei 165 °C. In diesem Fall wurde Ethylen als Comonomer, d.h. als Seitenkette zwischen die PP-Hauptketten eingebaut. Nach [18] bleibt die Polypropylenkristallinität bis zu einem Zusatz von etwa 20 % Ethylen erhalten. Mit steigendem

Anteil an PE-Einlagerungen wird die Kristallinität verringert. Damit ist ein Absinken der Schmelztemperatur des PP auf ca. 145 °C erklärbar.

Weiterhin ist erkennbar, dass sich kleine Unterschiede im Schmelzbereich der beiden Folien abzeichnen. Da PE, wie bereits festgestellt, bei tieferen Temperaturen schmilzt als PP, kann man gemäß [15] die Peakflächen benutzen, um den Anteil von PE in der Mischung zu bestimmen. Als Abgrenzung für die Aufteilung der Flächen wird der Wendepeak zwischen den beiden Materialpeaks (Minima) benutzt. Die äußeren Grenzen wurden einheitlich mit 25 °C und 160 °C festgelegt. Die Integration über die Peakflächen (einzeln und gesamt) wurden ermittelt und die prozentualen Anteile der Materialkomponenten errechnet. In Anlage 11 ist erkennbar, dass das Verhältnis PE-Gehalt/ PP-Gehalt bei den beiden untersuchten Folien geringfügig differiert.

Um eine mögliche Ursache für die bei der Verarbeitung von PO- Folien auftretenden Qualitätsschwankungen zu erkennen, wurde die vom Folienhersteller genannte Mindestverarbeitungstemperatur von T=125 °C als Vergleichstemperatur fixiert und der bis zu dieser Temperatur geschmolzene Folienanteil bei beiden PO-Folien ermittelt (s. Anlage 12). Die für den technologischen Prozess hinsichtlich des Temperaturverhaltens bedeutsamen Werte, die aus der DSC-Analyse der beiden PO-Folien ermittelt wurden, sind in Tabelle 13 zusammengefasst und für den ausgewiesenen Temperaturbereich bestimmt worden.

Tabelle 13: Ergebniswerte der DSC- Analyse der eingesetzten PO-Folien

	PO1		**PO2**	
	PE-Anteil	PP-Anteil	PE-Anteil	PP-Anteil
Einwaagemenge [mg]	12,0		12,3	
Gesamtmessbereich (Anlage 10**)**				
Temperaturbereich [°C]	24,95 – 160,02		24,94 – 160,00	
Gesamtwärmemengenaufnahme [mJ]*	741,20		793,23	
normierte Wärmemengenaufnahme [J/g]*	61,77		64,49	
PE/ PP Anteilbestimmung (Anlage 11**)**				
Wendepunkt für Anteilsgrenzen [°C]	132,43		131,82	
Temperaturbereich [°C]	24,95 – 132,43	132,43- 160,02	24,94 – 131,82	131,82 – 160,00
Schmelzpeaktemperatur [°C]	125,91	143,53	125,4	142,68
Anteilige Wärmeaufnahme [mJ]*	485,47	255,73	529,67	263,56
normierte Wärmeaufnahme [J/g]*	40,46	21,31	43,06	21,43
Anteil [%]	65,5	34,5	66,8	33,2
Anteilbestimmung bis 125 °C (Anlage 12**)**				
Anteilige Wärmeaufnahme bis 125 °C [mJ]*	386,14		439,11	
normierte Wärmeaufnahme [J/g]*	32,18		35,70	
Aufgeschmolzener Anteil bei 125 °C Folientemperatur [%]	52,1		55,4	

* Wärmeaufnahme wird im Gegensatz zum DSC-Messprotokoll in den Anlagen als positiver Wert angegeben.

Es sind unterschiedliche Mischungsverhältnisse von PE- zu PP- Anteil bei beiden PO-Folien ermittelt worden. Dieser Unterschied kann als Ursache für das abweichende thermische Verhalten der Folien angenommen werden. Das Mischungsverhältnis beeinflusst bei konstanter Verarbeitungstemperatur den Anteil der Folie, der in einem guten Verarbeitungszustand bei

dieser Temperatur vorliegt. Die Verarbeitungstemperatur der Folie wurde mit 125 °C angenommen und der geschmolzene Anteil bestimmt. Es wird deutlich, dass bei der PO2-Folie der PE-Anteil größer ist, als bei der PO1. Wir wissen nicht, wie genau bei der PO- Folienherstellung das Verhältnis PE/PP einstellbar ist. Zu vermuten ist, dass immer Schwankungen, wie hier bei 2 Folien dargestellt, auftreten werden. Infolge des kleinen Verarbeitungsfensters dieser Folien sind diese Schwankungen im Verarbeitungsregime zu berücksichtigen, um eine gleichmäßige Beschichtungsqualität zu gewährleisten. Wenn bei der eingestellten Temperatur die Aufschmelzmenge und damit die Plastizität der Folie insgesamt zu gering ist, kann eine Überdehnung der Folie in den Eckbereichen auftreten, die sich durch Streifen markiert.
Um eine gleichmäßigere Verarbeitung der PO- Folien zu erreichen, ist eine Erweiterung des Verarbeitungsfenster möglicherweise nur realisierbar, wenn der schmelzbare Anteil der Folien unterhalb der Verarbeitungstemperatur vergrößert wird. Bei auftretenden Materialschwankungen bzgl. der einzelnen Herstellungschargen bestehen dann keine Qualitätsunterschiede bei der Beschichtung. Dabei muss jedoch gewährleistet sein, dass die Qualität des beschichteten Bauteils hinsichtlich verschiedener Gebrauchseigenschaften (z. B. Kratzfestigkeit), die durch den nicht aufschmelzenden PP-Anteil bestimmt werden, weiterhin garantiert wird. Gleichzeitig muss beachtet werden, dass bei einem zu hohen geschmolzenen Anteil bei der Verarbeitung ein „Wegfließen“ der Folie erfolgen kann. Insofern ist ein größerer Schmelzbereich der kristallinen Anteile günstiger, da bei Schwankungen der Verarbeitungstemperatur eine gewünschte Elastizität erreicht, aber ein Wegfließen vermieden wird.

6.3.2.2 DMA

1. Biegeversuch

Die Folien wurden mit Probenstreifen in Herstellrichtung im Biegeversuch gemäß der unter 6.3.1.2 dargestellten Verfahrensweise untersucht.
Gewählte Geräteeinstellungen:

Heizrate:	3 K/min
Temperaturbereich:	-80 °C bis 120 °C
Belastungsfrequenz:	10 Hz

Es wurden die Glastemperaturen der Materialien bestimmt. Dabei wurde das Maximum der 1. Ableitung des Speichermoduls E’ = der Verlustmodul E“ als Messpunkt genutzt. Die erreichten Messkurven sind in Bild 42 dargestellt.

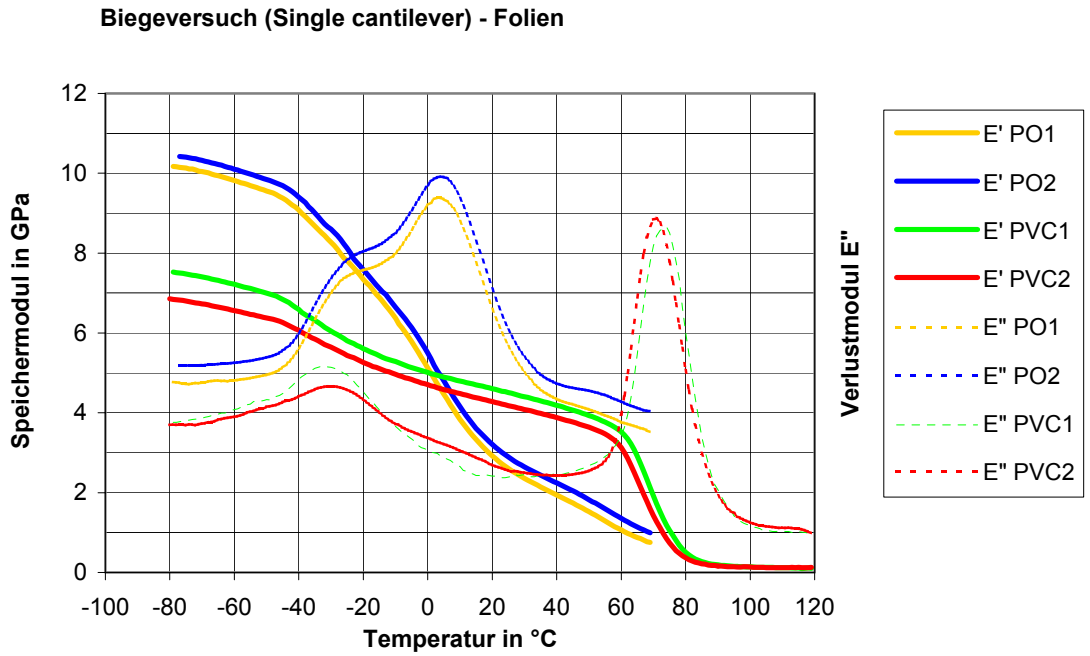


Bild 42: Speicher- und Verlustmodulbestimmung der Folien im DMA-Biegeversuch

Bei allen Folien ist der Glasübergang deutlich aus dem Abfall des Speichermoduls erkennbar. Für die Glastemperaturbestimmung wurden die E“-Maxima ausgewertet.
Bei den PVC-Folien ist bereits bei einer Temperatur von ca. –30 °C eine sekundäre Relaxation erkennbar. Bei diesem Folienmaterial liegt der für die Verarbeitung bedeutende Glasübergang bei 70 °C. Die teilkristallinen PO-Folien haben ihren Glasübergang (amorphe Anteile) bei ca. 5 °C. Ein so starkes Absinken des Moduls, in einem engen Temperaturbereich, wie bei PVC, ist bei PO nicht erkennbar. Die kristallinen Anteile bei PO behindern in diesem Bereich die weitere Beweglichkeit der Moleküle und haben somit nur einen geringen Modulabfall zur Folge.

2. Zugversuch
Es wurden gemäß 6.3.1.2 die Dimensionsänderungen quer (senkrecht) und längs (parallel) zur Herstellrichtung (HR) gemessen (s. Bild 43). Für die Folie PO1 (längs zur Herstellrichtung) war auf Grund fehlender Messwerteübertragung keine Parameterdarstellung möglich. Da keine grundsätzlich neuen Erkenntnisse bezüglich des Erweichungsverhalten ableitbar waren, die über das im folgenden Kapitel 6.3.2.3 TMA beschriebene hinausgehen, wird auf die Interpretation an dieser Stelle verzichtet.

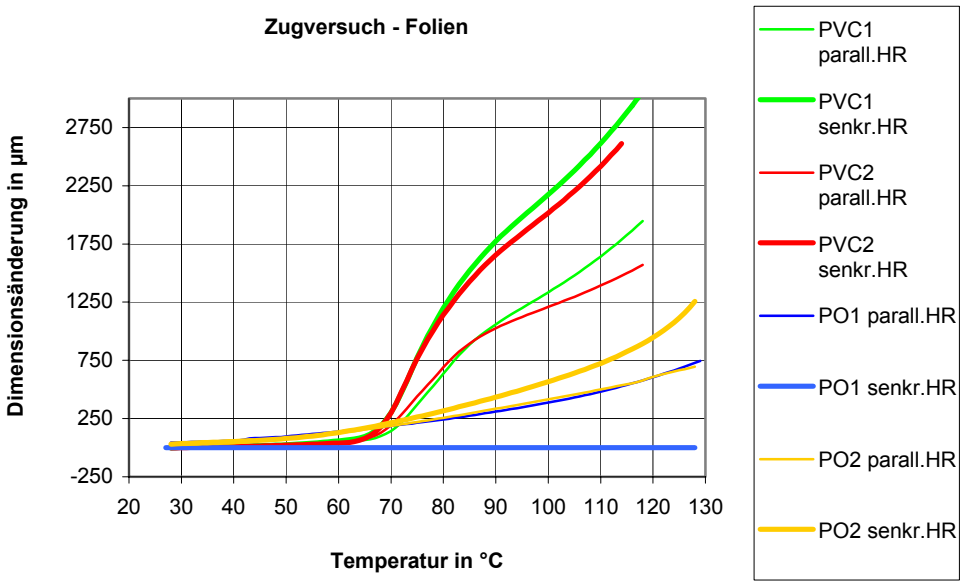


Bild 43: Messergebnis der DMA- Zugversuche der Folien

6.3.2.3 TMA

1. Penetrationsversuch

Die Versuchsdurchführung erfolgte wie unter 6.3.1.2 beschrieben. Dabei wird die Eindringtiefenänderung der Kugelsonde bei steigender Temperatur bezogen auf die Ausgangsmaterialstärke bei Raumtemperatur erfasst.
Es wurden folgende Geräteeinstellungen verwendet:

Heizrate:	3 K/min
Temperaturbereich:	Raumtemperatur (26 °C/ 28 °C bis 150 °C/ 180 °C

Es wurden sowohl die Folienoberseiten (OS) als auch die Rückseiten (RS) der Materialien PVC1, PVC2, PO1 und PO2 im Penetrationsversuch untersucht. Die sich daraus ergebenden Ergebnisse sind in Bild 44 dargestellt.

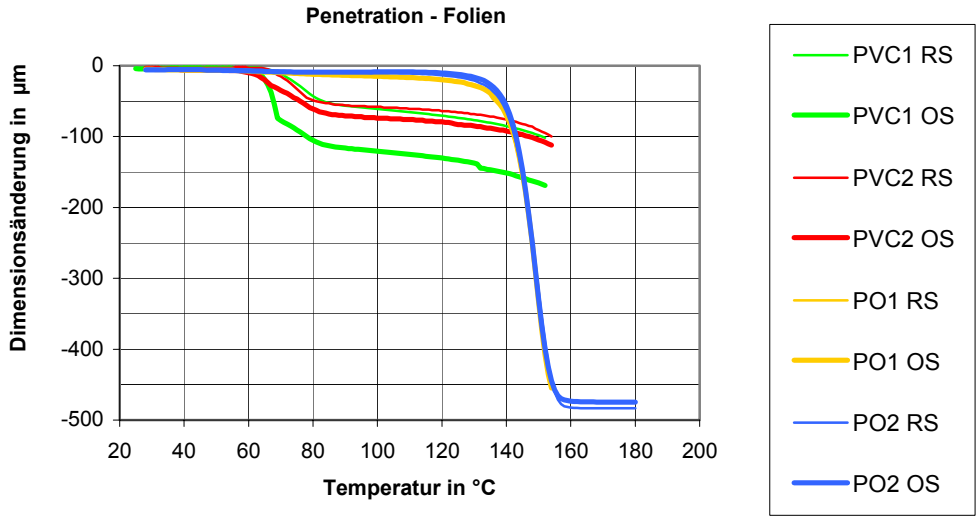


Bild 44: Messergebnis der Penetrationsversuche der Folien

Die PVC Folien heben sich in ihrem Erweichungsverhalten deutlich von den PO-Folien ab. Ursache ist der unter 6.1.1 beschriebene strukturelle Aufbau der Materialien und damit das unterschiedliche thermische Verhalten.
Dabei kann festgestellt werden, dass bei PVC-Folien zwischen 65 °C und 80 °C nahezu sprunghafte Dimensionsänderungen auftreten. Ab ca. 80 °C nehmen diese dann nur noch in geringerem Maße zu. Die Haupterweichung des Materials ist abgeschlossen. Da PVC-Folien bei Temperaturen von ca. 100...110 °C verarbeitet werden, wirken sich Materialschwankungen auf ihre Verarbeitbarkeit nur wenig aus.
Die bei dieser Untersuchung festgestellte Verschiebung der Erweichung von Ober und Rückseite zu höheren Temperaturen ist möglicherweise auf den Schichtenaufbau der PVC-Folie bzw. die Primerbeschichtung auf der Folienrückseite zurückzuführen, aber aus den o.g. Gründen nicht für den Verarbeitungsprozess bedeutsam.

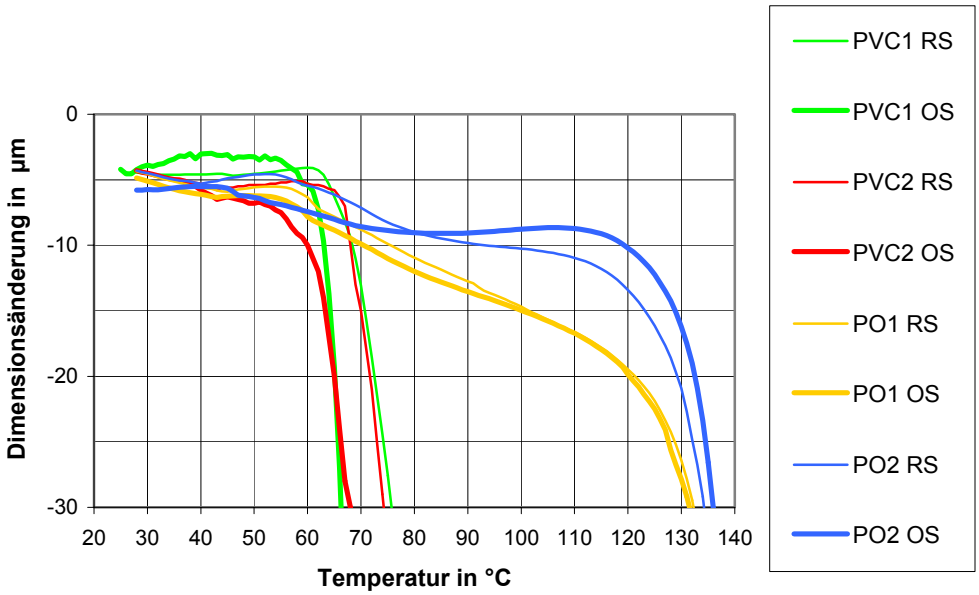


Bild 45: Vergrößerung des Bereiches 0 – 30 µm

Besonders deutlich wird bei den Darstellungen (Bild 44 und Bild 45) das oft zitierte „enge Verarbeitungsfenster“ der PO-Folien. Es ist erkennbar, dass eine Erweichung erst ab ca. 120 °C wirksam wird. Ursache sind die bereits genannten Materialeigenschaften. Aus der Vergrößerung des Erweichungsgebietes kann abgeleitet werden, dass in diesem Bereich Differenzen

zwischen den beiden PO-Folien existieren, die ungünstigerweise im Bereich der Verarbeitungstemperatur von ca. 125 °C liegen. Bei Materialschwankungen der Folienchargen und bei gleichem Verarbeitungsregime für alle eingesetzten PO-Folien sind somit Fehler, die ungenügende Erweichung der Folie als Ursache haben (z. B. Streifen im Bauteileckbereich infolge Überdehnung) vorhersehbar.

2. Ausdehnungs- und Schrumpfungsverhalten

Zur Ermittlung des Ausdehnungs- und Schrumpfungsverhalten dem die Folien, bedingt durch die Temperaturbeanspruchung im Verarbeitungsprozess, unterliegen, wurden TMA-Analysen, wie unter 6.3.1.3 beschrieben mit der METTLER Messzelle TMA40 durchgeführt.
Mit Probenlängen von 10 mm wurden die Folien sowohl in Längs- (= Herstellrichtung) als auch in Querrichtung (= senkrecht zur Herstellrichtung) mit den Heiz- und Kühlraten von 5 K/min sowie 20 K/Min untersucht. Die 100 % Dimension entspricht der Probengröße bei Raumtemperatur (26 °C/ 28 °C). Das Gesamttemperaturprogramm wurde der Verarbeitungstemperaturbelastung angepasst. Die maximale Temperatur bei der Messung entspricht der maximalen Folientemperatur im Verarbeitungsprozess . Die PVC-Folien wurden bis 115 °C und die PO-Folien auf 125 °C erwärmt.

In Anlage 13 und Anlage 14 ist dargestellt, wie sich die verwendeten Folien sowohl in Längs- als auch Querrichtung bei dem verarbeitungsanalogen Temperaturregime in der Prüfeinrichtung verhalten.
Bei Erwärmung der PVC-Folie erfolgt in Querrichtung ein Ausdehnungs- und in Längsrichtung ein Schrumpfungsprozess. Bei der PO-Folie sind Ausdehnungen in beiden Richtungen erkennbar, die größer sind als bei PVC- Folie.

Für den Verklebungsprozess ist das Verhalten bei der Abkühlung von besonderer Bedeutung. Die Änderungen, die beim Abkühlungsprozess auftreten, sind für die Folien in Anlage 15 und Anlage 16 detaillierter dargestellt. Es wurden die Geradengleichungen für das Abkühlverhalten einschließlich Bestimmtheitsmaß mittels linearer Regression ermittelt. Bei allen Folien kann in dem betrachteten Temperaturbereich die Dimensionsänderung als linear angenommen werden, da die dazugehörigen Bestimmtheitsmaße über 97 % liegen.

Das Rückzugsverhaltens der Folien bei den verschiedenen Kühlraten und der Orientierung bzgl. der Herstellrichtung ist in Bild 46 dargestellt. Es zeigt, dass bei einer schnellerer Abkühlung der Folien die Dimensionsänderungen sowohl in Längs- als auch in Querrichtung geringer ausfallen.

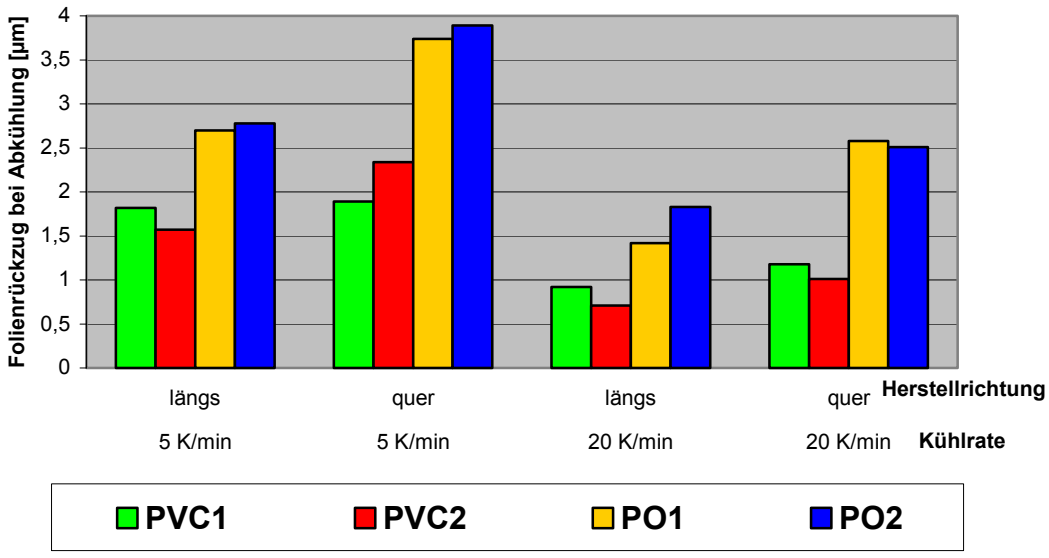


Bild 46: Rückzugsverhalten der Folien bei Abkühlung

Bei den PO-Folien wird deutlich, dass die stärkere Belastung des Klebstoffes durch das stärkere Rückzugsverhalten im interessierenden Temperaturbereich stärker belastet wird. In Tabelle 14 sind einige charakteristische Werte für die Folien zusammengestellt.

In Bild 46 und auch aus den Werten in Tabelle 14 ist erkennbar, dass die Rückzugsdimensionen quer zur Herstellrichtung der Folie größer als längs ist. Das ist bei beiden PO-Folienarten und Kühlraten deutlich sichtbar.
Zu dem größeren Rückzugsverhalten der PO-Folien im Vergleich zu den PVC-Folien kommt für den Verarbeitungsprozess erschwerend hinzu, dass durch die höheren Verarbeitungstemperaturen der PO-Folie nach der Beschichtung ein größerer Temperaturgradient als bei den PVC-Folien bis zur Abkühlung (oder: zur Unterschreitung der für die Verklebung bedeutsame Rekristallisierungstemperatur des Klebstoffs (ca. 48 °C)) überwunden werden muss. Damit erhöht sich zusätzlich der Gesamtrückzug der PO-Folie, der vom Beschichten bis zum Abkühlen entsteht.

Eine Senkung der Rückzugskräfte der PO-Folie wäre durch eine rasche Folienkühlung zu erreichen. Das hätte für die Verklebung zusätzlich zu dem geringeren Rückzug der Folie noch der Vorteil, dass ein schnelleres Abbinden des Klebstoffes erfolgt, da die niedrigere Temperatur der Folie an den Klebstoff weitergegeben wird.

Tabelle 14: Ergebniswerte der TMA der Folien bei Abkühlung (115 °C/ 125 °C – RT)

	Heiz- / Kühlrate	Prüfrichtung	Dimensionsänderung		Bestimmtheitsmaß
			[%/ K]	[µm/K]	[%]
PVC 1	5 K/min	längs	0,0182	1,82	98,0
		quer	0,0189	1,89	98,8
	20 K/min	längs	0,0092	0,92	99,4
		quer	0,0118	1,18	99,1
PVC 2	5 K/min	längs	0,0157	1,57	99,5
		quer	0,0234	2,34	98,5
	20 K/min	längs	0,0071	0,71	98,7
		quer	0,0101	1,01	99,3
PO1	5 K/min	längs	0,0270	2,70	98,4
		quer	0,0374	3,74	99,1
	20 K/min	längs	0,0142	1,42	99,1
		quer	0,0258	2,58	99,5
PO2	5 K/min	längs	0,0278	2,78	99,2
		quer	0,0389	3,89	97,4
	20 K/min	längs	0,0183	1,83	99,1
		quer	0,0251	2,51	99,1

6.3.3 Ergebnisse der thermischen Analysen der Klebstoffe

6.3.3.1 DSC

Für die DSC-Analyse der Klebstoffe wurden die Klebstoffe gemäß ihrer Rezeptur mit 5 % Härter gemischt und zum Abdunsten auf eine Glasplatte aufgetragen. Der infolge der Wasserabdunstung nach 1 h entstehende gummiartige Klebstoff wurde untersucht. Dabei wurde folgender Temperaturzyklus eingestellt:

Erwärmung:	10 °C – 120 °C
Temperatur:	120 °C; 1 min konstant
Abkühlung:	120 °C – 23 °C
Erwärmung:	23 °C – 100 °C

Die DSC-Messkurven für den Bereich der Klebstofferwärmung (Anlage 17) zeigen, dass beide Klebstoffe im Bereich von ca. 30 °C bis 50 °C aufschmelzen. Es ist auch erkennbar, dass der PUR2 in einem etwas engerem Temperaturbereich aufschmilzt und dafür eine geringere Energiemenge benötigt. Weitere Reaktionen bezüglich des Klebstoffverhaltens bei Abkühlung, z.B. Rekristallisierung der Estersegmente gemäß 6.1.2, sind nicht erkennbar (s. Anlage 18). Eine erneute Wärmeaufnahme beim 2. Erwärmungsvorgang wird auch nicht deutlich, so dass eine „Schwäche“ bzgl. erhöhter Temperatureinflüsse (Wärmestand) bei diesen Klebstoffen mit diesem Verfahren nicht nachweisbar war.

6.3.3.2 DMA

Bei der DMA- Analyse wurde wegen des niedrig viskosen Verhaltens des Klebstoffs ein Glasfasergewebe als Trägermaterial verwendet. Es wurde folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Tränken der Glasfaserstreifen mit den Klebstoffen
- Abdunstung/ Trocknung (RT)
- Biegeversuch mit 3 Temperaturprogrammen:

  RT... 60 °C...-60 °C (10 min)...RT
  RT... 70 °C...-60 °C (10 min)...RT
  RT... 80 °C...-60 °C (10 min)...RT

Ergebnisse:

Die durchgeführten DMA-Biegeversuche wurden für die o.g. Proben durchgeführt und die jeweiligen Messkurven aufgenommen. Es wurde der Glasübergangsbereich der Klebstoffe mit

PUR2:	- 45 °... - 48 °C und - 1 °... – 6 °C (2-stufig)
Helmitin:	- 49 °... - 53 °C

bestimmt.

Weitere Aussagen bzgl. des Verhaltens der Klebstoffe, vor allem beim Abkühlprozess, können nicht abgeleitet werden. Es ist kein Vergleich von absoluten Messwerten möglich. Da die nicht normierbaren applizierten Klebstoffmengen auch im zeitlichen Temperaturverhalten verschieden auf das vorgegebenen Temperaturprogramm reagieren, bringt auch ein tendenzieller Vergleich der Messkurven keine ergebnisrelevanten Aussagen. Somit muss festgestellt werden, dass diese Untersuchungen für diese Klebstoffart und die damit angestrebten Ergebnissen nicht geeignet waren.

6.4 Weitere Untersuchungen

6.4.1 ABES – Zugscherversuch

6.4.1.1 Messprinzip

Um zusätzliche Hinweise zum Festigkeitsverhalten der Klebverbindung der verwendeten Materialien zu erhalten, wurden Zugscherfestigkeitsmessungen mit dem Automatischen Festigkeitsauswertesystem (Automated Bonding Evalution System – ABES) durchgeführt. Das ABES ist für die Charakterisierung des Aushärtungsverhaltens von Klebstoffen von Humphrey und Zavala entwickelt worden [5]. Es dient der Prüfung der Klebfestigkeit flächig verleimter Furnierstreifen in Abhängigkeit von Presszeit und –temperatur im Zug- Schermodus.

Der Aufbau der Messeinrichtung ist in Bild 47 und Bild 48 dargestellt. Die beiden zu verklebenden Furnierstreifen werden mit hydraulisch arbeitenden Klemmbacken am äußeren Ende fixiert. Neben dieser, sich bei Einspannung der Streifen ergebenden Überlappungsfläche, sind beidseitig Pressstempel angeordnet. Diese können mit einem einstellbaren Druck von 0,2 MPa oder 0,7 MPa auf die Verklebung einwirken. Gleichzeitig ist es möglich, die Temperatur dieser Stempel von Raumtemperatur bis 200 °C einzustellen. Diese Einstellung ist wahlweise auch für nur einen Pressstempel möglich.

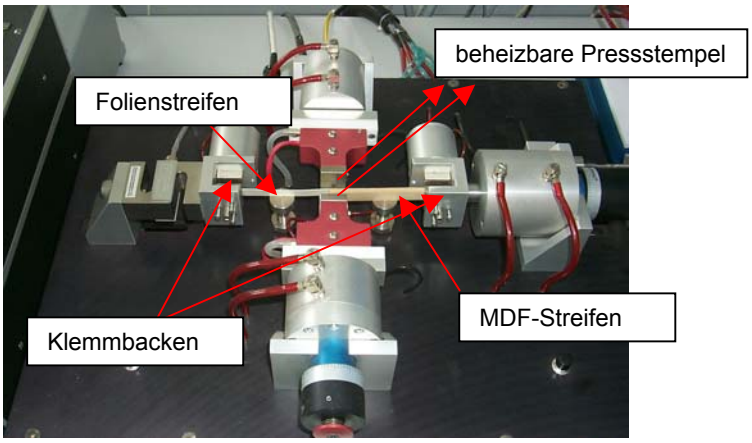


Bild 47: ABES- Messeinrichtung mit offenen Pressstempeln

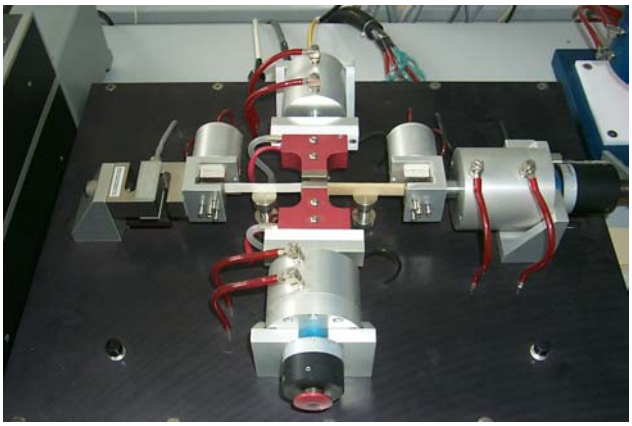


Bild 48: ABES- Messeinrichtung mit geschlossenen Pressstempeln

Zu Beginn der Messung werden die gewünschten Parameter: Pressdruck, Presszeit, Presstemperatur eingestellt. Die Einstellung einer bestimmten Klebfugentemperatur ist insofern möglich, indem eine Kalibrierung der Pressstempeltemperatur mit den verwendeten unbeleimten Materialien (wegen des Wärmeübergangskoeffizienten) durchgeführt wird. Mit einem Thermodraht, der an der vorgesehenen Verklebungsstelle zwischen den Probenmaterialien eingeklemmt wird, kann in Abhängigkeit von den Pressstempeltemperaturen und der Zeit eine Vergleichskurve ermittelt werden. Damit ist es möglich, bei den Verklebungsprüfungen und den eingestellten Pressstempeltemperaturen, die gewünschte Klebfugentemperatur zu erreichen. Die Messung beginnt mit dem hydraulischen Schließen der vorgeheizten Stempel und der gleichzeitigen Druckbeaufschlagung gemäß Einstellung. Nach Ablauf der gewählten Presszeit löst sich der Druckstempel und die beiden Materialstreifen werden mit einer Zeitverzögerung von ≈ 2 s unter Zugscherbeanspruchung auseinandergezogen. Die maximale Kraft, die für die Trennung des Klebverbundes notwendig ist, wird gemessen und kann mit Angabe der Klebfläche als Festigkeitswert ausgewiesen werden.

6.4.1.2 Durchführung

Für die diese Messungen wurden folgende Prüfkörper verwendet:

Folienstreifen:	PVC:	117 x 13 x 0,4 mm
	PO:	117 x 13 x 0,5 mm
MDF- Streifen (gefräste Bauteilseite):		117 x 13 x 5,0 mm
Klebstoff:		Helmitin, PUR 2
beleimte Fläche (Überlappungsfläche):		6 x 13 mm (78 mm²)

Um die Temperatur in der Klebfuge der Prüfkörper analog der Klebfugentemperatur beim 3D-Beschichtungsprozess zu erreichen, wurde mit Hilfe einer Eichung die notwendige Einstellung der Pressstempeltemperaturen bestimmt.

Die Verklebungen der Proben erfolgte gemäß dem unter 6.4.1.1 beschriebenen Prinzip mit folgenden Parametern:

Pressstempeltemperatur:	65, 70, 75 °C
Klebfugentemperatur:	60; 65; 70 °C
Pressdruck:	2 bar
Presszeit:	40; 50; 60 s (davon war bei 10; 20 bzw. 30 s die Klebfugentemperatur gewährleistet.)

6.4.1.3 Ergebnisse

Die gemessenen Maximalkräfte (siehe Anlage 19) lagen bei den Verklebungen mit PO-Folie bei etwa 2/3 der Maximalkräfte der PVC-Verbindungen. Gleichzeitig wurde unabhängig von den Probenmaterialien bei allen Messungen festgestellt, dass sich mit steigender Klebfugentemperatur die Maximaltrennkraft verringert. Ursache für diesen Effekt ist die kurze Zeit (2 s) zwischen dem Beenden der Verklebung und der Zugscherbelastung. Die nach dieser Zeit in der Klebfuge vorliegende Temperatur ist umso höher, je höher die Presstemperatur war. Die Zeit für Abkühlung ist zu gering, deshalb kommt es zu den in Anlage 19 dargestellten Messergebnissen. Rückschlüsse auf die Anfangshaftungen können nicht gezogen werden. Bei einer 2. Messreihe mit einer Abkühlzeit von 40 s erhöhten sich bei allen Verbindungen die gemessenen Maximalkräfte. Die Tendenz der abfallenden Festigkeit mit steigender Temperatur wurde hier jedoch gleichermaßen festgestellt. Eine Klebfugentemperaturmessung zeigte, dass nur bei einer eingestellten Fugentemperatur von 60 °C, nach der Abkühlzeit von 40 s eine Temperatur von < 50 °C erreicht wurde.

Damit wird deutlich, dass die Abkühlphase nach der Verklebung von Thermoplastfolien mit dem MDF-Werkstoff genügend lang sein muss, um den unter 6.1.2 genannten Kohäsionskräften in der Klebstoffschicht die Möglichkeit zugeben, eine ausreichend große Kraft aufbauen zu können.

6.4.2 Untersuchungen der Folienrückseite bezüglich Primereigenschaften

6.4.2.1 Benetzungsverhalten der Folien vor und nach Verarbeitung

Das Benetzungsverhalten der geprimerten Folien wurde mittels Randwinkelmessung festgestellt. Der Kontaktwinkel wurde mit einem Kontaktwinkelmessgerät OCA der Fa. dataphysics gemessen. Der Kontaktwinkel ist der physikalische Messwert, der das Benetzungsverhalten quantifiziert. Er beschreibt das Benetzen eines Festkörpers mit einer Flüssigkeit. Als messbare Größe wurde der Kontaktwinkel mit Wasser als Maß für das hydrophile (wasserliebende) bzw. hydrophobe (wasserabweisende) Verhalten verwendet. Die Messungen erfolgten bei Raumtemperatur. Es konnten folgende Wasserkontaktwinkel in Form des Randwinkel festgestellt werden: (10 Messungen an jeder Tropfenseite)

<u>1. unbearbeitete Folie:</u>

Material	Randwinkel (Mittelwert)
PVC 1:	122,8
PVC 2:	114,0
PO 1:	118,2
PO 2:	114,9

Die Standardabweichungen lagen bei 1-4%

2. Folie nach Bearbeitungsprozess

An gedehnten und dem Temperaturregime der Beschichtung ausgesetzten Folienproben wurden auch Randwinkelmessungen durchgeführt. Auf Grund der durch die Verformung entstehenden Unebenheiten unterlagen die Messwerte starken Schwankungen, da eine Planlage der Proben im Messgerät schwer realisierbar war. Es kann aber insgesamt festgestellt werden, dass die Randwinkel kleiner waren, als bei dem unbearbeiteten Ausgangsmaterial. Dadurch wird sichtbar, dass keine Verschlechterung der Folienrückseite bzgl. ihres Benetzungsverhaltens eintrat.

Die Benetzung der Folienrückseiten erfolgt im Prozess mit Klebstoff, während bedeutend höherer Folientemperaturen (PVC: ca. 110 °C, PO: ca. 125 °C) und bei gedehntem Zustand der Folien. Welches Benetzungsverhalten dabei auftritt bzw. welche Oberflächenspannungen die Folie als auch der Klebstoff bei diesen Bedingungen aufweisen, konnte nicht ermittelt werden.

6.4.2.2 Mikroskopische Untersuchungen der Folien vor und nach der Verarbeitung

Mit einem Auflicht-Fluoreszenz-Mikroskop der Fa. Nikon (Eclipse-E-800) wurden die Folienrückseiten, als auch die Folienquerschnitte untersucht. (PO2, PVC2). Es konnten die in Tabelle 15 dargestellten Werte ermittelt werden:

Tabelle 15: Mikroskopischen Bestimmung der Primerschichtdicken

	PVC 2	PO 2
Unverarbeitetes Ausgangsmaterial (Vergleichsproben)	Foliendicke: 400 µm Primerschichtdicke: 0 - 3 – 6 µm nicht gleichmäßig, in Rasterform	Foliendicke: 500 µm Primerschichtdicke: 0 - 5 - 9 µm nicht gleichmäßig, in Rasterform
Verpresste Folien; oberer Randbereich:	Foliendicke: 290 µm Primerschichtdicke: 0 – 3 – 6 µm	Foliendicke: 300 µm Primerschichtdicke: 0 - 7 µm
Verpresste Folien; Rundungsbereich:	Foliendicke: 210 µm Primerschichtdicke: 0 – 1 – 2 µm	Foliendicke: 200 µm Primerschichtdicke:0 – 2,5 - 5 µm

Aus diesen Werten ist erkennbar, dass sich mit der Dehnung der Folie im Herstellungsprozess auch der Primer dehnt und seine Dicke, analog der Gesamtfoliendicke, verringert. Es konnte kein Abriss der Primerbeschichtung in den stark gedehnten Folienabschnitten nachgewiesen werden, so dass schlechtere Verklebungen in diesen Bereichen nicht auf eine Zerstörung der Primerbeschichtung zurückzuführen sind. Ob die gestreckte und damit dünnere Primerschicht auf die Klebfestigkeit einen negativen Einfluss hat, konnte nicht nachgewiesen werden.

6.4.3 Dehnungsverhalten der Folien beim Verarbeitungsprozess

Die zu verarbeitenden Folien unterliegen einem Dehnungsprozess, der durch die Einflüsse
- Temperatur
- Dauer der Deformation
- Größe der einwirkenden Kraft

bestimmt wird.

Zunächst weist das Material in einem entspannten Zustand, also ohne äußere Krafteinwirkung, einen konstanten Abstand zwischen den Molekülen auf. Diese Abstände verändern sich, wenn sich infolge äußerer Krafteinwirkung Spannungen im Material aufbauen. Es tritt eine Verformung ein. Die Reaktion des Materials nach der Entlastung ist aufgrund der Materialeigenschaften verschieden. Das viskoelastische Verhalten der eingesetzten Folien ist in Bild 49 dargestellt. Im Verarbeitungsprozess wird dieses Verhalten noch von der erhöhten Temperatur beeinflusst, wobei sich dabei die für die Verformung notwendige Kraft verringert.

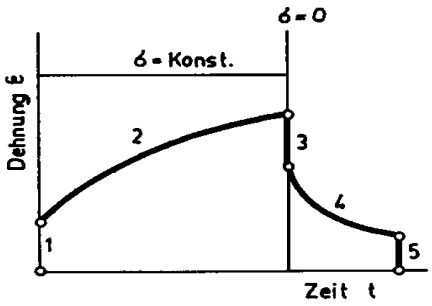
	1 elastische Dehnung (Aufbau) 2 viskoelastischer Dehnungsaufbau unter konstanter Last (Retardation) 3 elastische Dehnung (Rückgang) 4 viskoelastische Dehnungsrückgang 5 bleibende (plastische) Dehnung

Bild 49: Verhalten der Dehnung an viskoelastischen Stoffen bei Entlastung [26]

Die Folie unterliegt beim Beschichtungsprozess einer Zugbelastung, die durch die Verformung entsteht und über die Presszeit konstant gehalten wird. Mit Beendigung der Presszeit, die mit einer plötzlichen Entlastung zu vergleichen ist, erfolgt die Verringerung der Dehnung gemäß Bild 49.

Bei den 3D-beschichteten Bauteilen liegen bezüglich der Verformung verschiedene Belastungszustände vor. Diese sind an der bleibenden Verformung ablesbar und hinsichtlich Oberfläche, Kanten- und Eckbereich unterschiedlich. Es wurden Bauteile mit karierter Folie (10 x 10 mm) 3D-beschichtet und bereits auf dem Bild 50 ist die unterschiedliche Belastung durch die ablesbare bleibende Verformung sichtbar.

Bild 50: 3D-beschichtes Bauteil mit karierter (10 x 10 mm) PO-Folie

Anhand eines, wie in Bild 50 dargestellten mit karierter Folie beschichteten Bauteils, werden die bleibenden Verformungen gemessen. Dafür wurde (gemäß Bild 51) eine Linie quer über das Bauteil als Nulllinie festgelegt. Die darauf in Längsrichtung folgenden Querlinien wurden mit Linie 1 (kurz nach Bauteilkante auf der Schmalfläche), Linie 2 (kurz vor Bauteilunterkante noch auf der Schmalfläche) und Linie 3 (nach Bauteilabschluss auf Presstisch) bezeichnet.

Die Messreihen wurden wie folgt bestimmt (siehe Bild 51):

Breitendehnung: Abstände zwischen den Längslinien (grün)

- x0: auf den Querlinie 0
- x1: auf den Querlinie 1
- x2: auf den Querlinie 2
- x3: auf den Querlinie 3

Längendehnung: Abstände zwischen den Querlinien (rot)

- y1: auf den Längslinien 0 – 1
- y2: auf den Längslinien 1 – 2
- y3: auf den Längslinien 2 – 3

Dickenänderung: Dickenmessung auf den Kreuzungspunkten von Längs- und Querlinien

- d0: auf den Querlinie 0
- d1: auf den Querlinie 1
- d2: auf den Querlinie 2
- d3: auf den Querlinie 3

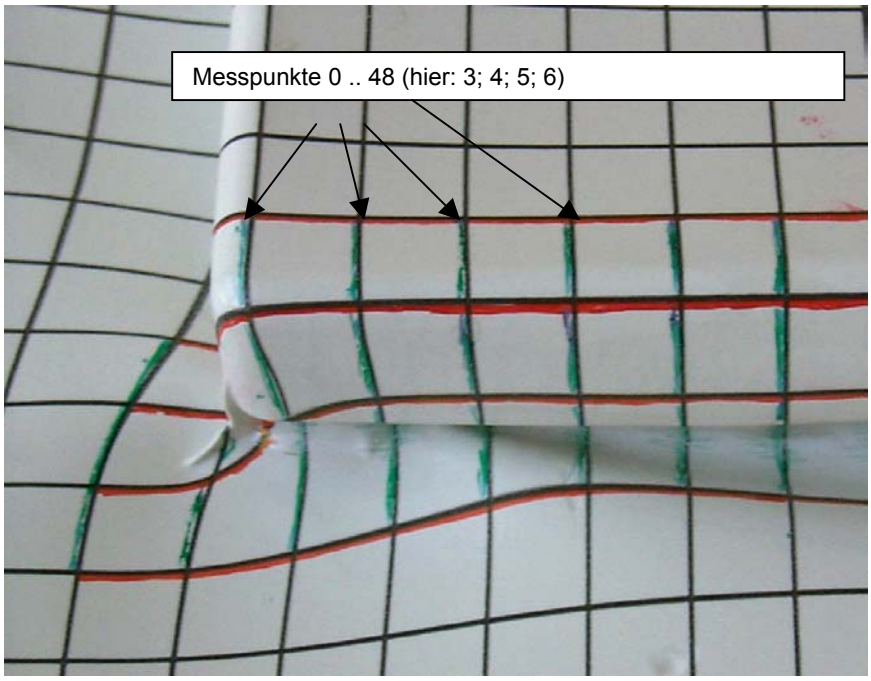


Bild 51: Prinzip der Messwertbestimmung

Anhand der sichtbaren bleibenden Verformung ist ableitbar, welchen Belastungen die Folie an welchen Stellen im Verarbeitungsprozess unterliegt. Für die verschiedenen Dimensionen ist das in den nachfolgenden Bildern deutlich sichtbar. Dabei sind über die gesamte Bauteilbreite die Messwerte aufgenommen und mit den Messpunktnummern 0 bis 48 bezeichnet worden.

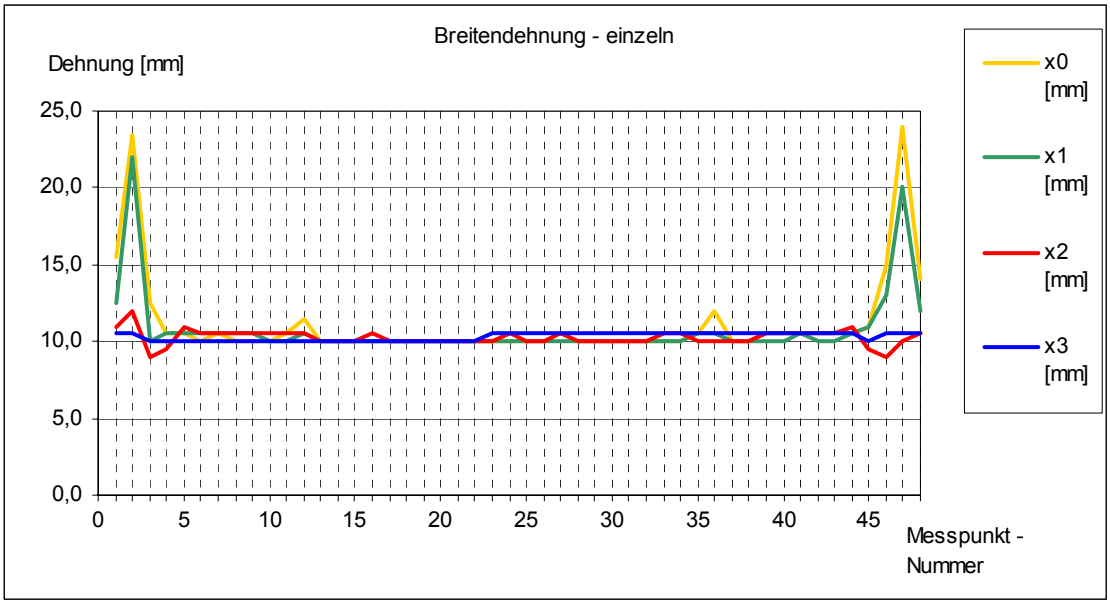


Bild 52: Darstellung der bleibenden Breitendehnung der Folie

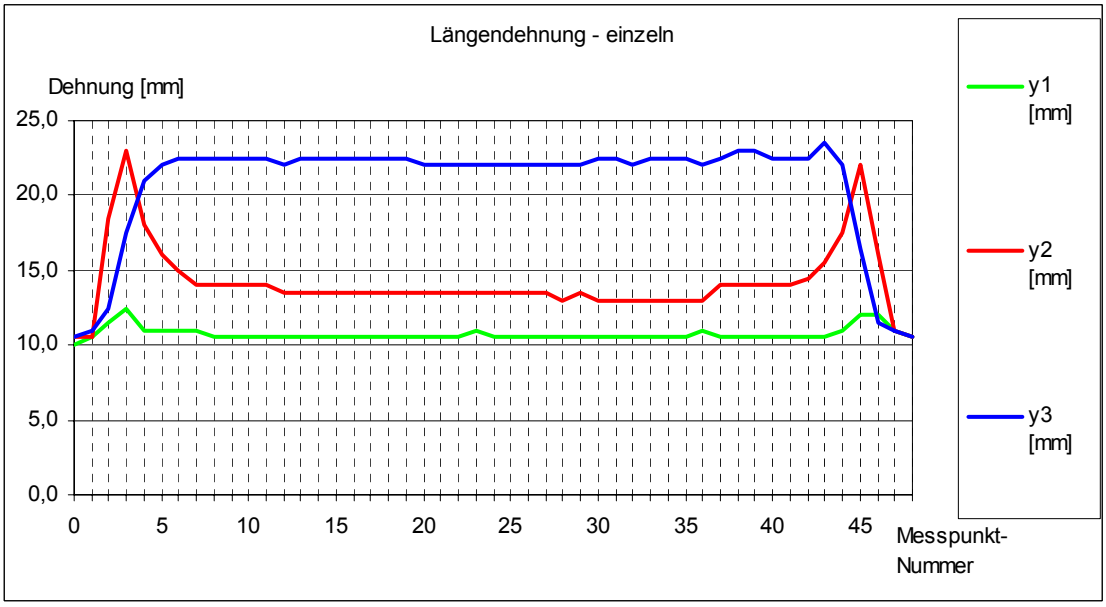


Bild 53: Darstellung der bleibenden Längendehnung der Folie

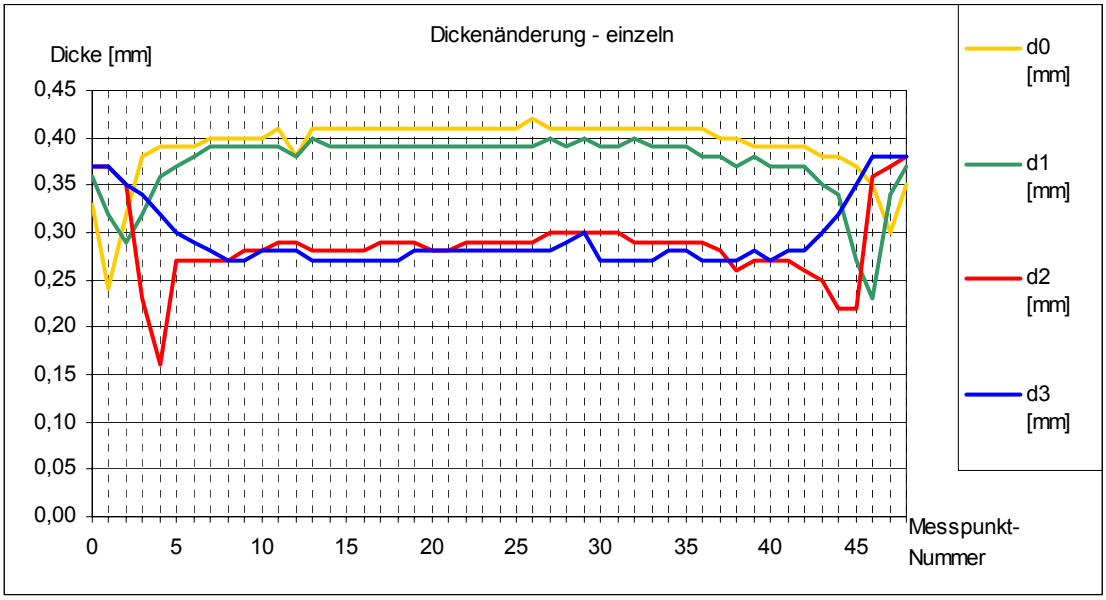


Bild 54: Darstellung der bleibenden Foliendicken

In den Darstellungen wird gut sichtbar, an welchen Stellen und in welcher Größenordnung sich die Verformung auf die Dimensionsänderung der Folie auswirkt. Besonders die Belastungen in den Eckbereichen sind dadurch deutlich erkennbar.

7 Zusammenfassung

Durch die Auswertung der Produktionsdaten der Fa. ALNO über den Zeitraum 34.KW 2000 – 52.KW 2002 war es möglich festzustellen, dass die Qualitätsminderung hauptsächlich durch die bestehenden Produktionsbedingungen beeinflusst werden. Durch die Fa. ALNO wurden Anregungen zur Fehlerverringerung im Verarbeitungsprozess bereits aufgegriffen, z.B. durch Einbau eines Teflonbandes beim Beleimen der Bauteile, sowie die Veränderung des Materials der Pressentische. Weitere dringende Umgestaltungen zur räumlichen Trennung von Rohteilherstellung, Bauteilbeleimung und Bauteilbeschichtung werden angestrebt.

Die Ablösung der PO- Folien durch PVC-Folien bei der 3D-Beschichtung von Möbelteilen hatte keine Senkung des Fehleranteils an der Gesamtproduktion zur Folge. Es änderten sich nur die einzelnen Anteile der Fehlerarten.

Es wurden im Frühling, Sommer, Herbst und Winter Produktionschargen von 60 Bauteilen (verschiedene Abmessungen und Profilierungen) mit PO-Folien beschichtet. Es konnte kein relevanter Einfluss der saisonalen Bedingungen der Herstellung bzw. der Lage der Bauteile in der Presse festgestellt werden. Deutliche Schälkraftverluste sind dagegen in den Eckbereichen der Bauteile, bei kleinen Bauteilaußenradien, hohen senkrechten Schmalflächen so wie sehr kleinen Bauteilen (Querlage zur Folienabrollrichtung) deutlich erkennbar.

Bei den 3D-beschichteten Bauteilen mit der Multiformlaborpresse im ihd wurden Bauteile in verschiedenen Varianten mit PVC- und PO-Folien hergestellt. Sie wurden gemäß der AMK-Richtlinie 09/2002 Klimatests geprüft. Des weiteren wurden Schälkraftbestimmungen und mikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Die Klimaprüfungen zeigten, dass die Verklebungsqualität bei beiden Folienarten nicht ausreichend ist. Einzig der Wärmestand der PO-Beschichtungen überzeugte. Durch die mikroskopischen Untersuchen wurden die Schwachstellen im Kantenbereich Bauteilunterseite- und -schmalfläche deutlich erkennbar. Der durch den Folien- und damit auch Klebstoffrückzug entstehende Spalt ist bei Bauteilen mit bestandenem Klimatest Angriffspunkt für mögliche kurz- oder langfristige Bauteilschädigungen.

Weiterhin wurden die Temperaturverläufe in der Presse und im Bauteil während des Pressvorganges sowohl bei der PO- als auch bei der PVC-Beschichtung aufgenommen. Die hier ermittelten Kennwerte stellen die Ausgangskenngrößen für die Untersuchungen an den einzelnen Materialien dar. Dabei ist das zeitliche Temperaturverhalten von Klebstoff und Folie im Materialverbund besonders zum Zeitpunkt der Pressenöffnung (hydraulische Druckentlastung) und bei der weiteren Bearbeitung von Bedeutung für die Qualität der Verklebung.

An den am Materialverbund beteiligten Materialien (Folien, Klebstoff, Primer) wurden mit verschiedenen Messverfahren der Thermischen Analyse (DSC, DMA, TMA) Untersuchungen durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass das Verhalten der verwendeten Materialien in den technologisch relevanten Temperaturbereichen einem optimalen Materialverbund teilweise entgegenwirkt.

Die Auswertung der DSC-Analyse zeigte, dass die PE/PP-Anteile bei den PO-Folien verschieden sein können und bei konstanten Verarbeitungsparametern wegen dem zur Zeit noch vorhandenen kleinen Verarbeitungsfenster Qualitätsschwankungen die Folge sind. Das unterschiedliche Erweichungsverhalten dieser Folien wird auch bei den Penetrationsuntersuchungen deutlich. Solche Materialschwankungen werden im Verarbeitungsprozess mit PVC-Folie aufgrund deren Materialstruktur nicht in diesem Umfang wirksam. Der Verarbeitungstemperaturbereich befindet sich nicht wie bei den PO-Folien unmittelbar im Erweichungsbereich der Folie.

Bei den TMA-Messungen hinsichtlich des Dehn – und Schrumpfverhaltens der Folien wurde festgestellt, dass die PO-Folien im Gegensatz zu den PVC-Folien im Bereich der Abkühlung nach der Beschichtung ein größeres Rückzugsverhalten (µm/K) zeigen. Durch das höhere Temperaturniveau der PO-Folien nach der Beschichtung muss außerdem ein höherer Temperaturgradient bis zur ausreichenden Abkühlung des Klebstoffes überwunden werden. Damit erhöht sich der Gesamtrückzug der PO-Folie weiter. Durch eine zusätzliche Folienkühlung

müsste eine Senkung der Rückzugskräfte der PO-Folie möglich sein und gleichzeitig eine schnelleres Abbinden des Klebstoffes unterstützt werden.

Somit ist dieses Projekt ein wichtiger Beitrag für den möglicherweise dauerhaften Ersatz von PVC-Folie durch alternative, umweltfreundliche Folien.

8 Ausblick

Hinsichtlich einer künftigen Wiederaufnahme der Verarbeitung von PO- Folien ist vom Folienhersteller die Möglichkeit zu prüfen, das Verarbeitungsfenster des Schmelzbereiches so zu vergrößern, dass Materialschwankungen bei verschiedenen Chargen weniger in der Produktionsqualität sichtbar werden. Um dem höheren Verarbeitungstemperaturniveau der PO-Folie Rechnung zu tragen, könnte der Beitrag der Klebstoffhersteller z. B. darin bestehen, den Klebstoff so zu modifizieren, dass er bei Temperaturen von ca. 60 °C schon hohe Anfangsfestigkeiten erreicht.

Generell ist für eine Optimierung der eingesetzten Materialien die Untersuchung der Spannweite des thermischen Verhaltens dieser Materialien erforderlich. Dabei sind die im vorliegenden F/E-Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse zu berücksichtigen, wie z.B. das gegenläufige Verhalten einiger Materialien aufeinander abzustimmen. Bezüglich dieser optimierten Materialien ist der technologische Beschichtungsablauf zu prüfen, zu verändern und ggf. zu differenzieren. Dies könnte u.a. bedeuten, dass PO-Folien chargenweise geprüft und danach die Verarbeitungsparameter festgelegt werden.

Auch ist bezüglich der Schwachstelle - Spaltentstehung durch den Folienrückzug - zu prüfen, ob und unter welchen Bedingungen der Einsatz von anderer Beleimungsvarianten wie z.B. rückseitig klebstoffbeschichteten Folien für deren Beseitigung sinnvoll ist. Die sich aus einer solchen Klebstoffbeschichtung ergebenden Vorteile, wie z.B. das Entfallen des gesamten Misch- Dosier- und Beschichtungsprozesses der Klebstoffe beim Verarbeiter, sind schon länger bekannt. Der damit verbundene gleichmäßige Klebstoffauftrag würde auf gefrästen Bauteilstellen durch vorheriges Glätten dieser Stellen kein Problem darstellen. Eine verbesserte Oberflächenqualität an den geglätteten Stellen wäre dabei ein angenehmer Nebeneffekt.

Unabhängig von den eingesetzten Folienarten sind weiterführende Untersuchungen an den beschichteten 3D-Bauteilen während der Klimatisierung notwendig, um u. a. solche Effekte, wie die bei der Projektbearbeitung beobachtete Rissbildung unterhalb der Klebstoffschicht im Trägermaterial interpretieren und künftig vermeiden zu können.

Für die Senkung der Fehleranteile in der 3D-Beschichtung sind für die Fertigung weitere mögliche Perspektiven u.a. der Einsatz von einfach nachrüstbaren mechanischen PIN-Systemen. Die Verwendung von Bauteilunterlagen aus MDF-Material bedeutet bei einer flexiblen Fertigung hohe Material- und Fertigungskosten, Lagerkapazitäten, erhöhten Zeitbedarf für Bereitstellung und Lagerarbeiten. Bei Sondermaßteilen müssen erst Unterlagen hergestellt werden. Diese Unterlagen sind durch ihr ständiges Einwechseln vor dem Beschichtungsprozess ein Quelle für das Eindringen von Staub in den Beschichtungsprozess. Mit den PIN-Systemen entfällt der gesamte Prozess des Handlings mit den Unterlagen und somit die damit verbundenen Kosten (Material, Herstellung, Lagerung). Es kann auf veränderte Bauteilgrößen kurzfristig und flexibel umgestellt werden. Gleichzeitig wird ein bedeutender Staubträger (Bauteilunterlage) eliminiert.

Aufbauend auf die Ergebnisse dieses Projektes ist bei gezielter Abstimmung der eingesetzten Materialien und der Anpassung der Verarbeitungstechnologie eine Ablösung der PVC-Folie in der Möbelindustrie durch halogenfreie Folien als realisierbar einzuschätzen.

9 Literaturverzeichnis

[1]	Burghardt, A.; Meyer-Roscher, B.	Stand der Technik bei der 3D-Möbelfolienkaschierung Adhäsion, München 45(2001)5; S.32-35
[2]	Burghardt, A.; Hartz, O.; Seibert, H.; Dr. Wistuba, E.	Untersuchung der Wärmeströme bei der Möbel- folienkaschierung Adhäsion, München 42(1998)6; S.26-30
[3]	Hippold, Th.	Polyurethan-Dispersionen für die 3D-Beschichtung; Vortrag anlässlich des 3. Internationalen Symposiums „ Die 3D-Beschichtung von Holzwerkstoffen“ 18.-20.05.1998
[4]	Zilles, J.-U.	Der Kontaktwinkel : Beurteilung des Benetzungsverhaltens von Beschichtungsstoffen, Bonn, LapTops Journal 04/02; S.42-45
[5]	Heinemann, Ch.	Kinetik von Leimsystemen – Mechanische Charakterisierung vs. Chemische Analytik; Hamburg, Holzwerkstoff-Workshop, 07.02.2002
[6]	Krüger, G.	Messen und Prüfen in der Klebtechnik - ein Überblick, Adhäsion, München 43(1999)7-8; S.24-29
[7]	Erb, A.; Dr. Frank, H.	Prüfung von Kantenschmelzklebstoffen im Rollenschälversuch, Material + Technik Möbel, 02/1997
[8]	N.N.	Fehlverleimung durch falsche Zeiteinschätzung; Material + Technik Möbel, 02/1997
[9]	Theuerkauff, P.; Groß, A.	Praxis des Klebens, Springer- Verlag, 1989, Berlin - Heidelberg
[10]	Habenicht, G.	Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendungen; Springer- Verlag, Berlin-Heidelberg; 1997
[11]	Festel, G.; Proß, A.; Stepanski, H.; Blankenheim, H.; Witkowski, R.	PUR-Klebstoffe - Zusammenhalt in Vielfalt, Adhäsion, München 41(1997)5, S.16- 22-26
[12]	Huber,R.	Neue Perspektiven in der Beschichtungstechnik: Die Multiform-Presse von Bürkle, HK, Holz-Kunstst.verarb., Leinfelden-Echterdingen, 26(1991)10,-S.1276-1277
[13]	DIN 51005	Thermische Analyse (TA), Begriffe. August 1993
[14]	DIN 53765	Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren – Thermische Analyse – Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK). März 1994
[15]	van der Plaats, G.	Die Praxis der Thermischen Analyse; Mettler Toledo
[16]	Gerätebeschreibung	Mettler Messzelle TMA 40; Mettler Instrumente AG, Greifensee/ Schweiz; 1988
[17]	Gerätebeschreibung	DMA 2980, Dynamischer Analysator, TA Instruments

[18]	Vieweg, R.; Schley, A.; Schwarz, A.	Kunststoff-Handbuch (Band IV) Polyolefine – Herstellung, Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung; Carl Hansen Verlag München 1969
[19]		Grundwissen des Ingenieurs; VEB Fachbuchverlag Leipzig, 12. Aufl. 1985
[20]	Schmiedel, H.; Schiefer, H.	Hochpolymere und ihre Prüfung, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1.Aufl. 1972
[21]	Zosel, A.	Lack- und Polymerfilme – Voiskoelstische Qualitätsmerkmale, Vincentz Verlag Hannover, 1996
[22]	AMK- Arbeitsgruppe Technik & Normung	AMK- Merkblatt; 09/2002; Küchenmöbel – Ermittlung von Oberflächentemperaturen
[23]	AMK- Arbeitsgruppe Technik & Normung	AMK- Merkblatt; 09/2002; Feuchte- und Klimabeständigkeit von Küchenmöbelbauteilen
[24]	Forbo-Helmitin GmbH	Produktinformation Helmitin 34 333 02/1999
[25]	Autorenkollektiv	3. Internationalen Symposiums; Die 3D-Beschichtung von Holzwerkstoffen, Bielefeld, Selbstverlag, 1998
[26]	Ludeck, W.	Handbuch der Kleb-, Gieß- und Laminiertechnik, 2.erw. Aufl., VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1979
[27]	Redecker, W.	PVC-Beschichtung in der Möbelindustrie; MDF-Magazin 1998, S. 54-55
[28]	Frank, A.	Polyvinylchlorid (PVC), Kunststoffe 80 (1990) 10, S. 1070 - 1075
[29]	Deppe, H.- J.	Zur PVC- Problematik in der Holzwerkstoff- und Möbelindustrie, HK, Holz-Kunstst.verarb., Leinfelden-Echterdingen, 28(1993)9, S. 982 – 985
[30]	Umweltbundesamt (Hrsg.)	Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC; Berlin, Erich Schmidt Verlag, 1999
[31]	Lange, P.- G.	Vielfalt bei3D-Folien, HK, Holz-Kunstst.verarb., Leinfelden-Echterdingen, 35(2000)5, S. 36, 39 - 40

10 Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Gesamtproduktion 34. KW 2000 – 51. KW 2002 8
Bild 2: Fehlertypanteile am Gesamtfehlerumfang der Produktion (2000-2002) 11
Bild 3: Entwicklung der Fehlertypanteile an der Gesamtproduktion (2000–2002) 11
Bild 4: Gesamtübersicht über die Anteile der Fehlerarten....13
Bild 5: Anzahl der Fehlerarten je Bauteilnummer....14
Bild 6: Übersicht der Fehlersummen der einzelnen Bauteile bzgl. Bauteildimensionen und Lage in der Presse....15
Bild 7: Rollenschälversuch – Prüfung von flexiblen Kantenmaterial 16
Bild 8: Schematische Darstellung der Prüfvorrichtung....16
Bild 9: Prüfkörper- Schälkraft- Auswertungsschema....17
Bild 10: Einfluss der Herstellungssaison auf den Schälkraftverlauf 18
Bild 11: Einfluss der Prüfkörperlage auf den Schälkraftverlauf 19
Bild 12: Einfluss der Ecklage auf den Schälkraftverlauf....19
Bild 13: Einfluss des Bauteilmodells auf den Schälkraftverlauf....21
Bild 14: Einfluss der Bauteilgröße auf den Schälkraftverlauf 22
Bild 15: Multiformlaborpresse LAMP 0909/60 der Fa. Bürkle 23
Bild 16: Thermoformpressen ohne Membran – 1. Phase....23
Bild 17: Thermoformpressen ohne Membran – 2. Phase....24
Bild 18: Thermoformpressen ohne Membran – 3. Phase....24
Bild 19: Schematische Darstellung der Prüfkörperherstellung....25
Bild 20: Pressenbelegung zur Prüfkörperherstellung....25
Bild 21: Schälkraftverlauf bei ebenflächigen PVC- Beschichtungen 27
Bild 22: Schälkraftverlauf bei ebenflächigen PO-Beschichtungen 27
Bild 23: Abgeschälte Prüfkörper nach 7 Tagen, Klebstoffauftrag ca. 80 g/m² Klebstoffauftrag ..28
Bild 24: Bauteil für die 3D-Beschichtung in der Laborpresse....29
Bild 25: Temperaturzyklus....31
Bild 26: Zyklus zum Wechselklimatest 32
Bild 27: Mikroskopische Untersuchungsbereiche am Bauteil....33
Bild 28: Ablösung der Folie an Bauteiloberseite....34
Bild 29: Festigkeitsaufbau bei Thermoaktivierung von PUR- Klebstoffen [11]....42
Bild 30: Versuchsaufbau für die Temperaturmessung in der Laborpresse 44
Bild 31: Temperaturverläufe beim Beschichten mit PVC- Folie in 3D- Laborpresse....45
Bild 32: Temperaturverläufe beim Beschichten mit PO- Folie in 3D- Laborpresse 45
Bild 33: Abkühlverhalten bei PO- und PVC- Beschichtung 46
Bild 34: Schematische Darstellung einer DSC- Messzelle [15]....47
Bild 35: DSC- Messplatz im ihd....48
Bild 36: Darstellung von viskosem und elastischem Verhalten [17]....48
Bild 37: Darstellung des viskoelastischen Verhaltens [17]....49
Bild 38: Dynamisch- Mechanische Analysator DMA 2980 [17] 49
Bild 39: Probeneinspannung für Biegeversuch mit freiem Kräfteverlauf [17]....50
Bild 40: Probeneinspannung für Zugversuch [17]....50
Bild 41: Schematische Darstellung eines TMA- Gerätes [15] 51
Bild 42: Speicher- und Verlustmodulbestimmung der Folien im DMA-Biegeversuch....54
Bild 43: Messergebnis der DMA- Zugversuche der Folien....55
Bild 44: Messergebnis der Penetrationsversuche der Folien....56
Bild 45: Vergrößerung des Bereiches 0 – 30 µm 56
Bild 46: Rückzugsverhalten der Folien bei Abkühlung....57
Bild 47: ABES- Messeinrichtung mit offenen Pressstempeln....60
Bild 48: ABES- Messeinrichtung mit geschlossenen Pressstempeln....60
Bild 49: Verhalten der Dehnung an viskoelastischen Stoffen bei Entlastung [26]....63
Bild 50: 3D-beschichtes Bauteil mit karierter (10 x 10 mm) PO-Folie 63
Bild 51: Prinzip der Messwertbestimmung 64
Bild 52: Darstellung der bleibenden Breitendehnung der Folie....65
Bild 53: Darstellung der bleibenden Längendehnung der Folie 65
Bild 54: Darstellung der bleibenden Foliendicken 66

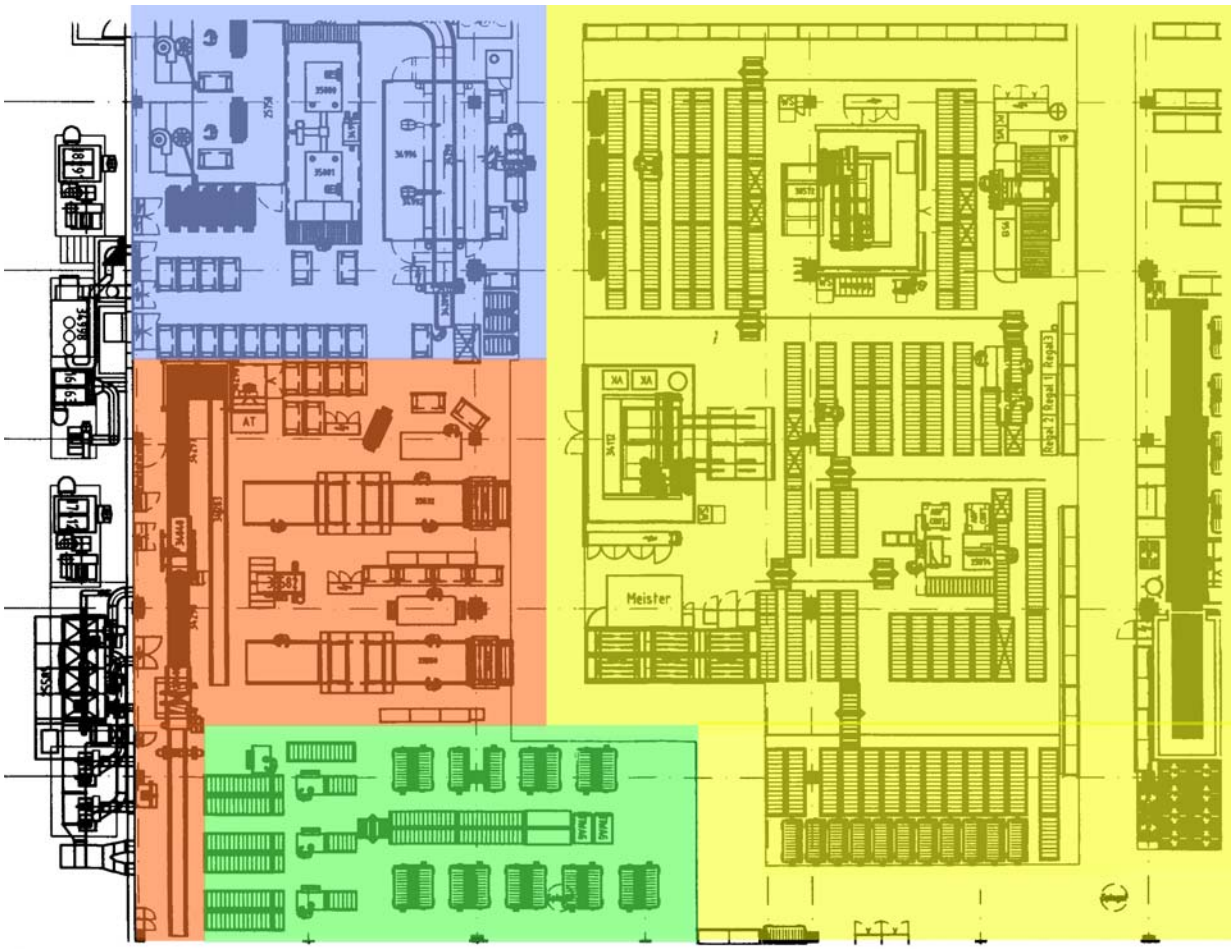
11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht über die wichtigsten thermoplastischen Folien für 3D-Beschichtung [31] 5
Tabelle 2: Übersicht der Fehlerarten 9
Tabelle 3: Ausgewählte Merkmale der verwendeten Bauteilmodelle 20
Tabelle 4: Ausgewählte Merkmale für die Bauteilgröße 21
Tabelle 5: Verwendete Pressparameter mit der LAMP 0909/60 der Fa. Bürkle 26
Tabelle 6: Übersicht der Herstellungsvarianten und der ermittelten Schälkräfte 29
Tabelle 7: Mikroskopische Auswertungen ausgewählter Bauteile nach Klimaprüfung 35
Tabelle 8: Ausgewählte Aufnahmen der mikroskopischen Untersuchungen nach Klimaprüfungen 36
Tabelle 9: Weitere mikroskopischen Auswertungen ausgewählter 38
Tabelle 10: Weitere ausgewählte Aufnahmen von den mikroskopischen Untersuchungen 38
Tabelle 11: Gemittelte Rauhtiefen des eingesetzten MDF-Materials 44
Tabelle 12: Einstellungen bei der DSC- Analyse 52
Tabelle 13: Ergebniswerte der DSC- Analyse der eingesetzten PO-Folien 53
Tabelle 14: Ergebniswerte der TMA der Folien bei Abkühlung (115 °C/ 125 °C – RT) 58
Tabelle 15: Mikroskopischen Bestimmung der Primerschichtdicken 62

12 Anlagen

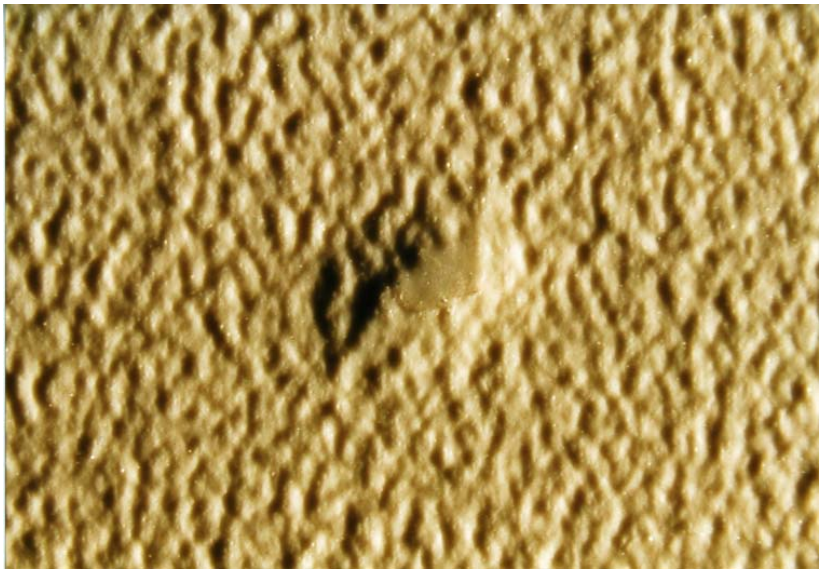
Anlage 1: Layout des Fertigungsbereiches von folienbeschichteten Möbelfronten 75
Anlage 2: Bilder der auftretenden Fehlertypen.....76
Anlage 3: Lage der Prüfkörper in Bauteilen mit Kennzeichnung der Abschälrichtung 79
Anlage 4: Zusammenstellung der mikroskopischen Ergebnisse der Verklebungen 80
Anlage 5: Gesamtübersicht zu den geprüften 3D-beschichteten Bauteilen 84
Anlage 6: Übersicht zu den verwendeten Folien.....85
Anlage 7: Klebstoffdatenübersicht (Werte teilweise aus [24]).....86
Anlage 8: DSC- Messkurve der Folie PVC 1.....87
Anlage 9: DSC- Messkurve der Folie PVC 2.....88
Anlage 10: DSC- Messkurve der PO- Folien (2.Lauf) von 25 – 160 °C 89
Anlage 11: Bestimmung des Verteilungsverhältnis von PE/PP.....90
Anlage 12: Vergleich der Schmelzbereiche der PO-Folien bei 125 °C 91
Anlage 13: Dimensionsänderung (längs und quer zur Herstellrichtung) der PVC- Folien in Anlehnung an Prozesstemperatur 92
Anlage 14: Dimensionsänderung (längs und quer zur Herstellrichtung) der PO- Folien in Anlehnung an Prozesstemperatur 93
Anlage 15: TMA-Messkurven (Vergrößerung) bei Abkühlung der PVC-Folien 94
Anlage 16: TMA-Messkurven (Vergrößerung) bei Abkühlung der PO-Folien 95
Anlage 17: DSC- Messkurve der Klebstoffe (Aufschmelzen).....96
Anlage 18: DSC- Messkurve der Klebstoffe (Aufschmelzen und Abkühlung).....97
Anlage 19: Messwerterfassung bei der ABES-Prüfung.....98

Anlage 1: Layout des Fertigungsbereiches von folienbeschichteten Möbelfronten

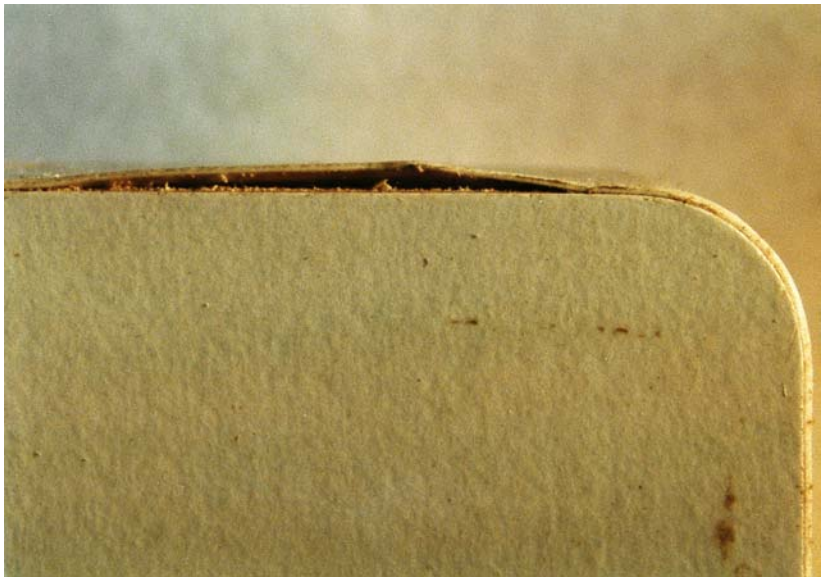


Anlage 2: Bilder der auftretenden Fehlertypen

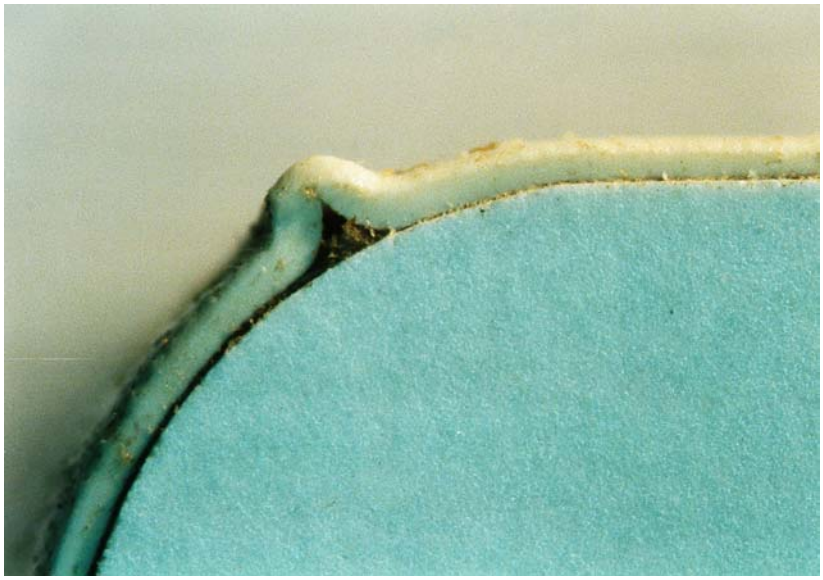
Pickel:



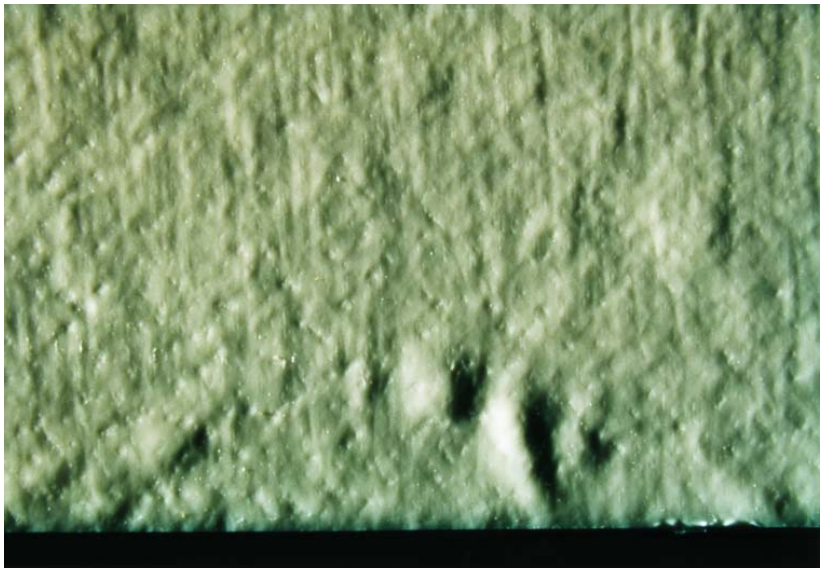
Lose Folie:



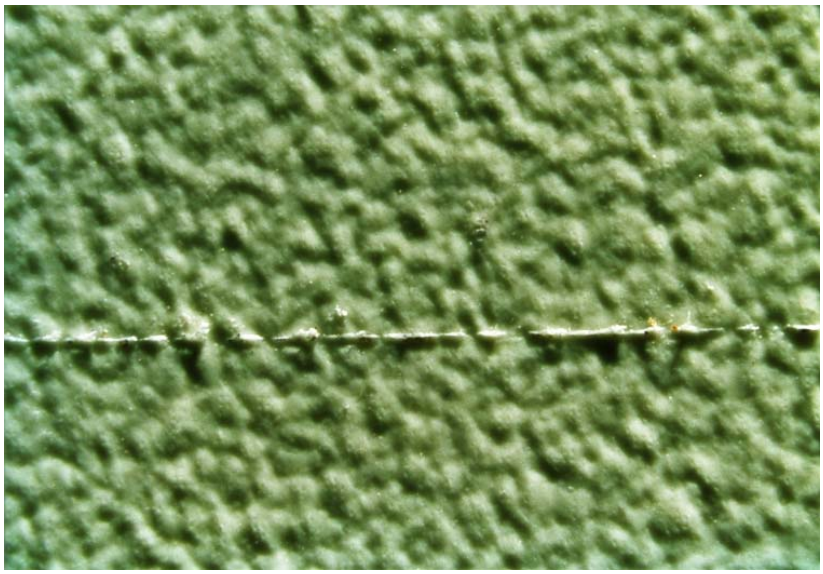
Nasen:



Klebstoffteile:



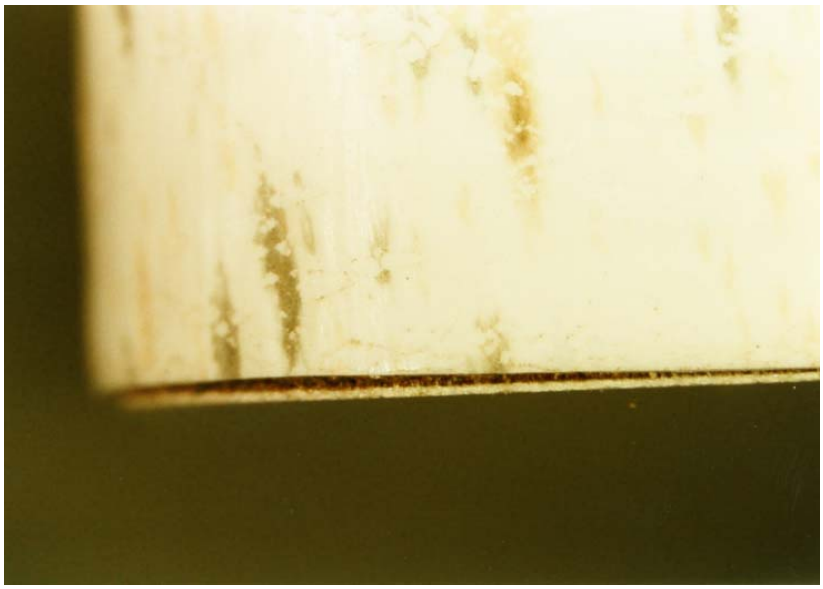
Kratzer:



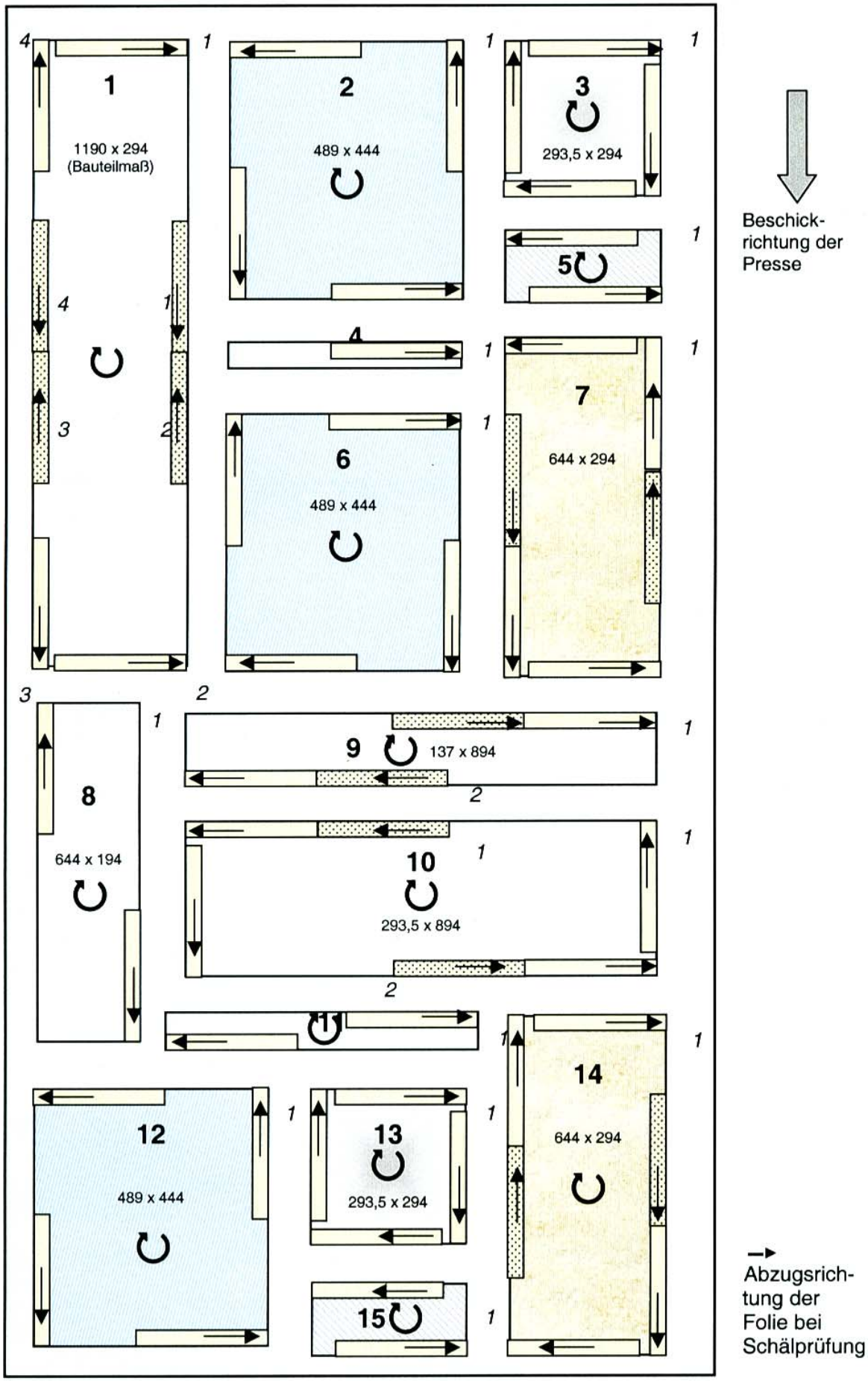
Streifen:

Folieneinschnitt:

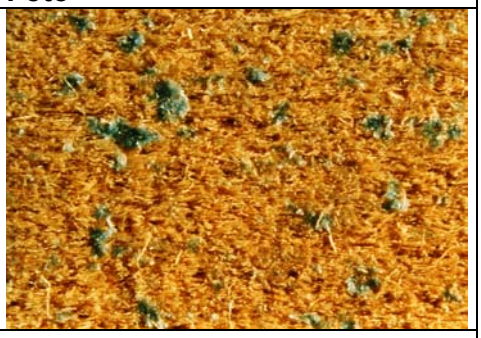
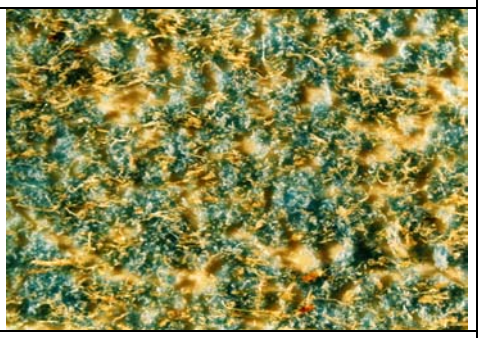
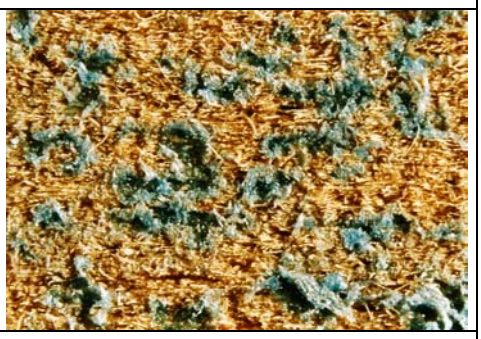
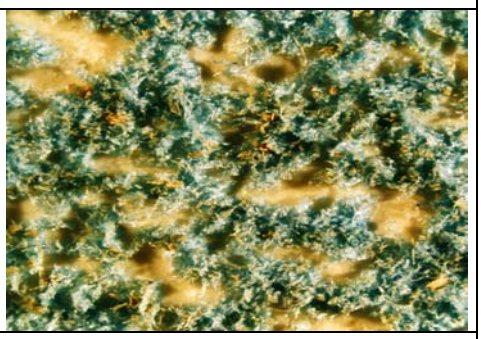
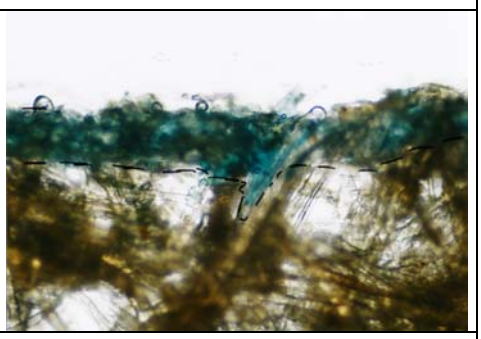
Folienrückzug:

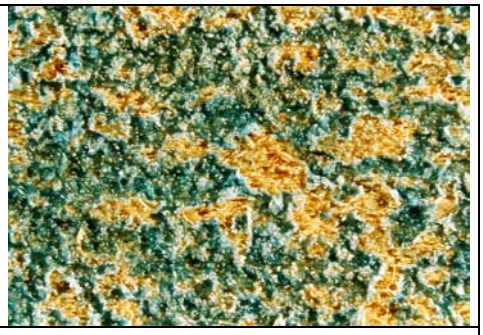
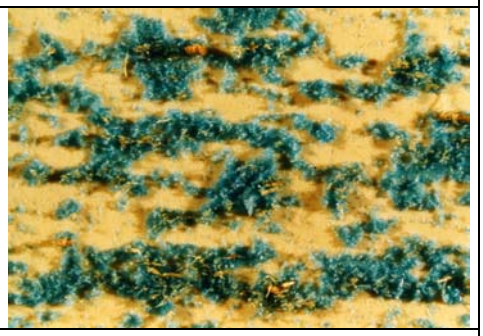
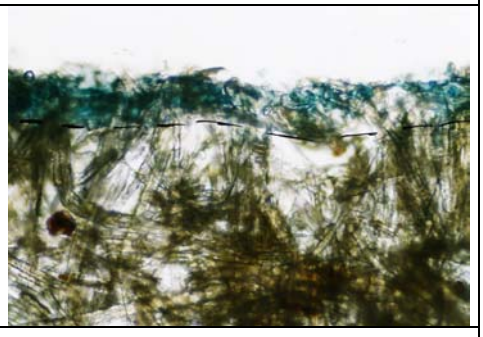
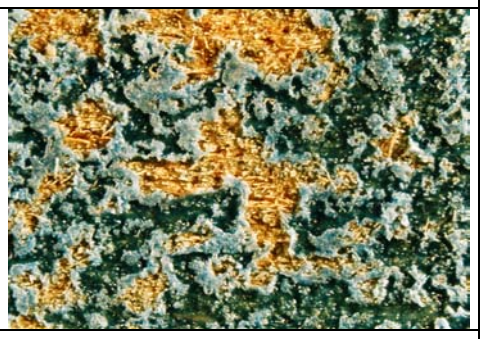
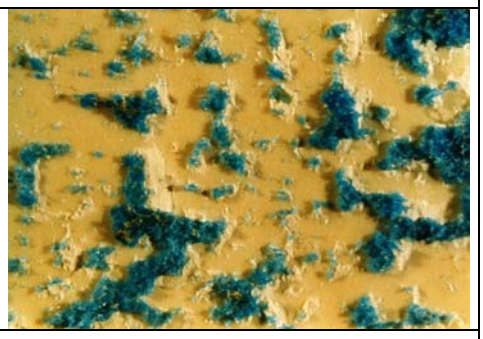


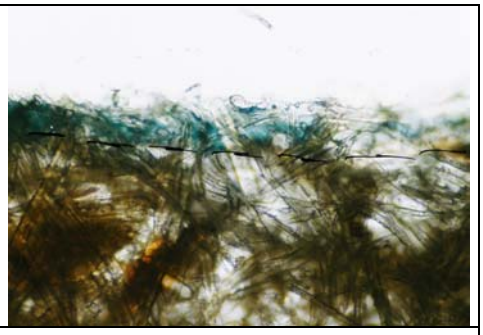
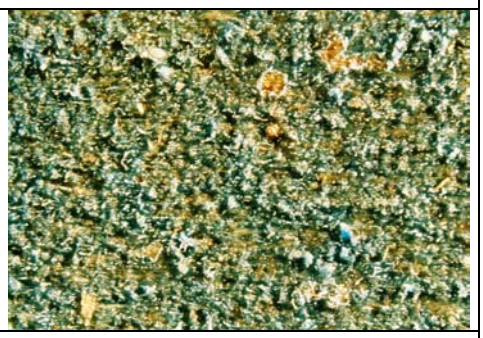
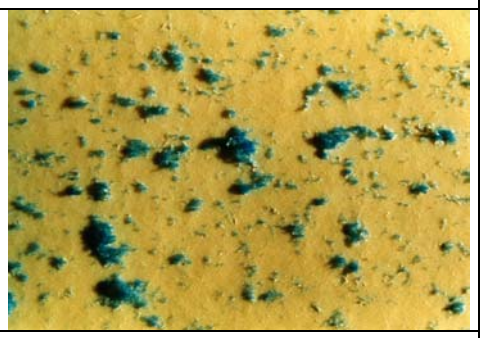
Anlage 3: Lage der Prüfkörper in Bauteilen mit Kennzeichnung der Abschälrichtung



Anlage 4: Zusammenstellung der mikroskopischen Ergebnisse der Verklebungen

Nr.	Probe	Erläuterungen	Foto
1	Helmitin PVC-Folie	auf MDF- Oberfläche: etwa 10 % Klebstoffrückstände	
2	Helmitin PVC-Folie	Rückseite der PVC-Folie: etwa 90 % haftender Klebstoff zahlreiche aus der MDF- Oberfläche ausgerissenen bräunliche Fasern erkennbar.	
3	Helmitin PO- Folie	auf MDF- Oberfläche: etwa 25 % Klebstoffrückstände	
4	Helmitin PO- Folie	Rückseite der PO- Folie: etwa 75 % haftender Klebstoff; zahlreiche aus der MDF- Oberfläche ausgerissenen bräunliche Fasern erkennbar.	
5	Helmitin PO- Folie	Mikroskopischer Dünnschnitt durch den oberflächennahen Bereich der MDF- Platte Klebstoffeindringtiefe: etwa 70 bis 100 µm.	

6	PUR2 PVC Folie	auf MDF- Oberfläche: etwa 50 % Klebstoffrückstände	
7	PUR2 PVC Folie	Rückseite der PVC-Folie: etwa 50 % haftender Klebstoff zahlreiche aus der MDF- Oberfläche ausgerissenen bräunliche Fasern erkennbar.	
8	PUR2 PVC Folie	Mikroskopischer Dünnschnitt durch den oberflächennahen Bereich der MDF- Platte; Klebstoffeindringtiefe: etwa 75 bis 150 µm.	
9	PUR2 PO- Folie	auf MDF- Oberfläche (mit einer Probenlänge von 10 cm): etwa 50 % Klebstoffrückstand	
10	PUR2 PO- Folie	auf PO- Folienrückseite (in dem o.g. Bereich): etwa 50 % der Fläche mit haftendem Klebstoff kaum Fasern der MDF anhaftend	

11	PUR2 PO- Folie	mikroskopischer Dünnschnitt durch den oberflächennahen Bereich der MDF- Probe; <u>Klebstoffeindringtiefe</u>: etwa 75 bis 150 µm	
12	PUR2 PO- Folie	<u>auf MDF- Oberfläche</u> mit einer Probenlänge von 10 cm (anderer Bereich der Probe im Vgl. zu Foto 9): etwa 90 % Klebstoffrückstände	
13	PUR2 PO- Folie	<u>auf der Folienrückseite</u> in diesem Bereich: etwa auf 10 % der Fläche haftet Klebstoff von der MDF -Probe ausgerissene bräunliche Fasern sind nicht erkennbar	
14	Helmitin PO- Folie	Querschnitt durch PVC Folie (320 µm dick), einschl. anhaftender Klebstoffreste	

15	Helmitin PO- Folie	Querschnitt durch PO Folie (450 µm dick), einschl. anhaftender, zum Teil stark gedehnter Klebstoffreste	
16	PUR2 PVC Folie	Querschnitt durch PVC Folie, einschl. anhaftender Klebstoffreste	
17	PUR2 PO- Folie	Querschnitt durch PO Folie, einschl. anhaftender Klebstoffreste	

Übersicht

Presseneinstellung:						PVC	PO		**Klebstoff:**		Helmitin 34333 + 5% Vernetzer D					**Wertung nach Klimatisierung**				
		Vorwärmzeit			s	100	120				PUR2 + 5%Vernetzer					0	keine Veränderung			
		Presszeit			s	40	30									1	sehr geringe Veränderungen			
		Pressdruck			bar	4,5	5,0 (ALNO: 5,6)									2	geringe Veränderungen			
		Presstemp			°C	126	139								**Bauteil-**	3	mittlere Veränderungen			
		Vorev./Vakuum			s/s	1/4	0/6 (ALNO: 2/6)								**feuchte**	4	starke Veränderungen			
									Klimalagerung vor Beschichtung:						**[%]**	5	sehr starke Veränderungen			
Trägermaterial:		MDF	Rückseite Melaminharz beschichtet						A-Normalklima (23 °C/ 50 % rel.LF))						6,5					
		Abmessung:		137x294x19,5					B-Trockenklima (20 °C/ 35% rel. LF)				8 Tage		5,4					
		Feuchte:		6-10% (ALNO)					C-Feuchtklima (20 °C/ 85 % rel. LF))				8 Tage		10,8					

Herstellungsvarianten			**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**ALNO**	**ALNO**
Folienart			PVC	PVC	**PO**	**PO**	**PO**	**PO**	**PO**	**PO**	PVC	PVC	**PO**	**PO**	**PO**	**PO**	**PO**	**PO**
Folienstärke			0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Klebstoff			**Helmitin**	**Helmitin**	**Helmitin**	**Helmitin**	**Helmitin**	**Helmitin**	**Helmitin**	**Helmitin**	**PUR2**	**PUR2**	**PUR2**	**PUR2**	**PUR2**	**PUR2**	**PUR2**	**PUR2**
Aufschnitt	nach:		10s	**120s**	10s	**120s**	10s	**120s**	**120s**	**120s**	10s	**120**	10s	**120s**	**120s**	**120s**	10s	**120s**
Bt-unterlage	a - 8mm m.Aussp.		a	a	a	a	b	b	a	a	a	a	a	a	a	a		
	b - 16mm m.Aussp.																	
Klimalagerung	vor Beschichtung		A	A	A	A	A	A	B	C	A	A	A	A	B	C		
Herstellungsdatum			17.09.02	17.09.02	17.09.02	18.09.02	18.09.02	18.09.02	09.10.02	25.09.02	20.09.02	20.09.02	01.10.02	01.10.02	09.10.02	25.09.02	02.07.02	02.07.02
Prüfung nach mind. 7 Tagen Lagerung NK																		
1 AMK MBI.09/02	Wärmestand		1-3	21-23	41-43	61-63	81-83	101-103	121-123	141-143	161-163	181-183	201-203	221-223	241-243	261-263	322-323	331-332
		Wertung	0/0/4	5/5/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/4/0	4/4/4	2/2/2	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0	0/0
2 AMK Modul 1	Wasserbe-		4-6	24-26	44-46	64-66	84-86	104-106	124-126	144-146	164-166	184-186	204-206	224-226	244-246	264-266	324-325	333-334
(09/2002)	aufschlagung		(0/0/0)	(0/0/0)	(2/0/3)	(2/0/1)	(0/0/0)	(1/0/0)	(0/0/0)	(0/0/0)	(2/4/2)	(1/1/1)	(0/0/0)	(3/1/2)	(1/0/2)	(0/0/0)	(0/0)	(1/0)
		Wertung	0/0/0	0/0/0	0/0/3	1/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	2/4/0	0/1/0	0/0/0	0/0/2	0/0/1	0/0/0	0/0	1/0
3 AMK Modul 2	Wasserdampf		7-9	27-29	47-49	67-69	87-89	107-109	127-129	147-149	167-169	187-189	207-209	227-229	247-249	267-269	326-327	335-336
(09/2002)		Wertung	2/5/5	1/1/1	4/0/1	2/5/0	0/1/4	2/0/5	2/5/2	0/5/4	5/5/5	2/2/1	1/2/0/	1/5/5	0/0/0	2/5/0	5/2	5/1
4 AMK Modul 3	Feuchtklima		10-12	30-32	50-52	70-72	90-92	110-112	130-132	150-152	170-172	190-192	210-212	230-232	250-252	270-272	328-329	337
(09/2002)		Wertung	0/0/0	0/0/0	1/0/2	0/1/1/	1/0/0	2/3/0	0/1/0	0/1/0	3/0/0	0/1/1	0/1/1	2/0/2	1/0/1	0/1/0	2/3	3
5 AMK Modul 4	Wechselklima		13-15	33-35	53-55	73-75	93-95	113-115	133-135	153-155	173-175	193-195	213-215	233-235	253-255	273-275	329-330	338-339
(09/2002)		Wertung	1/0/1	0/5/4	2/1/0	2/1/2	0/0/4	2/0/1	0/2/0	0/2/0	4/2/1	1/2/2	0/0/2	0/0/0	2/4/0	0/1/0	2/2	1/0
Schälkraft			16-19	36-39	56-59	76-79	96-99	116-119	136-139	156-159	176-179	196-199	216-219	236-239	256-259	276-279	341-344	345-348
	F max		38,2	38,5	28,5	27,0	34,6	28	29,3	29,1	33,8	35,6	21,4	23,9	10,8	22,3	10,5	11,6
	M MW		20,4	23,5	20,5	20,4	26,8	19,4	19,9	19,3	20,2	24,9	13,2	16,6	7,3	15,4	6,8	7,5
	Stabw		9,4/9,7	3,5/2,7	5,2/5,4	4,7/4,7	3,7/4,1	4,7/4,3	6,2/4,9	6,5/5,6	8,6/10,6	10,8/11,2	9,3/6,8	6,9/4,9	4,3/3,0	6,3/5,5	4,9/2,9	2,9/2,5
	%		24,5/47,4	9,0/11,6	18,3/26,3	17,3/22,8	10,7/15,7	16,6/22,1	21,3/24,5	22,1/29,6	25,5/52,6	30,3/44,9	43,5/51,3	28,7/28,0	39,7/41,7	28,4/35,7	46,7/42,6	24,7/32,7
Bauteil f. sonstige Untersuchg.			20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280		
1 - 348	Prüfkörpernummerierung																	

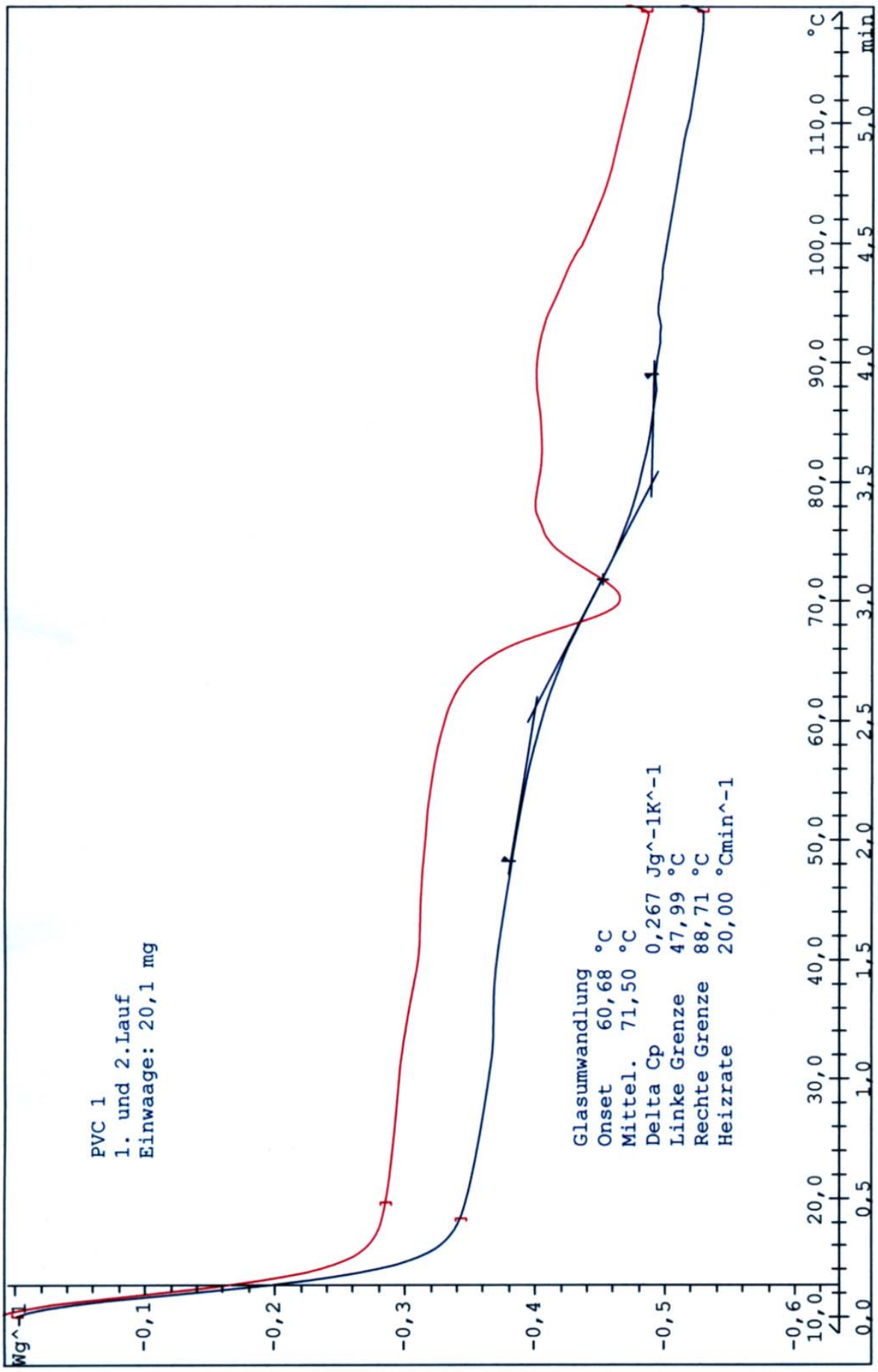
Anlage 6: Übersicht zu den verwendeten Folien

	PO1	**PO2**	**PVC1**	**PVC2**
Folie	Polyolefin	Polyolefin	Polyvinylchlorid	Polyvinylchlorid
Bezeichnung	perlweiß gesprenkelt HPM3 Design: ALNO2 826-0082	Vanille Selectfilm uni F 822 0215	Uni 429 0036	Maserung 422 4004
Dicke [mm]	0,5	0,5	0,4	0,4
Flächenmasse [g/m²]	485	490	520	520
Rohdichte [kg/m³]	970	980	1300	1300
Zugfestigkeit [N/mm²] **∟ zur Herstell-richtung**	15,98	19,26	39,52	48,86
Zugfestigkeit [N/mm²] **II zur Herstell-richtung**	14,64	15,40	43,64	44,20
Verwendung bei:	In Produktion herge-stellte Bauteile			
	Fehlerbeurteilung			
		Temperaturmessung in Laborpresse		Temperaturmessung in Laborpresse
		Horizontale Be-schichtung	Horizontale Be-schichtung	
	3D-Bauteile	3D-Bauteile		3D-Bauteile
Prüfungen/ Analysen:	Schälkraft (Rollen-schälprüfung)	Schälkraft (Rollen-schälprüfung)	Schälkraft (Rollen-schälprüfung)	Schälkraft (Rollen-schälprüfung)
	Klimaprüfung	Klimaprüfung		Klimaprüfung
	Benetzungsverhalten	Benetzungsverhalten	Benetzungsverhalten	Benetzungsverhalten
	Mikroskopische Un-tersuchungen	Mikroskopische Un-tersuchungen		Mikroskopische Un-tersuchungen
	DSC	DSC	DSC	DSC
	DMA	DMA	DMA	DMA
	TMA	TMA	TMA	TMA
		ABES	ABES	

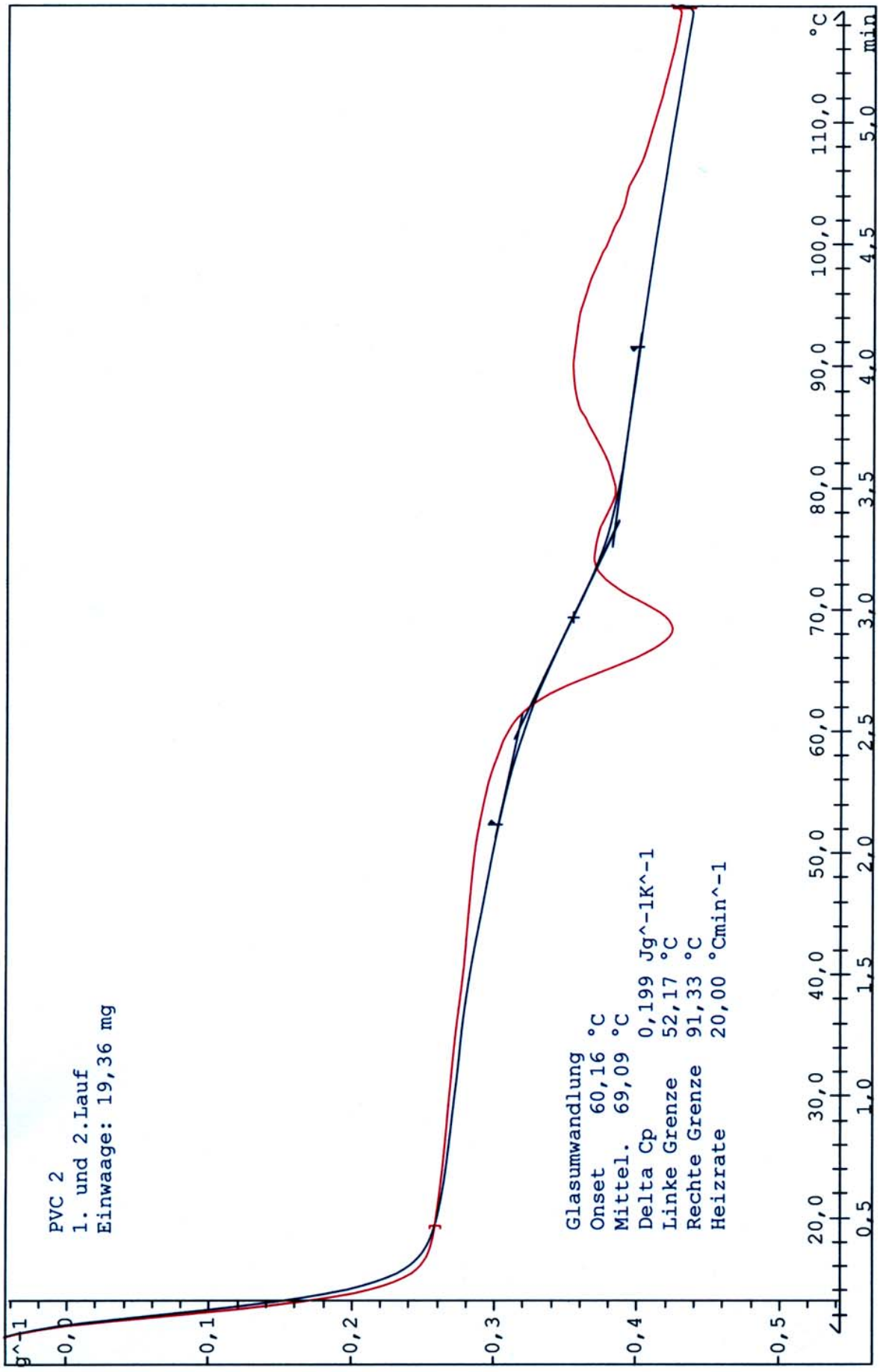
Anlage 7: Klebstoffdatenübersicht (Werte teilweise aus [24])

	Helmitin-Kleber 34333	PUR2
Basis (Komponente 1)	Polyurethan-Dispersion	Polyurethan-Dispersion
Farbe	weiß	weiß
Viskosität (Brookfield)	ca. 2000 mPa s	ca. 1700 mPa s
Dichte	1,05 g/cm³	1,0 g/cm³
Feststoffanteil im Ihd nach DIN en 11890/1 bestimmt	 40,8 %	ca. 43 % 41,9 %
Zugabe von Vernetzer	5 % Vernetzer D	5 %
Topfzeit/ Verarbeitungszeit:	ca. 8 Std.	4 – 6 Std.
Offene Zeit (Trocken- o. Ablüftzeit) abh. von Temp., Luftfeuchte u. Auftragsmenge	30 – 60 min	30 – 50 min
Siegeltemperatur je nach Material	70 – 90 °C	75 – 90 °C
Siegelzeit		20 – 40 s
Wärmebeständigkeit	90 – 120 °C	
pH-Wert	6,73 (ihd)	7,8
Vernetzer: (Komponente 2)	Vernetzer D	
Basis	Isocyanate	Isocyanate
mit:		<0,5 % Hexamethylen-1.6-diisocyanat
Form		flüssig
Siedepunkt		230 °C
Flammpunkt		181 °C
Dichte (bei 20°C)	ca. 1,16 g/cm³	ca.1,2 g/cm³
ph-Wert (bei 20°C)		ca. 8
dyn. Viskosität (Brookfield) bei 20°C		2000 mPa s

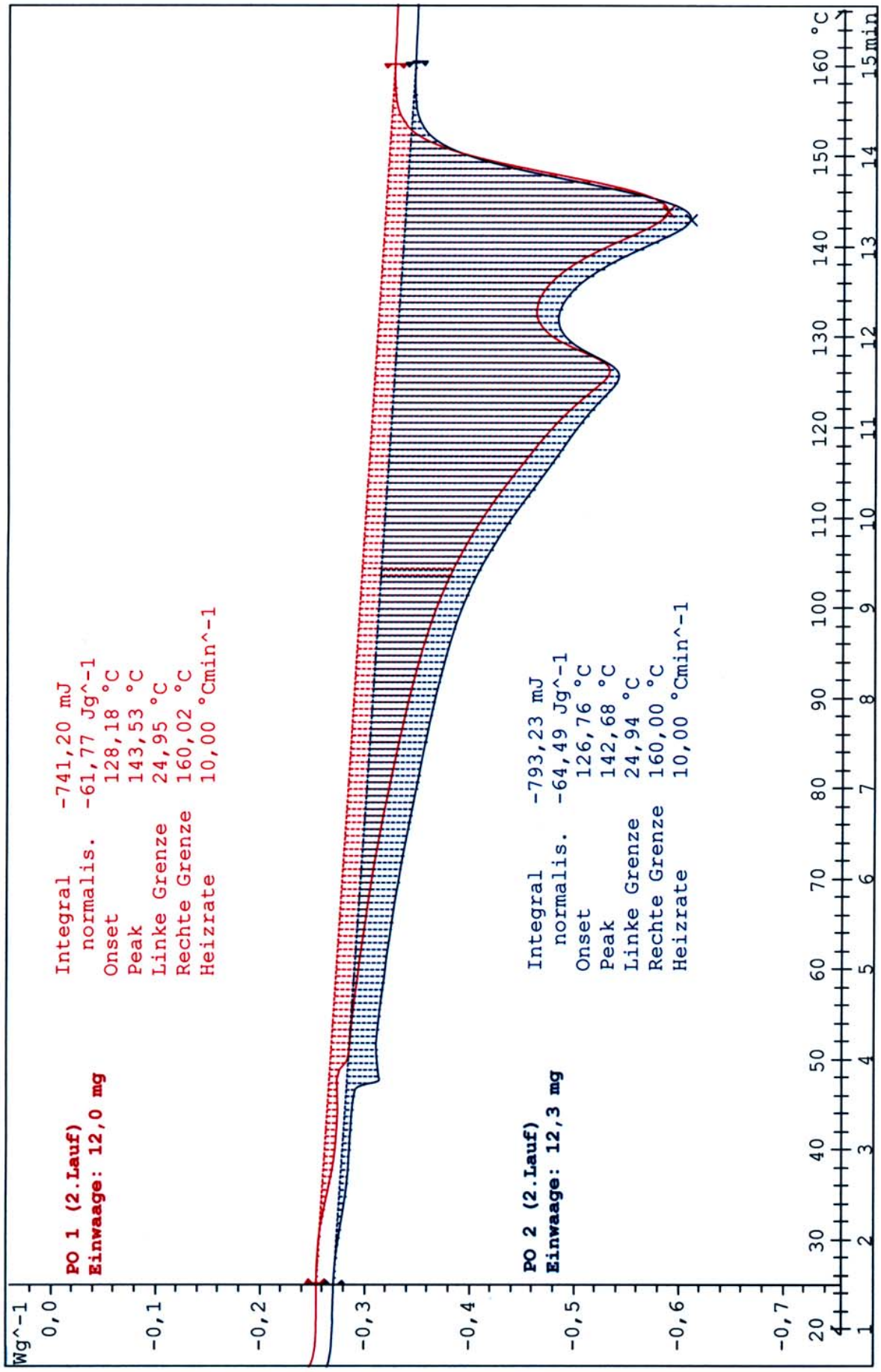
Anlage 8: DSC- Messkurve der Folie PVC 1



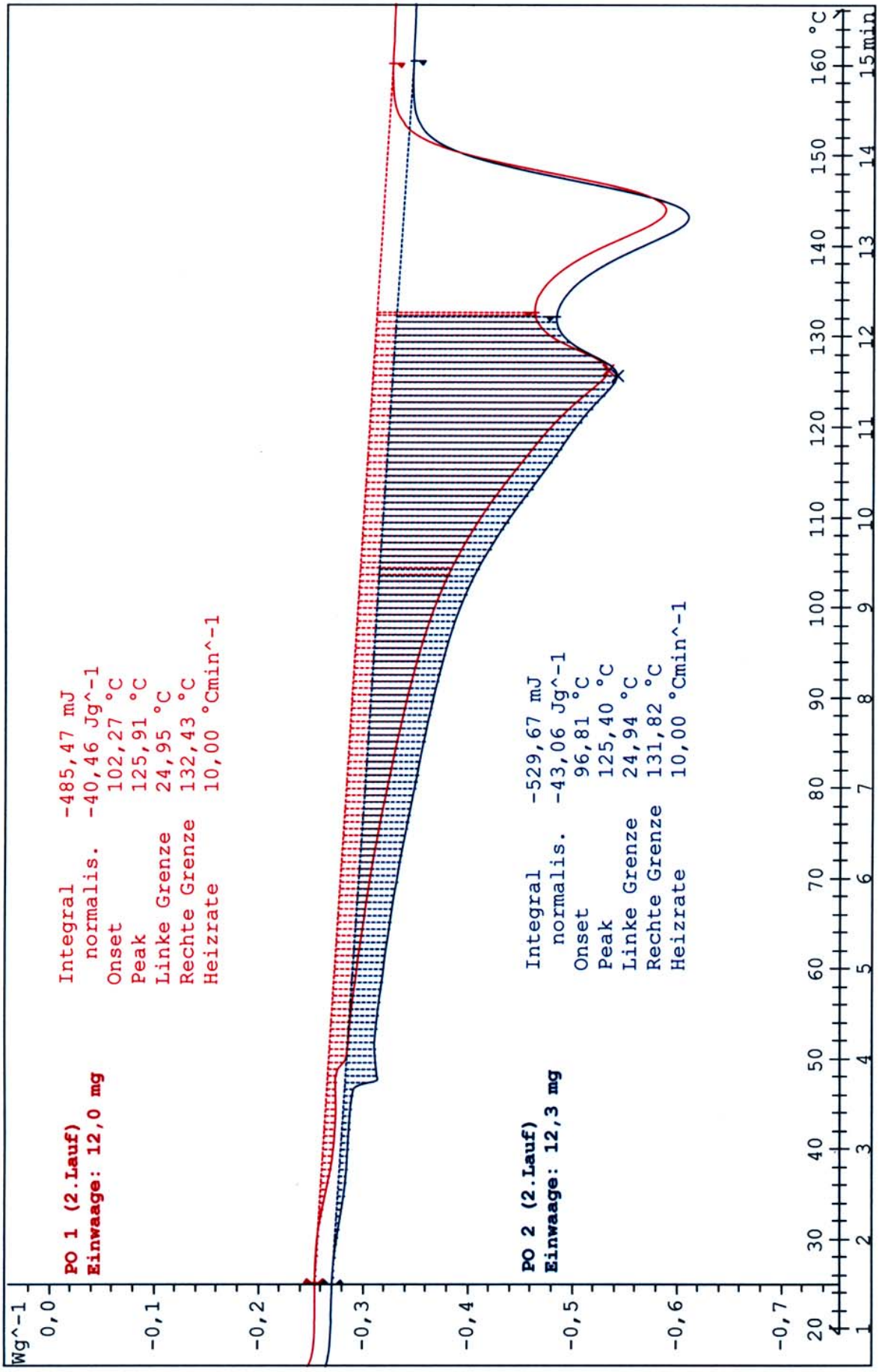
Anlage 9: DSC- Messkurve der Folie PVC 2



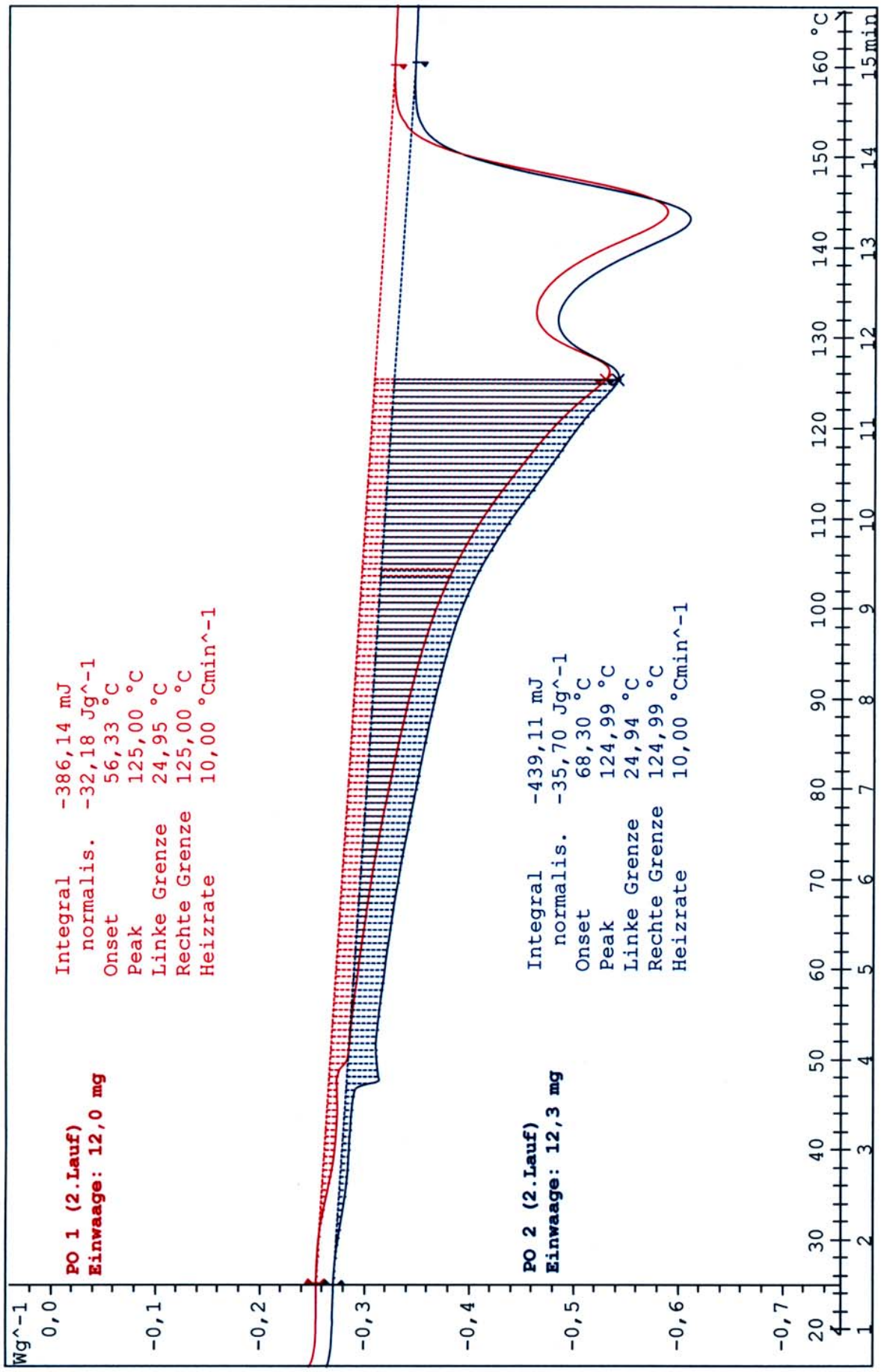
Anlage 10: DSC- Messkurve der PO- Folien (2.Lauf) von 25 – 160 °C



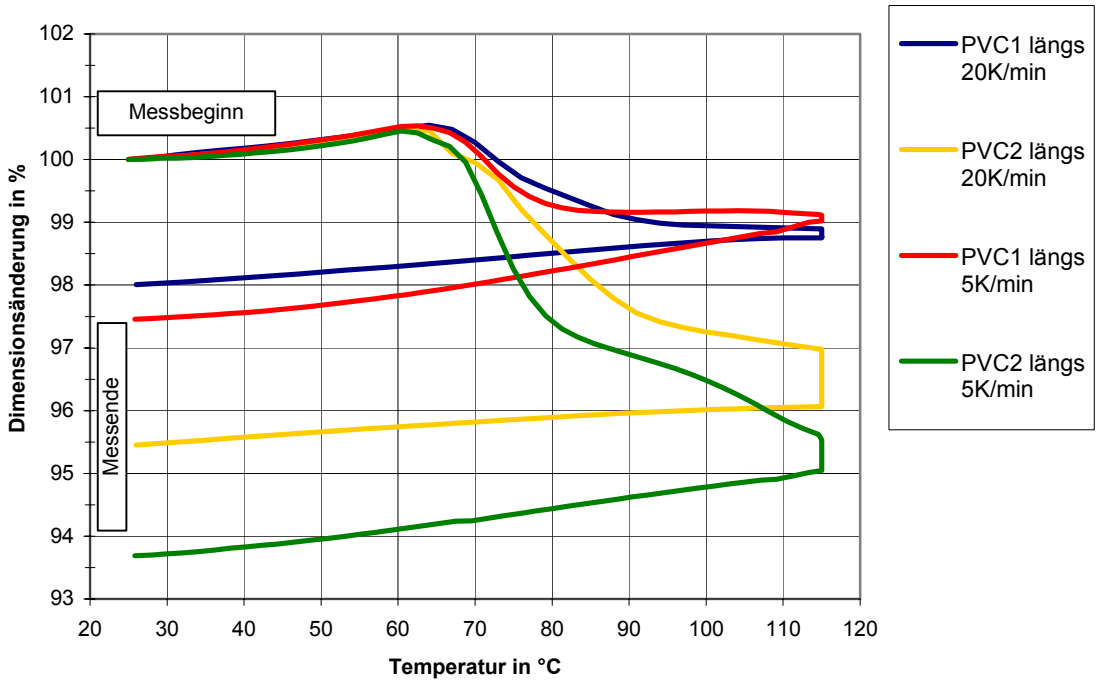
Anlage 11: Bestimmung des Verteilungsverhältnis von PE/PP

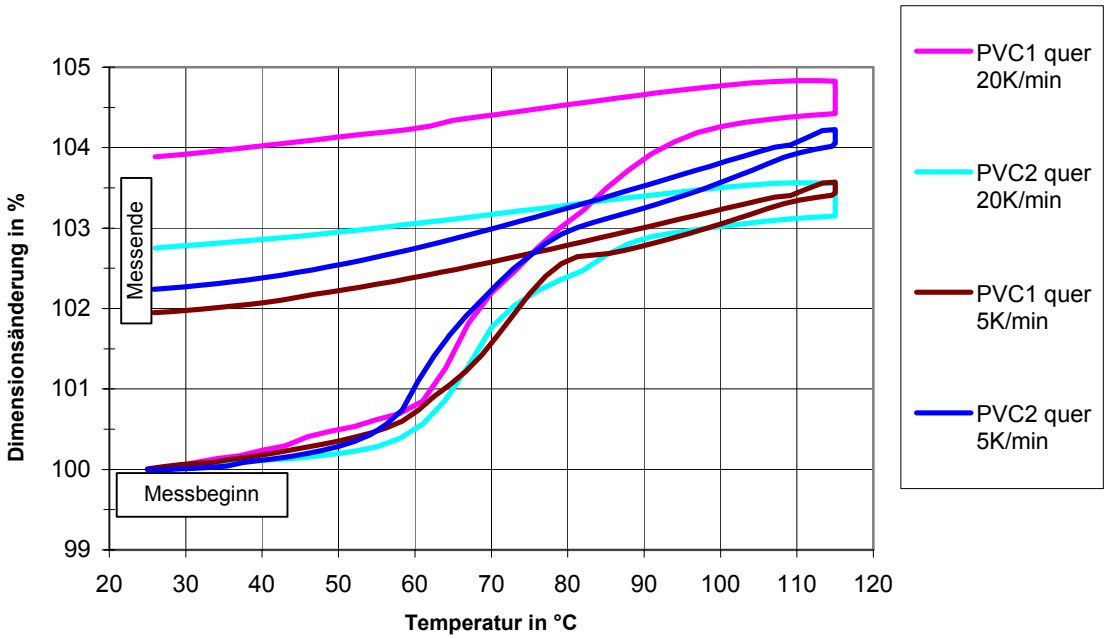


Anlage 12: Vergleich der Schmelzbereiche der PO-Folien bei 125 °C

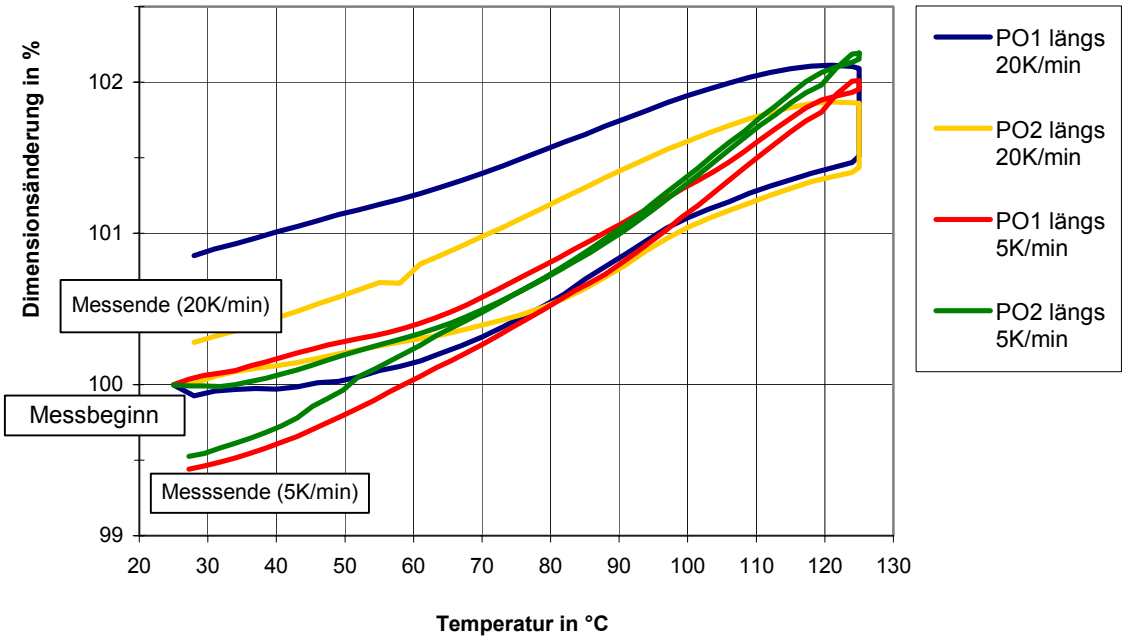


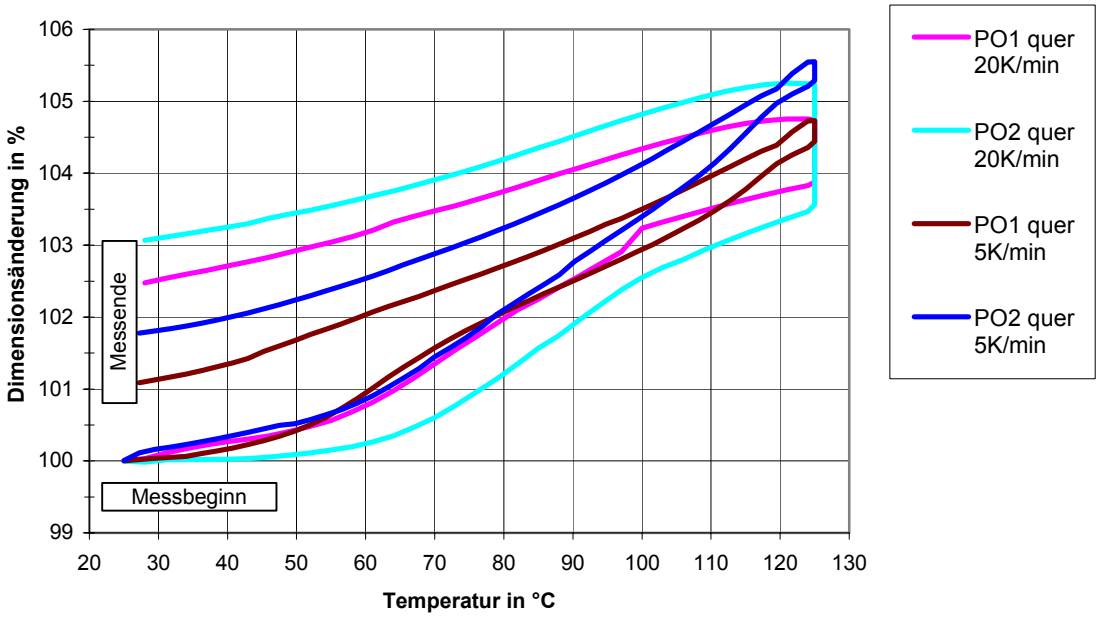
Anlage 13: Dimensionsänderung (längs und quer zur Herstellrichtung) der PVC- Folien in Anlehnung an Prozesstemperatur



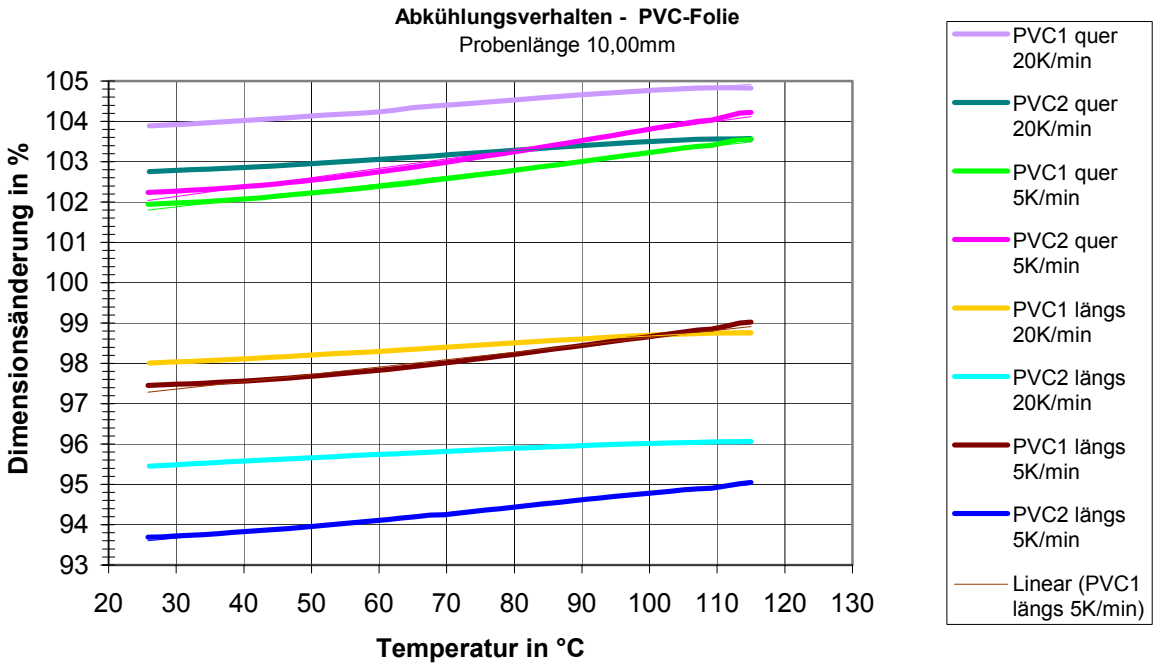


Anlage 14: Dimensionsänderung (längs und quer zur Herstellrichtung) der PO- Folien in Anlehnung an Prozesstemperatur



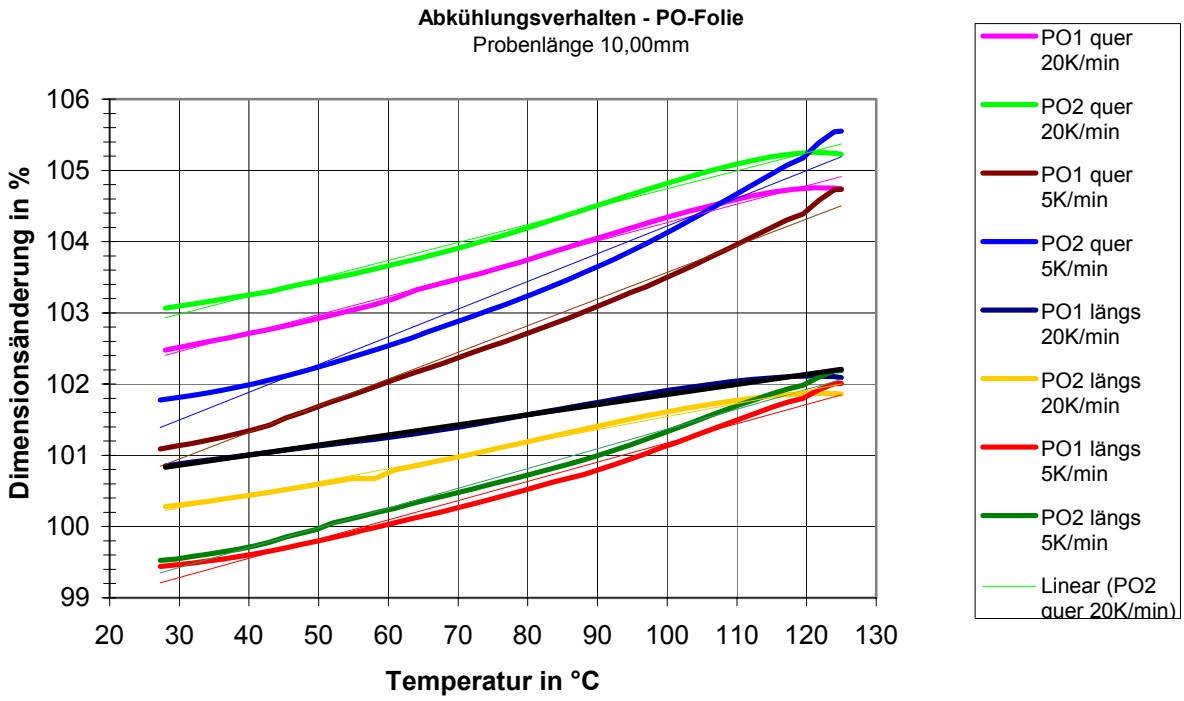


Anlage 15: TMA-Messkurven (Vergrößerung) bei Abkühlung der PVC-Folien



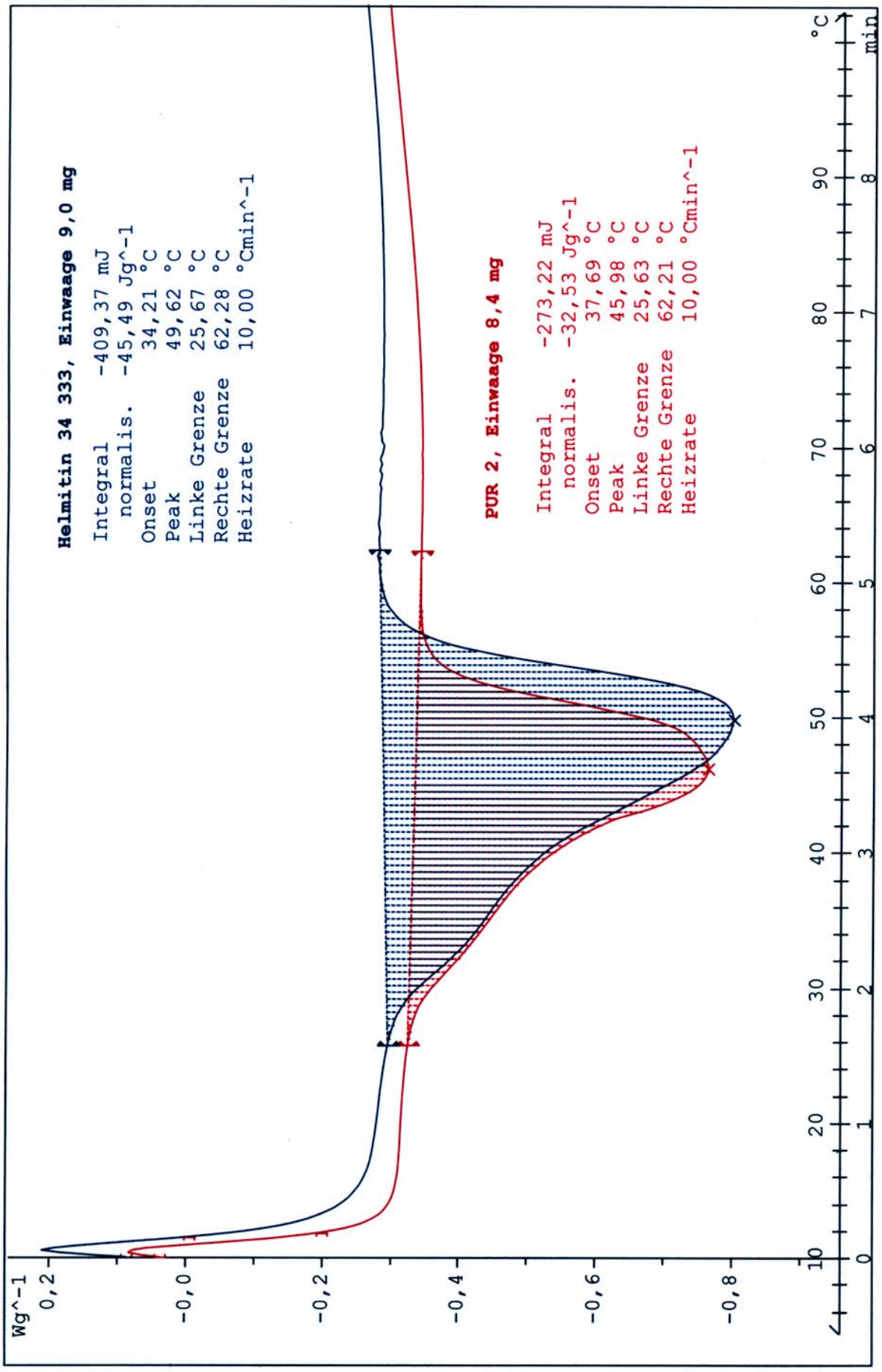
PVC1 quer 20 K/min	y=0,0118x+103,56	R^2=0,9907
PVC2 quer 20 K/min	y=0,0101x+102,47	R^2=0,9928
PVC1 quer 5 K/min	y=0,0189x+101,31	R^2=0,9882
PVC2 quer 5 K/min	y=0,0234x+101,43	R^2=0,9848
PVC1 längs 20 K/min	y=0,0092x+97,755	R^2=0,9941
PVC2 längs 20 K/min	y=0,0071x+95,302	R^2=0,9870
PVC1 längs 5 K/min	y=0,0182x+96,817	R^2=0,9803
PVC2 längs 5 K/min	y=0,0157x+93,196	R^2=0,9953

Anlage 16: TMA-Messkurven (Vergrößerung) bei Abkühlung der PO-Folien

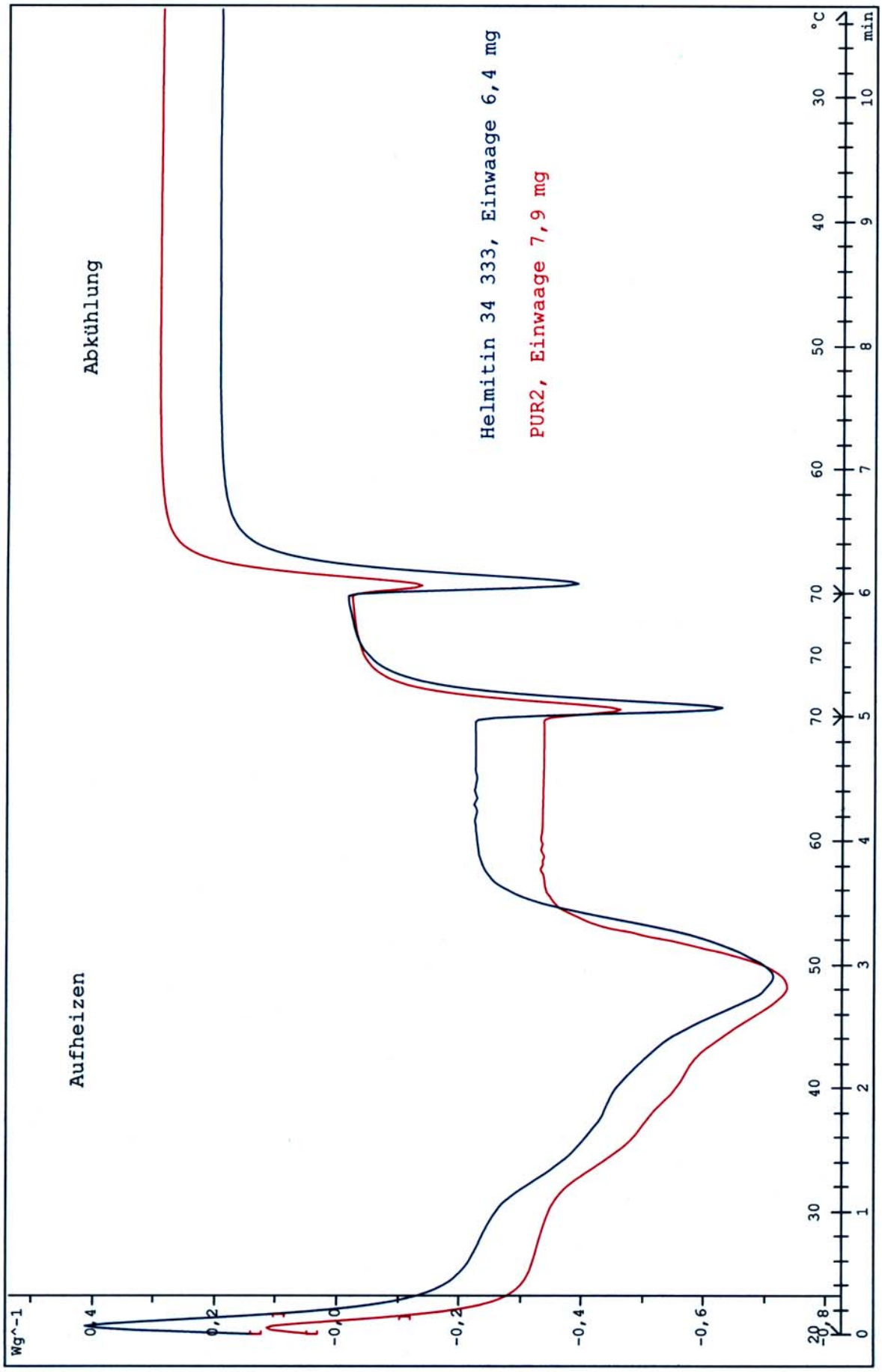


PO1 quer 20 K/min:	y=0,0258x+101,68	R^2=0,9941
PO2 quer 20 K/min:	y=0,0251x+102,23	R^2=0,9907
PO1 quer 5 K/min:	y=0,0374x+99,829	R^2=0,9913
PO2 quer 5 K/min:	y=0,0389x+100,33	R^2=0,9745
PO1 längs 20 K/min:	y=0,0142x+100,44	R^2=0,9911
PO2 längs 20 K/min:	y=0,0183x+99,715	R^2=0,9907
PO1 längs 5 K/min:	y=0,0270x+98,477	R^2=0,9842
PO1 längs 5 K/min:	y=0,0278x+98,593	R^2=0,9917

Anlage 17: DSC- Messkurve der Klebstoffe (Aufschmelzen)



Anlage 18: DSC- Messkurve der Klebstoffe (Aufschmelzen und Abkühlung)



Anlage 19: Messwerterfassung bei der ABES-Prüfung

Folie/Klebstoff	Klebfugen- tempe-ratur	Dauer der Klebfu-gentemp.	Kraft [N] ca. 2 s nach Verpressung	Kraft [N] ca. 40 s nach Verpressung
PVC/Helmitin	60	10	134,7	157,5
	60	20	126,9	153,5
	60	30	126,1	158,2
	65	10	110,4	141,8
	65	20	107,3	138,7
	65	30	105,7	150,4
	70	10		120,0
	70	20		111,6
	70	30		141,4
PVC/PUR2	60	10	126,1	153,6
	60	20	128,4	158,3
	60	30	115,9	142,7
	65	10	107,3	146,5
	65	20	104,9	141,0
	65	30	103,4	138,7
	70	10		116,7
	70	20		119,9
	70	30		120,6
PO/Helmitin	60	10	86,2	101,0
	60	20	81,5	98,2
	60	30	86,2	97,1
	65	10	72,8	95,6
	65	20	79,9	94,0
	65	30	71,3	95,6
	70	10		88,5
	70	20		90,9
	70	30		82,2
PO/PUR2	60	10	87,7	99,5
	60	20	90,1	97,1
	60	30	84,6	93,6
	65	10	76,8	99,5
	65	20	79,1	94,0
	65	30	78,3	92,4
	70	10		89,3
	70	20		88,5
	70	30		90,1

Ansprechpartner

ihd®
Institut für Holztechnologie
Dresden gGmbH

Institutsleitung

Dr. rer. nat. Margot Scheithauer
Tel. 0351/4662 227 · eMail: scheithauer@ihd-dresden.de

Ressort Biologie / Holzschutz

Dr.-rer. silv. Wolfram Scheiding
Tel. 0351/4662 280 · eMail: scheiding@ihd-dresden.de

Ressort Werkstoffe

Dipl.-Ing. Steffen Tobisch
Tel. 0351/4662 257 · eMail: tobisch@ihd-dresden.de

Ressort Bearbeitung / Gestaltung

Dr.-Ing. Ingrid Fuchs
Tel. 0351/4662 282 · eMail: fuchs@ihd-dresden.de

Ressort Umwelt / Chemie

Dipl.-Chem. Karsten Aehlig
Tel. 0351/4662 231 · eMail: aehlig@ihd-dresden.de

Ressort Werkstoff- und Produktqualität

Dr.-Ing. Bernd Devantier
Tel. 0351/4662 265 · eMail: devantier@ihd-dresden.de

Ressort Information / Dokumentation - Marketing

Dip.-Ing. Matthias Ewert
Tel. 0351/4662 301 · eMail: ewert@ihd-dresden.de

Zertifizierungsstelle des ihd

Dr. rer. silv. Siegfried Tzscherlich
Tel. 0351/4662 253 · eMail: zs-qms@ihd-dresden.de

Geschäftsführungsassistent

Dipl.-Phys. Manfred Henkel
Tel. 0351/4662 230 · eMail: henkel@ihd-dresden.de

eph®
Entwicklungs- und Prüflabor
Holztechnologie GmbH

Geschäftsführung eph

Dr.-Ing. Bernd Devantier
Tel. 0351/4662 265 · eMail: eph@ihd-dresden.de

ihd®
Institut für Holztechnologie
Dresden gGmbH

Zellescher Weg 24
D-01217 Dresden

Telefon +49 (0) 351/4662-0
Telefax +49 (0) 351/4662-211
eMail info@ihd-dresden.de

www.ihd-dresden.de

eph®
Entwicklungs- und Prüflabor
Holztechnologie GmbH

Zellescher Weg 24
D-01217 Dresden

Telefon +49 (0) 351/4662-0
Telefax +49 (0) 351/4662-211
eMail info@eph-dresden.de

www.eph-dresden.de