

Flachfolienextrusion. In einem Technologievergleich werden Folien, die auf einem konventionellen 3-Walzen-Glättwerk, im Wasserbad und unter Einsatz eines Glättbands abgekühlt wurden, gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass sowohl die mit Hilfe der Glättbandtechnologie als auch die im Wasser gekühlten Folien günstige mechanische Eigenschaften für das Thermoformen aufweisen.

Glättband – Abkühlprozess ist qualitätsbestimmend

ANDREAS LIMPER U.A.

Bei der Verarbeitung thermoplastischer Materialien üben die Abkühlprozesse einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Endprodukte aus. Das gilt besonders für die Herstellung von Flachfolien und Tafeln. Hier ist die Ausbildung von morphologischen Strukturen, wie z.B. der Kristallisationsgrad und Orientierungen, in hohem Maße durch den Temperaturverlauf in Abhängigkeit von Zeit und Ort während der Abkühlung vorgegeben. Die Auswirkungen anisotroper Materialstrukturen machen sich nicht nur direkt in der optischen und mechanischen Prüfung bemerkbar, sondern beeinflussen die Weiterverarbeitung z.B. beim Thermoformen nachhaltig.

Es werden die Technologien konventionelles 3-Walzen-Glättwerk (Bild 2), Glättband (Bild 3) und Wasserbad (Bild 4) miteinander verglichen. Hierzu wurden drei unterschiedliche Polypropylen-Typen (PP) verarbeitet (Homopolymere Moplen HP 540J, Moplen Adstif HA 748 C und das Randomcopolymer Clyrell 7173 XCP, Hersteller: Basell) und Materialproben hinsichtlich ihrer thermischen, mechanischen und optischen Eigenschaften bewertet. Ferner wurden die Abkühlprozesse bei der Glättwerk- und der Glättbandtechnologie gegenübergestellt.

Die Versuchs-Extrusionslinie der Berstorff GmbH (vormals KMB Seide Technology) bestand u. a. aus einem Einschneckenextruder mit genuteter Einzugszone. Die Barrierschnecke hatte einen Durchmesser von $D_S = 75$ mm und eine Länge von $L = 33 D_S$. Als Werkzeug kam eine Breitschlitzdüse mit einer Breite $B = 600$ mm zum Einsatz. Als Glättwerk wurde ein sog. Planetkalandar verwendet. Das

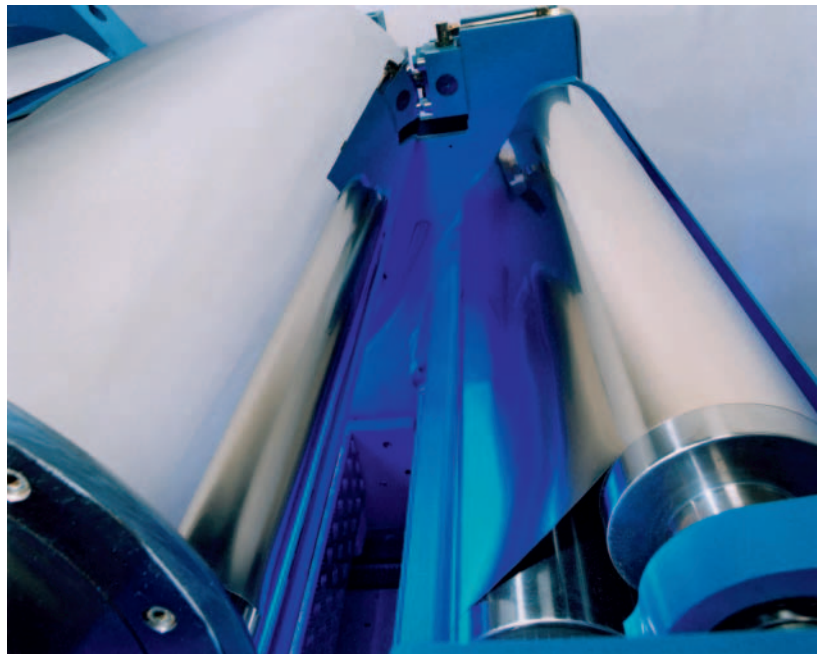


Bild 1. Abgeschwenkte Glättbandeinheit (mit Metallband und Umlenkwalzen, rechts) und Glättwerkwalze (links). Wird die Glättbandeinheit an die Glättwerkwalze gefahren, entsteht ein Glättspalt.

Glättband wurde als Zusatzkomponente auf den Maschinenführungsschienen direkt vor den Planetkalandar gesetzt (Bild 3). Eine Rollenbahn von 6 m Länge, ein Folienabzug und ein Wickler schlossen sich an.

Glättwerk

Die Aufgabe des Glättwerks (Bild 2) ist es, die plastifizierte und homogenisierte Schmelze aus dem Werkzeug abzuziehen, zu kalibrieren, zu glätten und abzukühlen. Die guten optischen Eigenschaften entstehen durch die Kräfte im Walzenspalt und durch die Übertragung der auf Hochglanz polierten Walzenoberfläche auf die Folie. Die Folienbahn ist jedoch in den meisten Fällen, durch die Abkühlverhältnisse bedingt, nur einseitig

glänzend. Es ergibt sich auf der Folienoberseite durch die sofort einsetzende Abkühlung und der langen Kontaktzeit zur mittleren Walze II eine glänzende Oberfläche. Durch die Abkühlung der Folienunterseite an der Umgebungsluft im Bereich der mittleren Walze II erhält diese Seite eine matte Oberfläche. Ein weiterer Nachteil entsteht durch die Linienglättung, diese führt bei Folien zu hohen Orientierungen, hohem Warmschrumpf und einer schlechten Planlage [1].

Glättwerk mit Glättband

Eine Zusatzkomponente des Glättwerks ist das Glättband (Bild 3). Es wird auf die Maschinenführungsschienen direkt vor das Glättwerk gesetzt. Mit dieser Fahr-

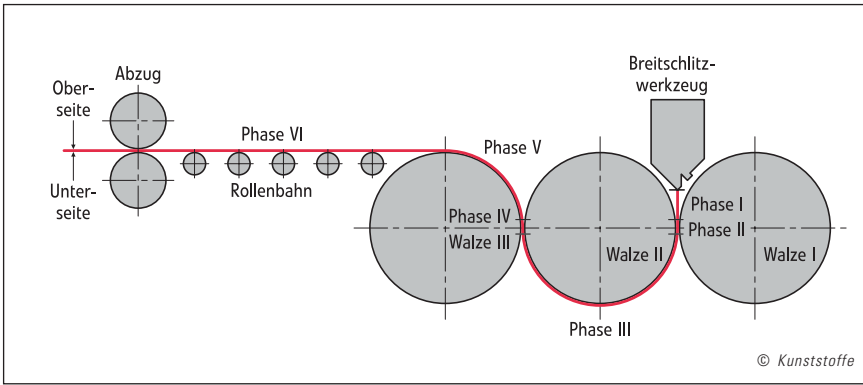


Bild 2. Folienextrusion mit einem Glättwerk in horizontaler Anordnung (Prinzipskizze)

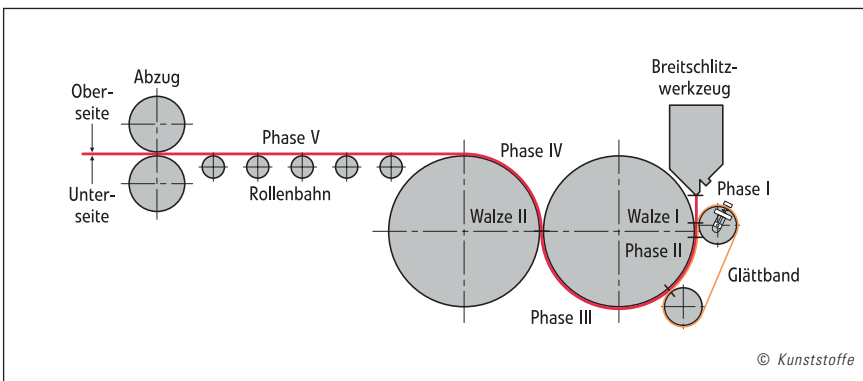


Bild 3. Folienextrusion mit einem Glättband (Prinzipskizze)

weise entsteht eine Einlaufposition der Schmelze zwischen Walze I und Glättband. Den Abschluss der Anlage bildet eine ca. 5 m lange Rollenbahn, der Folienabzug und ein Folienwickler.

Ein Vorteil des Glättbandes ist die definierte Abkühlung der beiden Folienseiten im Glättspalt der Kühlstrecke. Die Oberseite der Folie hat Kontakt zur Walze I und die Unterseite zum Glättband. Bei konventionellen Glättwerken (Bild 2) erfolgt die Abkühlung der Folienseiten im Bereich der Umschlingung der Walze II durch Konvektion und wird somit sehr stark von den Umgebungsbedingungen beeinflusst. Beim Glättband wird in diesem Bereich ein Temperaturprofil durch das Band und die erste Walze vorgegeben. Durch dieses Verfahren ist es, im Vergleich zum Glättwerk, möglich, dünnere Folien zu erzeugen, die gute optische Eigenschaften vorweisen.

Wasserbad

Die senkrecht aus dem Breitschlitzwerkzeug austretende Schmelze wird durch ein Kalibrierwerkzeug im Wasserbad, das zum Abkühlen der Schmelze dient, zu den Abzugswalzen geführt (Bild 4). Der große Vorteil dieses Verfahrens ist, dass durch den beidseitigen direkten Kontakt der Folie mit dem Kühlmittel eine gleichmäßige

Abkühlung erreicht wird. So werden annähernd identische mechanische Eigenschaften in Breiten- und Längsrichtung erzielt, so dass sich Wasserbadfolien hervorragend thermoformen lassen. Die Transparenz und der Glanz der Folie ist im Vergleich zu den Glättfolien schlechter.

Simulation des Folientemperaturverlaufs

Der Abkühlprozess übt einen entscheidenden Einfluss auf die Folieneigen-

schaften aus. Aus diesem Grund soll der Folientemperaturverlauf entlang der Kühlstrecke mit Hilfe der Finiten Differenzen Methode (FDM) [2, 3] berechnet werden. Hierbei erfolgt die Aufteilung der Kühlstrecke in unterschiedliche Phasen (Bilder 2 und 3), denen die Umgebungstemperaturen und die Wärmeübergangskoeffizienten in Form des Wärmeübergangskoeffizienten α [W/(m²K)] als Randbedingungen vorgegeben werden. Ferner erfolgt die Berücksichtigung temperaturabhängiger Materialparameter des Kunststoffes, wie der Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)], der Dichte ρ [kg/cm³] und der spezifischen Wärmekapazität c [J/(kgK)].

Um die Glättband- und Glättwerktechnologie bzgl. der Folienabkühlung gegenüberzustellen, soll der in Bild 5 gezeigte Glättband-Abkühlverlauf für den Betriebspunkt (70/50/38,42/124) bzw. Temperatur der Walze I [°C] / Glättband-Solltemperatur [°C] / Liniengeschwindigkeit [m/min] / Foliendicke [µm] mit einem äquivalenten in Bild 6 gezeigten Glättwerkprozess für den Betriebspunkt (93,3/70/70/38,42/124) bzw. Temperatur der Walze I [°C] / Temperatur der Walze II [°C] / Temperatur der Walze III [°C] / Liniengeschwindigkeit [m/min] / Foliendicke [µm] verglichen werden. Es erfolgt lediglich eine Analyse der ersten drei Kühlstrecken-Phasen, da hier der entscheidende Kristallisationstemperaturbereich durchschritten wird.

Das Extrudat unterschreitet beim Glättbandprozess in Bild 5 die Kristallisationstemperatur $T_K = 115^\circ\text{C}$ während der Phase II. An der Walzenseite geschieht dies nach einer Kühlstreckenlänge von $L_{TK-Walze} = 121$ mm. Die Foliennitte kühlt bei $L_{TK-Mitte} = 156$ mm auf T_K ab und die

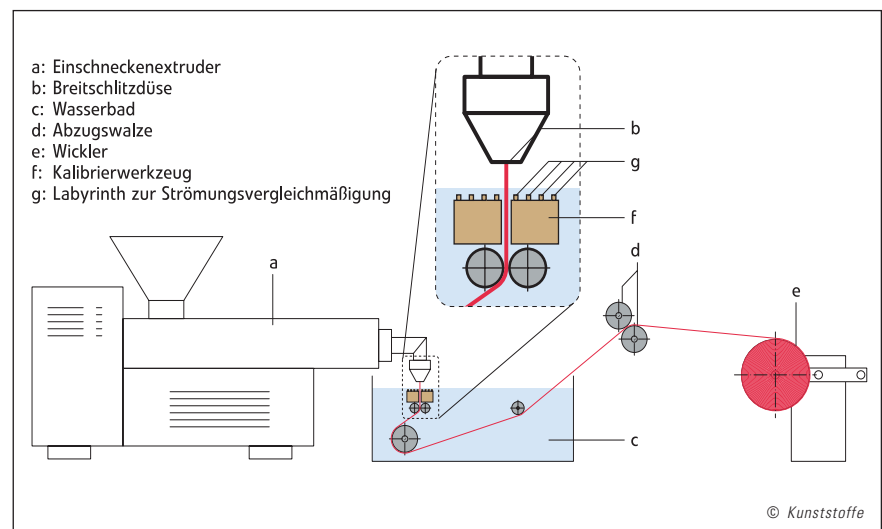


Bild 4. Wasserbad-Technologie (Prinzipskizze)

Bandseite nach $L_{TK-Band} = 142$ mm. Folglich wird T_K von der Walzenseite bis zur Folienmitte über einen Kühlstreckenabschnitt der Länge $L_{TK} = 35$ mm durchschritten. Am Ende der Phase II beträgt die Folientemperatur $T_{Folie-Walze-II} = 97,1^\circ C$, $T_{Folie-Mitte-II} = 103,6^\circ C$ und $T_{Folie-Band-II} = 104,7^\circ C$. Zu Beginn der Phase III steigt die Temperatur an der Walzenseite geringfügig auf $99,7^\circ C$ an. Dieser Sachverhalt lässt sich dadurch begründen, dass der Wärmeübergang zwischen der Walze und dem Extrudat aufgrund des fehlenden Spaltsdrucks und der bereits erkalten Folienoberfläche im Vergleich zum Glättspalt deutlich geringer ist. Nach der Umschlingung der Walze I kühlt die Folie auf $T_{Folie-Walze-III} = 78,9^\circ C$, $T_{Folie-Mitte-III} = 79,5^\circ C$ und $T_{Folie-Band-III} = 79,6^\circ C$ ab.

Bild 6 zeigt den Abkühlverlauf eines vergleichbaren Glättwerkprozesses. Im Glättspalt sinkt die Folientemperatur steil auf $T_{Folie-oben-II} = 129,8^\circ C$, $T_{Folie-Mitte-II} = 144,5^\circ C$ und $T_{Folie-unten-II} = 136,3^\circ C$ ab. Zu Beginn der Phase III steigt die Temperatur an der Oberseite auf $132,2^\circ C$ und an der Unterseite auf $140,6^\circ C$, weil die Folie im Inneren heißer als an den Oberflächen ist und zudem die Wärmeübergänge zwischen Extrudat und Walze bzw. Folie und Umgebungsluft geringer als im Walzenspalt sind. Die Folie unterschreitet die Kristallisationstemperatur T_K während der Phase III. An der Oberseite kühlt das Extrudat nach einer Kühlstreckenlänge von $L_{TK-oben} = 162$ mm auf T_K ab. Die Folienmitte erreicht T_K bei $L_{TK-Mitte} = 229$ mm und die Unterseite nach $L_{TK-unten} = 260$ mm. Im Vergleich zum Glättbandprozess wird T_K über die Foliendicke ungleichmäßiger und langsamer von der Oberseite bis zur Unterseite über einen Kühlstreckenabschnitt der Länge $L_{TK} = 98$ mm durchschritten. Für den Glättbandprozess betrug L_{TK} nur 35 mm. Die Folie kühlt bis zum Ende der Phase

Abkühlverlauf Glättband

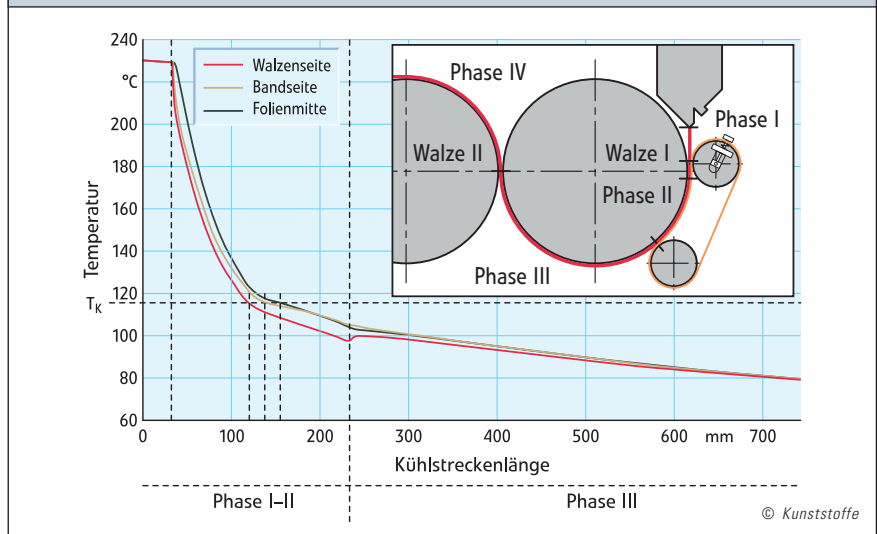


Bild 5. Simulation der Folientemperatur für den Glättbandprozess (70/50/38,42/124); Material 7173 XCP

Abkühlverlauf Glättwerk

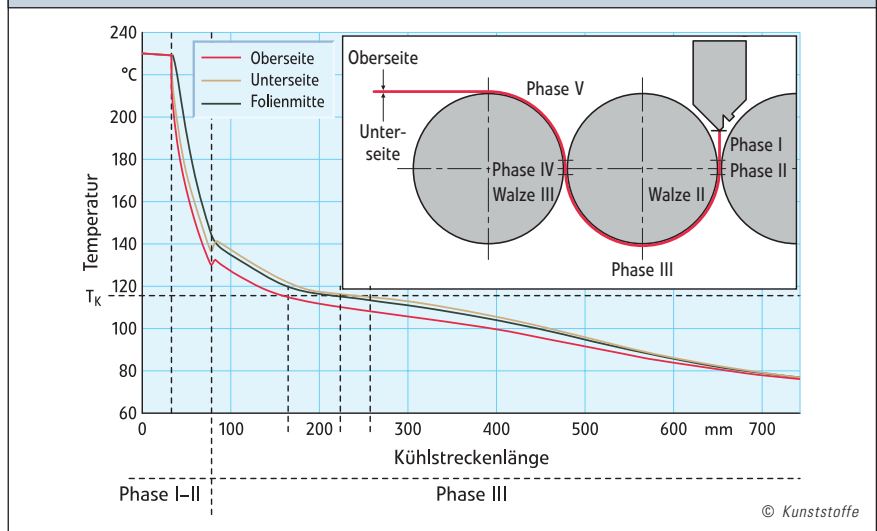


Bild 6. Simulation der Folientemperatur für den Glättwerkprozess (93/70/70/38,42/124); Material 7173 XCP

Morphologische Eigenschaften

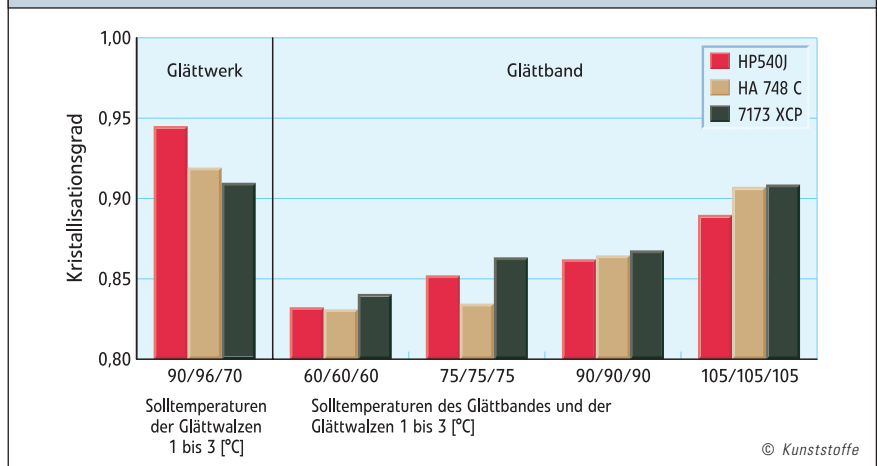


Bild 7. Kristallisationsgrad in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens und des Materials

III auf $T_{\text{Folie-oben-III}} = 76,3^\circ\text{C}$, $T_{\text{Folie-Mitte-III}} = 77,1^\circ\text{C}$ und $T_{\text{Folie-unten-III}} = 77,3^\circ\text{C}$ ab.

Analyse der Folieneigenschaften

Morphologie. Die Eigenschaft einer PP-Folie [4] wird maßgeblich durch den Kristallisationsgrad bestimmt. Mit der Differential-Scanning-Calorimetry (DSC) kann die zum Aufschmelzen einer Kunststoffprobe benötigte Energie ermittelt werden [5].

In Bild 7 ist für alle Versuchspunkte der erzielte Kristallisationsgrad dargestellt. Die Versuche mit dem Glättband zeigen, dass bei einer konstanten Kühlstrecke mit steigender Temperatur in den Walzen und im Glättband der Kristallisationsgrad zunimmt. Ein Vergleich der erreichten Kristallisationsgrade zeigt bei einer Tempe-

rierung von 90°C , dass die erzielten Werte der Glättwerkfolien höher sind. Die Schmelzefahne wird durch das Glättband schneller abgekühlt, so dass der Kunststoff weniger auskristallisieren kann.

Zugfestigkeit. Bild 8 gibt einen Überblick über die Kurvenverläufe der Zugproben für unterschiedliche Entnahmerichtungen und Herstellungsverfahren. Die ersten drei Kurven zeigen den Verlauf der Proben, die nach dem Glättwerkverfahren hergestellt wurden. Die Zugprobe längs zur Extrusionsrichtung hat die höchste Festigkeit. Diese hohe Zugfestigkeit entsteht durch die extreme Verstreckung des Kunststoffs im ersten Walzenspalt. Die zu erzielende Festigkeit quer und schräg zur Extrusionsrichtung beträgt dagegen fast nur die Hälfte. Die Festigkeit der Proben, die schräg zur Extrusionsrichtung entnommen wurden, ist

etwas höher als die der quer entnommenen. Bis zum Bruch des Prüfkörpers war bei der Glättwerkfolie so gut wie kein elastisches Verhalten zu erkennen. Da die Festigkeit von der Extrusionsrichtung abhängig ist, liegt hier die Ursachen für die erschwerte Thermoformbarkeit der Glättwerkfolie.

Die mittleren drei Kurven zeigen den Verlauf von Zugproben, die mit dem Glättband hergestellt wurden. Die Festigkeit der Probe, die längs zur Extrusionsrichtung entnommen wurde, besitzt nicht mehr die hohe Differenz zu den Proben, die quer und schräg entnommen wurden, so wie es im Fall der Glättwerkfolie war. Die Zugproben, die quer und schräg entnommen wurden, besitzen nahezu dieselbe Streckspannung. Bis zum Bruch der Probe war ein deutliches Einschnüren zu beobachten. Dieser Sachverhalt spricht für eine gute Thermoformbarkeit. Die letzten drei Kurven stellen den Verlauf der Zugproben für die Wasserbadfolie dar. Für alle Entnahmerichtungen ergeben sich identische Festigkeiten. Bis zum Bruch der Probe war ein deutliches elastisches Verhalten zu erkennen. In der gleichmäßigen Festigkeit in alle Richtungen liegt die Ursache der guten Thermoformigenschaften der Wasserbadfolie.

Durchstoßfestigkeit. Bei der Glättbandfolie ist in Bild 9 eine Zunahme der Durchstoßkraft mit ansteigender Walzen- und Glättbandtemperatur festzustellen. Durch den sich einstellenden höheren Kristallisationsgrad aufgrund der Temperierung der Kühlstrecke lässt sich eine höhere Durchstoßfestigkeit erreichen. Ein Vergleich der beiden Herstellungsverfahren zeigt, dass sich mit dem Glättbandverfahren je nach eingestellter Walzen- und Glättbandtemperatur eine wesentlich höhere Durchstoßfestigkeit erreichen lässt. Dieser Sachverhalt begründet sich dadurch, dass, wie die Zugversuche zeigen, die Glättbandfolie nahezu isotrope mechanische Eigenschaften aufweist.

Im Bild 10 sind die Fotos der Probekörper, die nach den verschiedenen Verfahren hergestellt wurden, nach der Durchstoßprüfung dargestellt. Das unterschiedliche Durchstoßverhalten der Folienproben ist hier deutlich zu erkennen. Die Glättwerkfolie zeigt einen ca. 35 mm langen Riss in Extrusionsrichtung ohne jegliches elastisches Verhalten. Das Rissbild zeigt noch einmal die Unterschiede der mechanischen Eigenschaften quer und längs zur Extrusionsrichtung. Die Glättbandfolie ist im Aufsetzbereich des Prüfkörpers durchstoßen und dann ca. 25 mm um den Aufsetz-

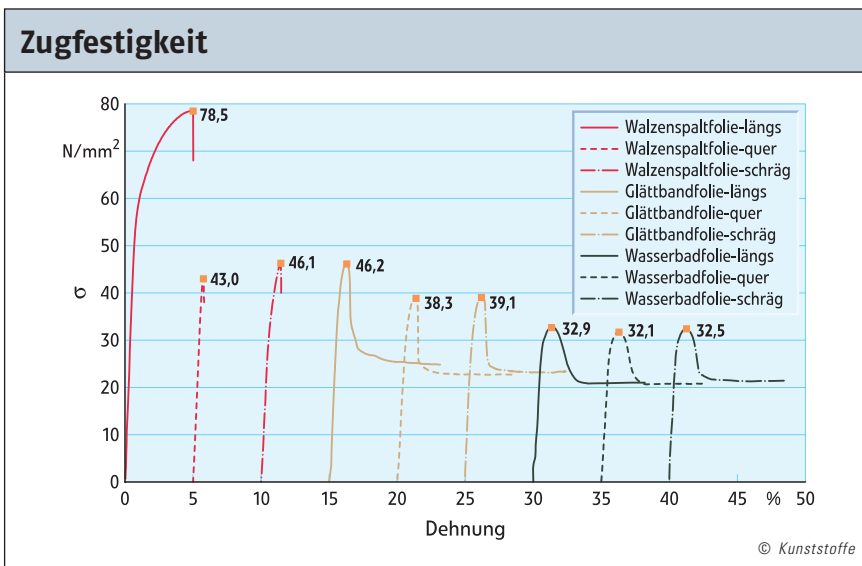


Bild 8. Spannungs-Dehnungs-Kurvenverläufe der Zugproben in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens

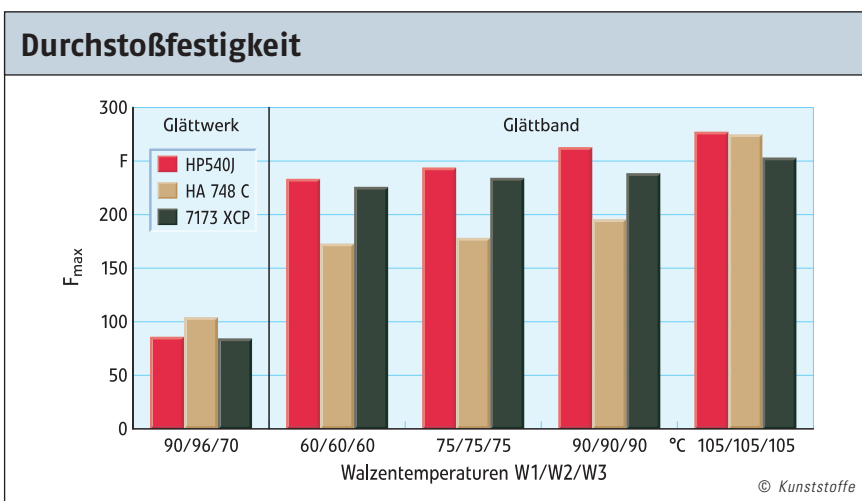


Bild 9. Durchstoßkraft in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens, der Walzentemperaturen und des Materials

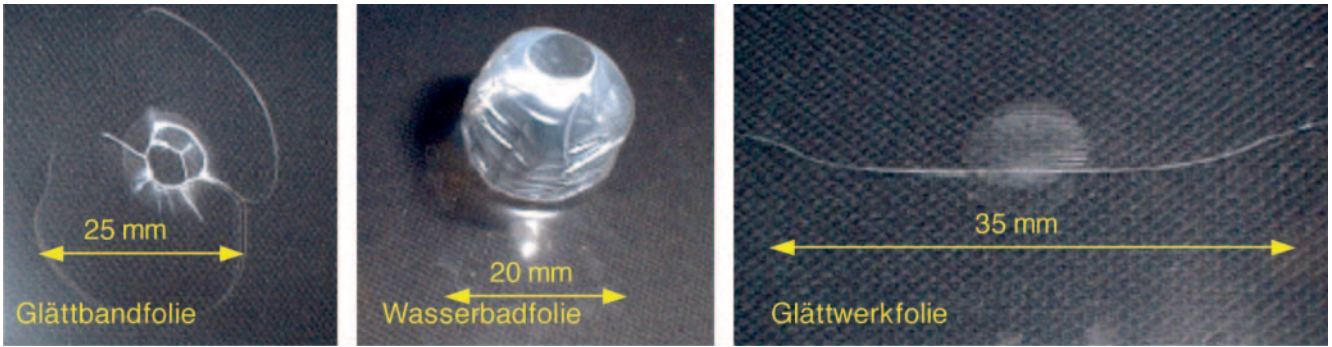


Bild 10. Proben nach der Durchstoßmessung

punkt des Prüfkörpers gebrochen. Die Wasserbadfolie schmiegt sich dagegen um den Prüfkörper und fließt in dessen Bewegungsrichtung, so dass ein „Fingerhut“ mit einem Durchmesser von 20 mm entsteht.

Glanz. Der Glanz einer Folie entsteht durch die richtige Temperatur der Walzen und durch die Kräfte im Walzen- bzw. Glättbandspalt. Man spricht auch vom „Glanz aufbügeln“.

In Bild 11 sind die Glanzmessungen dargestellt. Die Oberseite der Folie hat bei allen Versuchspunkten den höchsten Glanzwert. Die Ursache hierfür liegt in der Abkühlung durch die Walze II bei der Glättwerktechnologie bzw. durch die Walze I beim Glättbandverfahren. Die Unterseite der Folie wird in diesem Bereich bei der Glättwerktechnologie durch freie Konvektion an die Umgebung weiter abgekühlt und verliert den im ersten Walzenspalt erzeugten Glanz. Es wird deutlich, dass der erreichbare Glanzwert stark von der verarbeiteten PP-Type abhängig ist. Es ist klar zu erkennen, dass die Glättwerkfolie generell höhere Glanzwerte aufweist. Der Grund liegt in der höheren Oberflächenrauigkeit der Unterseite des Bandes im Vergleich zur glatten, polierten Walze.

Die Glanzeigenschaften der Folienprobenoberflächen wurden mit Hilfe eines Reflektometers ermittelt (Typ: Multi-Gloss 168, Hersteller: Minolta).

Transparenz. Ein Maß für die Transparenz ist der sog. Haze-Wert, der die Trübung der Folie angibt und mit einem Spektrophotometer gemessen wurde (Typ: CM-3600d, Hersteller: Minolta). Bild 12 zeigt die Ergebnisse der Spektrophotometer-Messungen. Es ist bei beiden Herstellungsverfahren deutlich zu erkennen, dass die Trübung stark vom Material abhängig ist. Ferner ist zu beobachten, dass mit steigender Walzentemperatur auch die Trübung zunimmt. Dies lässt sich durch die ausgeprägtere Kristallisation bei höheren Temperaturen begrün-

den. Die Glättwerkfolie weist geringere Haze-Werte bzw. eine ausgeprägtere Transparenz als die Glättbandfolie auf. Die Transparenz der Folie ist aber auch von der Oberflächenbeschaffenheit anhängig. So wird die Folie auch durch einen geringen Glanzwert getrübt, so dass die optischen Eigenschaften nicht völlig getrennt voneinander betrachtet werden können.

Fazit

Bezüglich der optischen Eigenschaften Glanz und Transparenz zeigt die Glättbandfolie bessere Ergebnisse als die Wasserbadfolie, aber aufgrund der Bandoberflächenrauigkeit ist sie schlechter als die Glättwerkfolie. Die optischen Eigenschaften der Glättbandfolien lassen sich mit Hilfe einer Steigerung der Bandober-

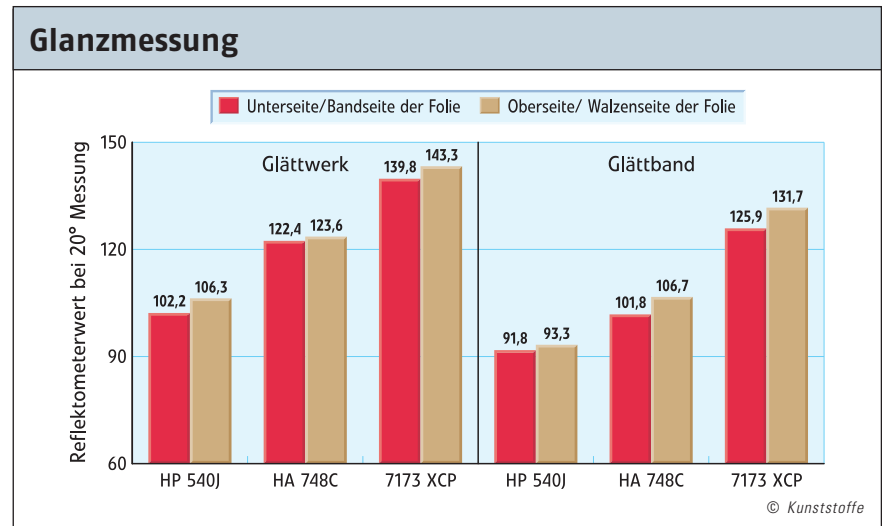


Bild 11. Reflektometerwert in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens und des Materials

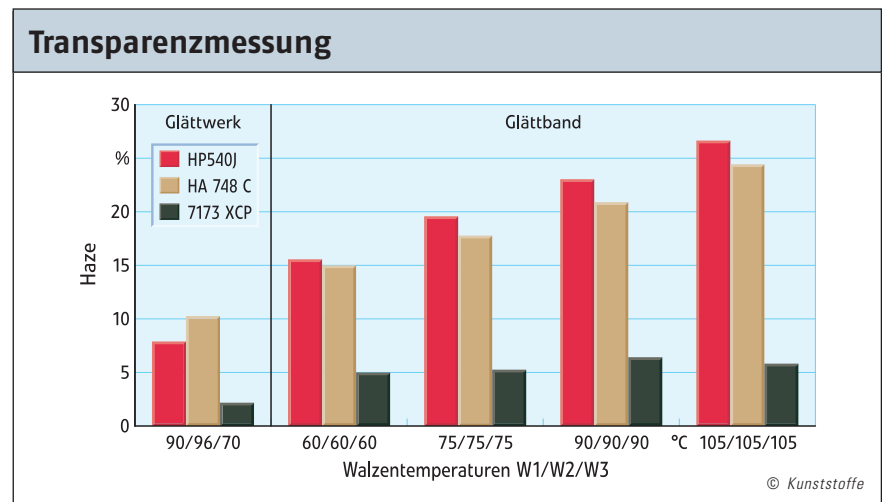


Bild 12. Haze-Wert in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens und des Materials

flächenqualität durch Verchromen und Polieren verbessern. Der große Vorteil der Glättbandtechnologie besteht darin, dass sich hiermit in allen Achsen annähernd gleiche mechanische Eigenschaften erzeugen lassen. Deshalb eignet sich die Glättbandfolie hervorragend zum Thermoformen. Dieser Sachverhalt resultiert aus der im Vergleich zum Glättwerkprozess symmetrischeren und schnelleren Abkühlung des Extrudats. ■

DANK

Die hier dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über den Projektträger (PT-DLR) im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) finanziell geförderten Projekts erarbeitet.

Im Zuge dieses Projekts erfolgte im Technikum der Fa. Berstorff (vormals KMB-Seide Technology) die Durchführung von Extrusionsversuchsreihen mit der Glättband- und Glättwerktechnologie, die von den Projektpartnern AVI GmbH Kunststoffverpackungen und Etimex Primary Packaging GmbH unterstützt wurden.

LITERATUR

- 1 Miethlinger, J.: Exklusive Produkte hochwertig verpackt. In: *Plastverarbeiter* 53 (2002) 4, S. 32–33
- 2 Binder, L.: Über äußere Wärmeleitung und Erwärmung elektrischer Maschinen. Dissertation TH München 1910
- 3 Schmidt, E.: Das Differenzenverfahren zur Lösung von Differentialgleichungen der nicht-stationären Wärmeleitung. *Forsch.-Ing.-Wes.* 13 (1942), S. 177
- 4 Düchting, R.: Untersuchungen über die sich einstellenden Eigenschaften von Flachfolien beim konventionellen Glättwalzenverfahren und eines neuen innovativen Kalibrier- und Kühlsystems unter Berücksichtigung der Prozessparameter. Unveröffentlichte Diplomarbeit Universität Paderborn 2003
- 5 Mathot, V.: *Calorimetry and Thermal Analysis of Polymers*. Hanser Publishers München, Wien, New York 1994

DIE AUTOREN

PROF. DR.-ING. ANDREAS LIMPER, geb. 1956, ist seit 1995 Professor an der Universität Paderborn am Institut für Kunststofftechnik (KTP); limper@ktp.upb.de

DIPL.-WIRT. ING. CARL-JÜRGEN WEFELMEIER, geb. 1969, war von 2001 bis 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststofftechnik (KTP). Seit 2006 ist er im Bereich Verfahrenstechnik Folienextrusion bei der Fa. Berstorff GmbH tätig; WefelmeierC@Berstorff.de

DIPL.-ING. ADOLF SEIDE ist Leiter der Entwicklung und Konstruktion der Fa. Berstorff GmbH am Standort Buchholz; SeideA@Berstorff.de

DIPL.-ING. STEFAN SEIBEL, geb. 1968, war von 1999 bis 2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststofftechnik (KTP).

SUMMARY KUNSTSTOFFE INTERNATIONAL

Calendering Belt – The Cooling Process as a Quality Factor

FLAT FILM EXTRUSION. In the framework of a technology comparison, films cooled on a conventional three-roll polishing stack, in a water bath and with the aid of a calendering belt are all compared with each other. It is seen that both the film cooled with the aid of the calendering belt technology and the water-cooled film display favourable mechanical properties for thermoforming.

NOTE: You can read the complete article by entering the document number PE103529 on our website at www.kunststoffe-international.com