

eingereicht/handed in: 05.11.2018
angenommen/accepted: 20.12.2018

Jakob Onken, Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen

Untersuchung der prozess- und geometrieabhängigen Zug- und Schubfestigkeit von Bindenähten in Polystyrol

Um die Entstehung von Bindenähten und die daraus hervorgerufene Verringerung der Bauteilfestigkeit zu verstehen, wurden Einflussfaktoren wie Prozessparameter und Bauteilgeometrie auf die Morphologie sowie die Zug- und Schubfestigkeit von Bindenähten in Polystyrol quantifiziert. In den Untersuchungen konnte ein Einfluss von Schmelztemperatur, Nachdruckhöhe sowie Fließhindernisgeometrie und Abstand zum Fließhindernis auf die Zugfestigkeit von Bindenähten festgestellt werden. Entgegen der Literatur wurde eine hohe Festigkeit direkt hinter dem Fließhindernis festgestellt. Des Weiteren konnte die Ausbildung einer schwächeren Randschicht beobachtet werden. Ein Einfluss der variierten Parameter auf die Schubfestigkeit wurde nicht festgestellt.

Investigation of the process and geometry dependent tensile and shear strength of weld lines in polystyrene

In order to understand the formation of weld lines and the resulting reduction of the part's tensile strength, influencing factors such as process parameters and part geometry on the morphology and tensile as well as shear strength of weld lines in polystyrene were quantified. In the investigations an influence of melt temperature, holding pressure height as well as flow obstacle geometry and distance to the flow barrier on the tensile strength of weld lines could be determined. Contrary to the literature, a high strength was found directly behind the flow obstacle. Furthermore, the formation of a weak boundary layer could be observed. An influence of the varied parameters on the shear strength was not found.

Untersuchung der prozess- und geometrieabhängigen Zug- und Schubfestigkeit von Bindenähten in Polystyrol

J. Onken, Ch. Hopmann

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Im Spritzgießprozess ist die Entstehung von Bindenähten im Formteil meist unvermeidbar. Dabei führen Bindenähte zu optischen Defekten und einer Schwächung des Bauteils. Um die mechanischen Eigenschaften von Bindenähten vorhersagen zu können, muss zunächst die Entstehung von Bindenähten und die daraus entstehende Verringerung der Bauteilfestigkeit verstanden werden. Daher sollen Einflussfaktoren wie Prozessparameter und Bauteilgeometrie auf Morphologie sowie die Zug- und Schubfestigkeit von Bindenähten in Polystyrol im Folgenden quantifiziert werden.

2 BINDENÄHTE IN SPRITZGIESSBAUTEILEN

Bei Bindenähten wird zwischen stagnierenden und fließenden Bindenähten unterschieden. Stagnierende Bindenähte entstehen beim frontalen Aufeinandertreffen und der anschließenden Stagnation der Fließfront in der Bindeaht. Fließende Bindenähte entstehen, wenn die Fließfronten in einem spitzen Winkel aufeinandertreffen und anschließend weiterfließen [1]. Die Ursache für die optischen Defekte und die Festigkeitsminderung eines Bauteils in der Bindeaht werden in der Literatur in drei Teilursachen gegliedert: Mangelnde Interdiffusion der Polymerketten durch die Grenzschicht in der Bindeaht, hohe molekulare Orientierungen in der Bindeaht und die Bildung einer V-förmigen Nut in der Bindeaht [1-4].

Die niedrige Festigkeit kann durch molekulare Interdiffusion über die Grenzschicht zwischen den aufeinandergetroffenen Fließfronten prinzipiell ausheilen [5,6]. Die Interdiffusion ist jedoch stark temperatur- und zeitabhängig und unterhalb der Glasübergangstemperatur vernachlässigbar gering [7,8]. Zusätzlich wird durch die beim Spritzgießen üblichen hohen Kühlraten von zum Teil mehreren 100 K/min die Ausheilung stark erschwert.

Die hohe molekulare Orientierung in der Bindeaht wird vor allem durch eine Quellströmung hervorgerufen. Durch diese werden die Polymerketten senkrecht zur Fließrichtung orientiert [9]. Beim Aufeinandertreffen von Fließfronten mit anschließender Abkühlung der Schmelze werden diese Orientierungen eingefroren und verursachen ein anisotropes Materialverhalten in der Bindeaht [1].

Die Bildung einer V-förmigen Nut, welche aufgrund ihrer Kerbwirkung unter Belastung zu einer Spannungskonzentration in der Bindenaht führt, wird in der Literatur mehrmals beschrieben [10,11]. Die Ursache für die Entstehung dieser V-Nut ist derzeit noch nicht vollständig geklärt [12-14]. Mögliche Ursachen sind Lufteinschlüsse [2,14,15] oder eine lokal höhere Volumenschwindung in Richtung der molekularen Orientierungen [3,16]. Besonders spröde Thermoplaste wie z. B. Polymethylmethacrylat, Styrol-Acrylnitril oder Polystyrol zeigen eine starke Abhängigkeit der Bindenahtfestigkeit von der V-Nutmorphologie [13,15].

Eine weitere Interpretation der V-Nut wurde von *Tomari et al.* aufgestellt. Durch schichtweises spanendes Abtragen des Materials von Proben mit Bindenaht wurde in [17] ermittelt, ab welcher Tiefe die Probekörper keinen Einfluss der Bindenaht mehr auf die Probekörperfestigkeit zeigten. Diese Tiefe wurde dann als V-Nuttiefe definiert. In den Untersuchungen wurden somit Bereiche abgetragen, in denen nur unzureichende Interdiffusion stattgefunden hat und die im Falle einer Belastung frühzeitig brechen und somit den effektiven Querschnitt des Probekörpers verringern, was zu einem schnelleren Versagen des gesamten Probekörpers führt.

2.1 Mechanische Eigenschaften von Bindenähten

Spritzgießbauteile werden meist auf Zug, Druck und Schub beansprucht. Um das Verhalten von Bauteilen mit Bindenähten vorherzusagen, ist die Bestimmung der Zug- und Schubfestigkeit und der Einflüsse von Prozess- und Bauteilgeometrie auf diese unumgänglich. Dazu findet sich in der Literatur bereits eine Reihe von Untersuchungen. Zur Beschreibung der Bindenahtfestigkeit wird dabei häufig der sogenannte Bindenahtfaktor verwendet, welcher als das Verhältnis der Bindenahtfestigkeit zur Zugfestigkeit des Materials ohne Bindenaht definiert ist [18].

2.2 Das Verhalten von Bindenähten unter Zugbeanspruchung

Als Haupteinflussfaktoren des Spritzgießprozesses auf die Bindenahtfestigkeit von amorphen Thermoplasten werden in der Literatur die Schmelztemperatur und die Nachdruckhöhe genannt. Bei beiden geht mit einer Erhöhung des Parameters auch eine Erhöhung der Bindenahtfestigkeit einher [13, 19-21]. So kann allein durch eine Variation der Schmelztemperatur zwischen 210°C und 290°C ein Bindenahtfaktor z. B. bei Polystyrol von 0,55 bis 0,72 erzeugt werden [13].

Widersprüchliche Aussagen finden sich zum Einfluss der Werkzeugwandtemperatur, der Einspritzgeschwindigkeit und des Einspritzdrucks [3, 19, 22-24]. Dabei wird teils von positiven, negativen oder keinem Einfluss auf die Bindenaht berichtet.

Die Nachdruckzeit hat, ebenso wie die Kühlzeit, nur einen geringen Einfluss auf die Bindenahtfestigkeit [21,22]. Der geringe Einfluss von Nachdruckzeit und Kühlzeit erklärt sich dadurch, dass Interdiffusions- und Ausheilungsvorgänge in der Bindenaht nur stattfinden, solange die Temperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur liegt.

Neben den Prozessparametern wird die Bindenahtfestigkeit auch von der Geometrie des sie hervorrufenden Fließhindernisses bzw. vom Zusammenfließwinkel und dem Weiterfließen der Schmelzefronten beeinflusst [1]. Stagnierende Bindenähte weisen deutlich geringere Festigkeiten auf als fließende Bindenähte. Beispielsweise wurden für stagnierende Bindenähte bei Polystyrol (PS) Abminderungsfaktoren von 0,5, also 50 % der Festigkeit des Materials ohne Bindenaht, im Vergleich zu 0,75 bei fließenden Bindenähten festgestellt [1].

Bei fließenden Bindenähten wurde weiterhin der Effekt beobachtet, dass die Bindenähte mit steigendem Abstand zum Fließhindernis eine steigende Festigkeit aufweisen. Bei PS wurde beispielsweise ab einem Zusammenfließwinkel von weniger als 140° eine deutliche Steigerung der Festigkeit im Vergleich zu stagnierenden Bindenähten beobachtet [12]. Allerdings führen die beschriebenen Ausheilungsprozesse in der Praxis meist nur zu einer Verbesserung der Festigkeit und nicht zu einer vollständigen Ausheilung der Bindenaht.

2.3 Das Verhalten von Bindenähten unter Schubbeanspruchung

In den beschriebenen Untersuchungen werden ausschließlich die Zug- und Biegefestigkeiten von Probekörpern untersucht. Zur Schubfestigkeit lassen sich derzeit kaum Untersuchungen finden. Gründe hierfür können die im Vergleich zu Zugversuchen aufwendigeren Messmethoden oder die fehlende Standardisierung von Schubmessungen im Bereich der unverstärkten thermoplastischen Kunststoffe sein.

Eins der wenigen Dokumente, das sich mit dem mechanischen Verhalten von Bindenähten unter Schub auseinandersetzt, wurde von *Sun et al.* veröffentlicht [25]. Darin wird berichtet, dass das Deformationsverhalten der verwendeten Schubproben nicht von eingebrachten Bindenähten beeinflusst wird. Allerdings sinkt die maximale Schubverzerrung der Proben, wenn diese längs zur Bindenaht gesichert werden, mit einer steigenden Breite eines Fließhindernisses. Dabei ist jedoch kein Einfluss des Abstands der Probe zum Fließhindernis festzustellen.

Somit ist derzeit nicht bekannt, ob und in welchem Maße die Bindenahtfestigkeit unter Schubbeanspruchung von Prozessparametern und Fließhindernisgeometrie abhängig ist.

3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

3.1 Material und Herstellung der Probekörper

Um den Einfluss von Prozessparametern und Fließhindernisgeometrie auf die Entstehung und die mechanischen Eigenschaften von Bindenähten zu untersuchen, werden die in Bild 1 dargestellten Platten unter Variation der Prozessparameter hergestellt. Als Material für die Platten wird Polystyrol (PS) vom Typ PS 124N/L30 der Firma Ineos Styrolution Group GmbH, Frankfurt am Main, verwendet. Die Herstellung der Platten erfolgt auf einer Spritzgießmaschine vom Typ DEMAG Ergotech 80/420-310 der Firma Sumitomo (SHI) Demag Plastics Machinery GmbH.

Die Platten haben eine Dicke von 2 mm, eine Höhe von 125 mm, eine Breite von 114 mm und werden über einen Stangenanguss gefüllt. Das Werkzeug verfügt über Wechseleinsätze, mit denen Platten mit einem rechteckigen Fließhindernis mit den Abmaßen 20 x 40 mm² und mit einem kreisförmigen Fließhindernis mit einem Durchmesser von 20 mm hergestellt werden können. Darüber hinaus werden für jeden Versuchspunkt Referenzplatten ohne Fließhindernis hergestellt. Die verwendeten Spritzgießmaschineneinstellungen sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 gezeigt. Bei den Untersuchungen wurden Massetemperatur und Nachdruck variiert, da diese in vorangegangenen Untersuchungen den größten Einfluss auf die Bindenahtfestigkeit zeigten [26]. Eine höhere Masse-temperatur führt dabei zu einer höheren Temperatur der Fließfront bzw. der Schmelztemperatur bei der Entstehung der Bindenaht, ein höherer Nachdruck führt zu einem höheren Werkzeuginnendruck während der Abkühlung bzw. Ausheilung der Bindenaht.

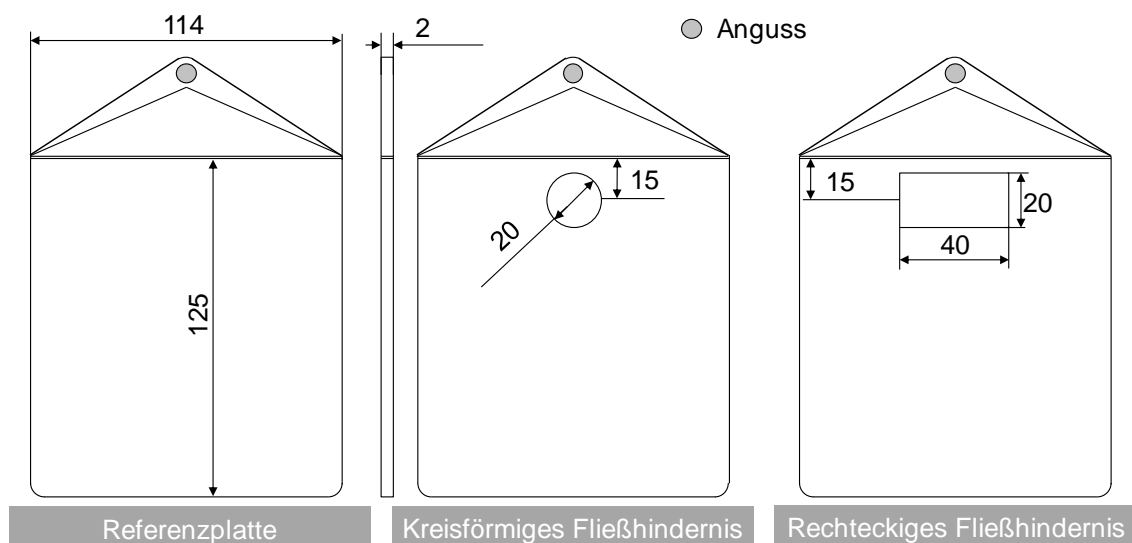


Bild 1: Plattengeometrien zur Untersuchung der Bindenahtfestigkeit

| Parameter | Wert |
|--|------|
| Einspritzvolumenstrom [cm ³ /s] | 50 |
| Nachdruckzeit [s] | 7 |
| Kühlzeit [s] | 35 |
| Werkzeugtemperatur [C°] | 80 |

Tabelle 1: Konstante Spritzgießmaschinenereinstellungen

| Parameter | Stufe | | |
|----------------------|-------|-----|-----|
| | + | 0 | - |
| Massetemperatur [°C] | 240 | 230 | 220 |
| Nachdruck [bar] | 440 | 410 | 380 |

Tabelle 2: Variierte Spritzgießmaschinenereinstellungen

Für die Zugversuche werden aus den Platten Probekörper vom Typ 1BA nach DIN EN ISO 527-1 in einem Abstand von 5 mm, 25 mm und 45 mm vom Fließhindernis spanend entnommen (Bild 2, links) [26].

Für die Schubversuche werden Probekörper in Anlehnung an ASTM D 7078 (Bild 3) spanend aus den Platten entnommen (Bild 2, rechts) [27].

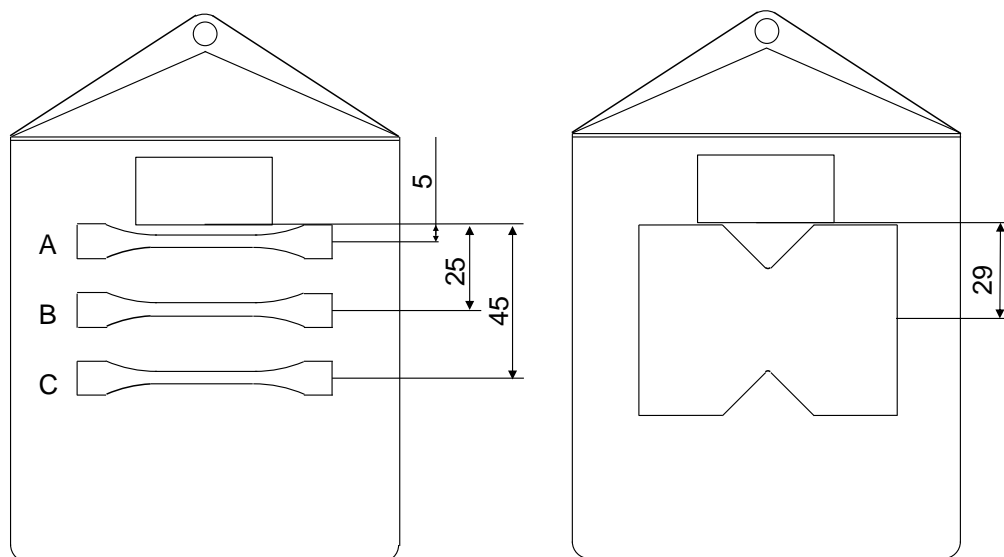


Bild 2: Entnahmeort der Zug- und Schubproben

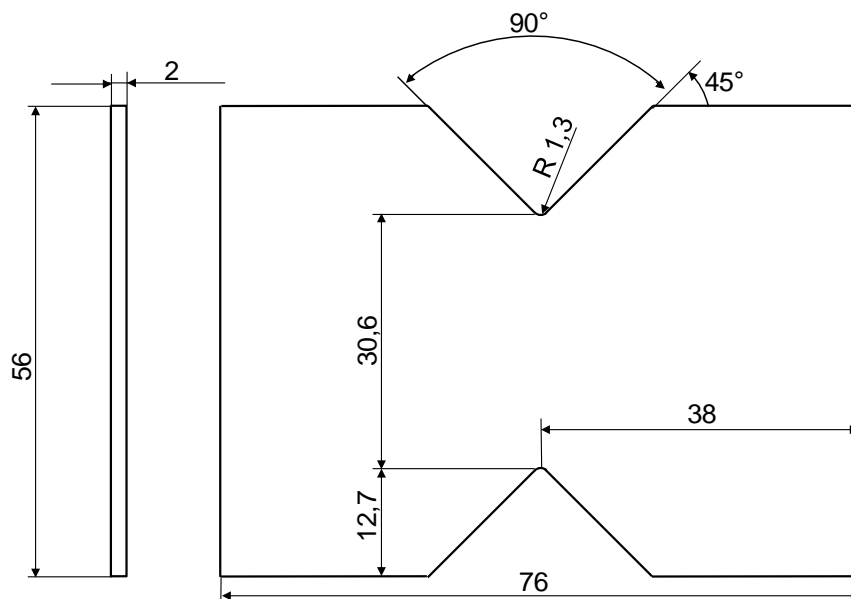


Bild 3: Schubprobe nach ASTM D 7078 [28]

3.2 Durchführung der mechanischen Untersuchungen

Die Zugprüfkörper werden mittels einer Universalprüfmaschine vom Typ Z150 der Firma Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, mit einer 100 kN Kraftmessdose geprüft. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 5 mm/min.

Die Schubprüfkörper werden mit einer Universalprüfmaschine vom Typ Z100 der Firma Zwick mit einer 100 kN Kraftmessdose geprüft. Die Prüfgeschwindigkeit bei diesem Versuchsaufbau beträgt 2 mm/min. Um die Schubspannung in den Proben durch ein optisches Dehnungsmesssystem zu ermitteln, werden die Proben zunächst gespeckelt. Während der Prüfung der Proben wird die Grauwertverschiebung des Musters durch zwei Kameras aufgenommen und anschließend ausgewertet. Dazu wird ein optisches Messsystem der Firma Limes Messtechnik und Software GmbH, Krefeld und die Software Vic-Snap Image Acquisition von der Firma Correlated Solutions, Inc., USA verwendet.

Zu jedem Versuchspunkt werden 5 gültige Wiederholungen der Prüfungen durchgeführt.

3.3 Durchführung der mikroskopischen Untersuchungen

Um die parameter- und fließgeometrieabhängigen Bindenahteigenschaften weiter zu untersuchen, werden polarisationsoptische Aufnahmen der Proben, Oberflächenscans zur Ermittlung der V-Nuttiefe mittels Laserkonfokalmikroskopie und Bilder der Bruchflächen erstellt.

Zur Ermittlung der Spannungszustände in den Kunststoffplatten werden mit einem Polarisationsmikroskop vom Typ VHX-600K der Firma Keyence Deutschland GmbH, Frankfurt, Aufnahmen der Probenplatten angefertigt. Des Weiteren erfolgt eine polarisationsoptische Untersuchung von Dünnschliffen der Probekörper aus der Bindenahtregion. Innere Spannungen lassen sich bei Materialien mit doppelbrechender Struktur durch die Polarisationsmikroskopie sichtbar machen. Dies geschieht durch zwei Polarisationsfilter, zwischen denen die Probe liegt. Dabei fällt das Licht durch den Polarisator und wird linear polarisiert. Beim Durchlaufen der Probe werden die Lichtwellen in zwei Wellenzüge aufgespalten. Am Analysator werden die Wellen wieder „auf eine Ebene“ gebracht. Durch Interferenzen der Wellen mit der Wellenrichtung des Analysators entstehen farbige Muster, aus welchen man die Spannungen erkennen kann. Damit ist eine qualitative, nicht jedoch quantitative Bewertung von inneren Spannungen und molekularen Orientierungen möglich.

Mit demselben Mikroskop werden Aufnahmen der Bruchflächen der Zugproben ohne Polarisationsoptik erstellt, um Erkenntnisse über das Bruchverhalten der Bindenähte zu gewinnen.

Die mikroskopische Untersuchung der V-Nut erfolgt mit einem 3D Lasermikroskop vom Typ VK-9700 der Firma Keyence.

4. UNTERSUCHUNG DER MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN DER BINDENÄHTE

Im Folgenden werden die Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen der Probekörper vorgestellt und diskutiert.

4.1 Zugfestigkeit der Bindenähte

Eine Übersicht der Ergebnisse der Zugversuche als Abminderungsfaktor (Festigkeit der Bindenaht geteilt durch die Festigkeit des Materials ohne Bindenaht) in Abhängigkeit der Fließhindernisgeometrie und des Abstandes des Probekörpermittelpunkts zum Fließhindernis über den Maschineneinstellungen ist in Bild 4 dargestellt. Da es sich hierbei um die Quotienten von je zwei streuungsbehafteten Werten handelt, wird die Streuung des Quotienten nicht angegeben. Die gemessenen Festigkeiten aller Prüfkörper bewegen sich zwischen 30 und 35 MPa.

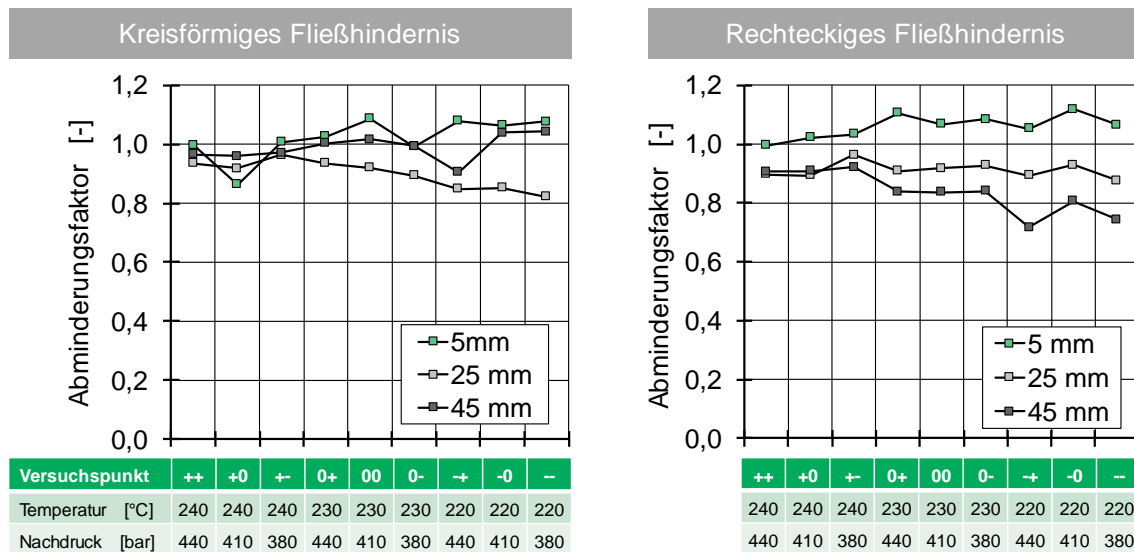


Bild 4: Abminderungsfaktoren der Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Fließhindernis, Abstand zum Fließhindernis und Maschineneinstellungen

Es lässt sich erkennen, dass bei dem kreisförmigen Fließhindernis generell höhere Bindenahtfestigkeiten erreicht werden. Der Abminderungsfaktor sinkt bei beiden Fließhindernissen mit abnehmender Schmelztemperatur, d.h. die Bindenaht wird schwächer. Ein Einfluss des Nachdrucks lässt sich nicht einheitlich bestimmen. So steigt der Abminderungsfaktor bei beiden Fließhindernissen bei der höchsten Schmelztemperatur von 240°C tendenziell auch mit steigendem Nachdruck. Für die mittlere Schmelztemperatur von 230°C lässt sich keine klare Tendenz erkennen. Die Abminderungsfaktoren bei 220°C Schmelztemperatur weisen, bis auf die Ergebnisse der Proben, die 5 mm hinter dem kreisförmigen Fließhindernis entnommen wurden, alle ein Maximum beim mittleren Nachdruck auf, während sie sowohl bei höherem als auch niedrigerem Nachdruck wieder sinken. Daraus lässt sich auf nichtlineare Wechselwirkungen zwischen Bindenahtfestigkeit, Schmelztemperatur und Nachdruckhöhe schließen.

Auffallend ist in Bild 4 auch, dass sich bei beiden Fließhindernissen in einem Abstand von 5 mm zum Fließhindernis Abminderungsfaktoren von über 1 ergeben. Dies bedeutet, dass die Proben mit Bindenaht eine höhere Zugfestigkeit aufweisen als die entsprechenden Referenzproben ohne Bindenaht. Dies lässt sich auf eine Abnahme der Zugfestigkeit der Referenzproben zurückführen. Bild 5 zeigt einen exemplarischen Vergleich der Zugfestigkeiten der Proben, welche in einem Abstand von 5 mm zum Fließhindernis aus den Platten entnommen wurden. Hier wird deutlich, dass sich die Zugfestigkeit der Referenzproben deutlich stärker mit einer Variation der Maschineneinstellungen verändert, als die Zugfestigkeit der Proben mit Bindenaht.

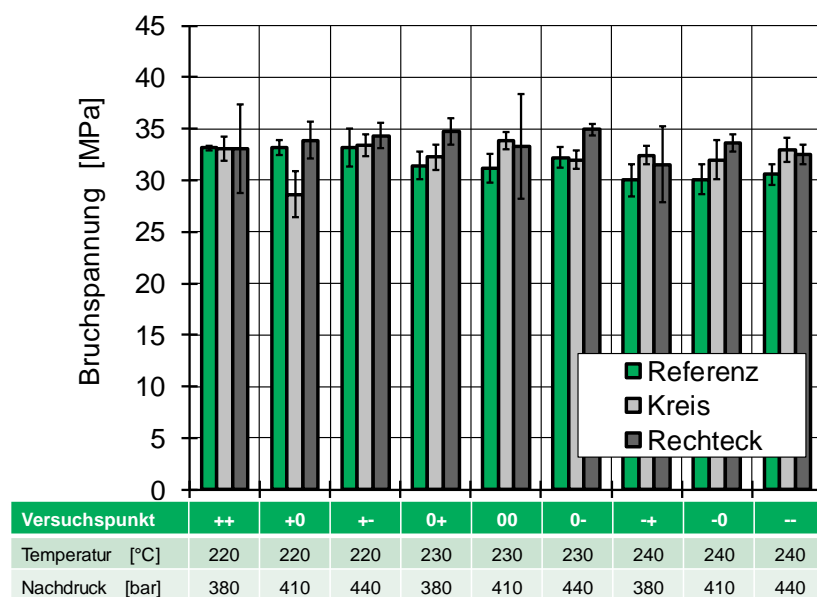


Bild 5: *Bruchspannung der in 5 mm Abstand zum Fließhindernis entnommenen Zugproben in Abhängigkeit von Fließhindernisgeometrie und Prozessparametern*

Des Weiteren fällt in Bild 4 auf, dass die Bindenahtfestigkeit mit zunehmendem Abstand zum Fließhindernis vor allem beim rechteckigen Fließhindernis steigt. Dieses Verhalten entspricht nicht den in der Literatur beschriebenen Beobachtungen, dass Bindenähte mit steigendem Abstand zum Fließhindernis und größer werdendem Zusammenfließwinkel eine höhere Bindenahtfestigkeit aufweisen [12].

Für das beobachtete Verhalten können verschiedene Erklärungsansätze gefunden werden. Zum einen wird die Kunststoffschmelze durch die Umströmung des Fließhindernisses direkt hinter dem Fließhindernis in die Zugrichtung orientiert, was bei den Referenzproben nicht der Fall ist. Zum anderen erfolgt durch das Fließhindernis eine Verringerung des Fließquerschnitts auf 65 % des ursprünglichen Querschnitts der Platte. Dadurch wird die Schmelze auf Höhe des Fließhindernisses stark beschleunigt, da der durch die Spritzgießmaschine bereitgestellte Volumenstrom nicht angepasst bzw. verringert wird. Der Beschleunigung bzw. der resultierenden erhöhten Scherung der Schmelze folgt eine Erhöhung der Schmelztemperatur, was zu einer höheren Bindenahtfestigkeit führen kann.

Um diesen Ansatz zu überprüfen, wurde eine Füllsimulation des Versuchspunkts „-“ mit der Software Sigmasoft der SIGMA Engineering GmbH, Aachen, für beide Fließhindernisgeometrien durchgeführt. In Bild 6 sind die Verläufe der Temperatur in der Mitte der Platte sowie in 0,25 mm Abstand zur Werkzeugwand in den Abständen zum Fließhindernis, in denen die Zugproben entnommen wurden, gezeigt. Bei beiden Fließhindernisgeometrien fällt auf, dass im Messpunkt in 5 mm Abstand zum Fließhindernis in der Mitte der Platte eine höhere Temperatur berechnet wird. Beim kreisförmigen Fließhindernis fällt diese

Temperatur schnell ab und nähert sich den Temperaturen an den anderen Messpunkten an. Beim rechteckigen Fließhindernis hingegen hält die anfangs um 5°C höhere Schmelzetemperatur eine höhere Temperatur als die anderen Messpunkte über einen Zeitraum von mehreren Sekunden. In beiden Fällen kühlen die randnahen Bereiche in 5 mm Abstand schneller ab als in 25 oder 45 mm, wodurch sich dort eine schwächere Randschicht ausbilden könnte.

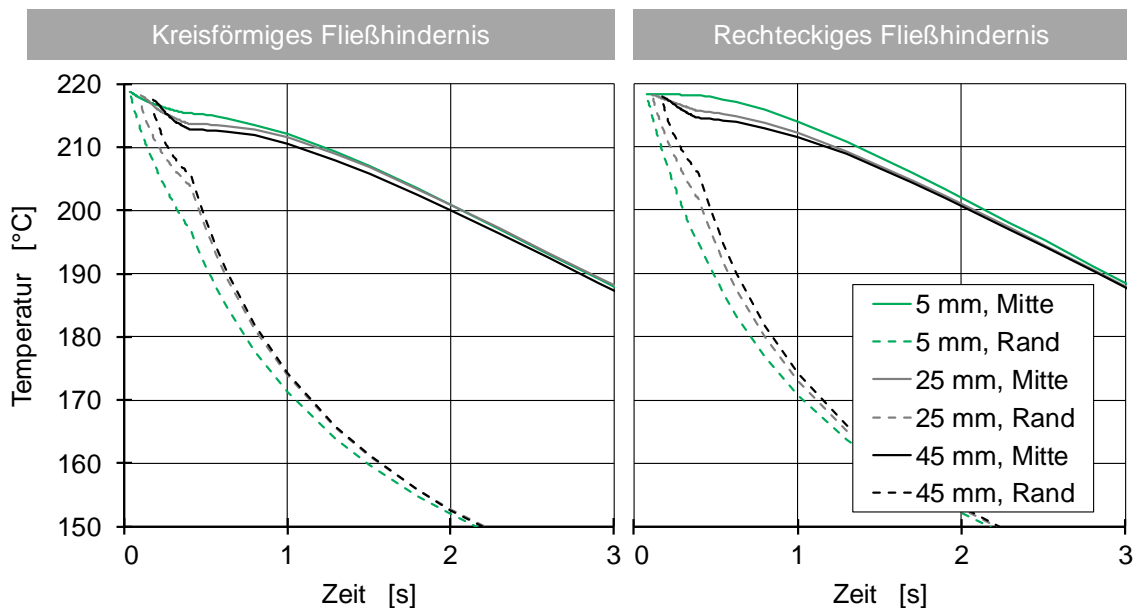


Bild 6: *Simulierter Temperaturverlauf in den Platten mit kreisförmigem und rechteckigem Fließhindernis in verschiedenen Abständen zum Fließhindernis mit den Prozessparametereinstellungen „-“*

In Bild 7 finden sich exemplarische Bilder der Bruchflächen der Proben mit und ohne Bindenaht. Die Referenzproben ohne Bindenaht, unten im Bild, weisen eine glatte Fläche an einer der Ecken der Probekörper auf, an denen die Bruchinitiierung stattfindet. Der Rest der Bruchflächen zeigt eine raue, spröde gebrochene Fläche. Bei den Proben mit Bindenaht verhält es sich anders. Vor allem in 5 mm Abstand zum Fließhindernis, links im Bild, weisen sowohl die Proben mit kreisförmigem als auch mit rechteckigem Fließhindernis oben und unten glatte Bruchinitiierungsflächen auf, während das Innere der Probe spröde bricht. Ebenso verhält es sich in einem Abstand von 25 mm. In einem Abstand von 45 mm weist nur noch die Probe aus einer Platte mit rechteckigem Fließhindernis dieses Verhalten auf, die Probe aus der Platte mit kreisförmigem Fließhindernis bricht analog zu den Referenzproben. Dies lässt auf eine Ausheilung der Probe in diesem Punkt schließen, was sich auch mit den Werten in Bild 4 deckt. Auffallend ist, dass die Rechteckprobe in einem Abstand von 5 mm trotz dieses Bruchbildes eine höhere Bindenahtfestigkeit aufweist als in 25 oder 45 mm Abstand. Dies bekräftigt die These, dass die Temperatur im Inneren der Platte in der Bindenaht im Abstand von 5 mm höher ist, woraus eine höhere

Bindenahtfestigkeit resultiert, während die Randschichten aufgrund einer höheren Kühlrate schneller versagen.

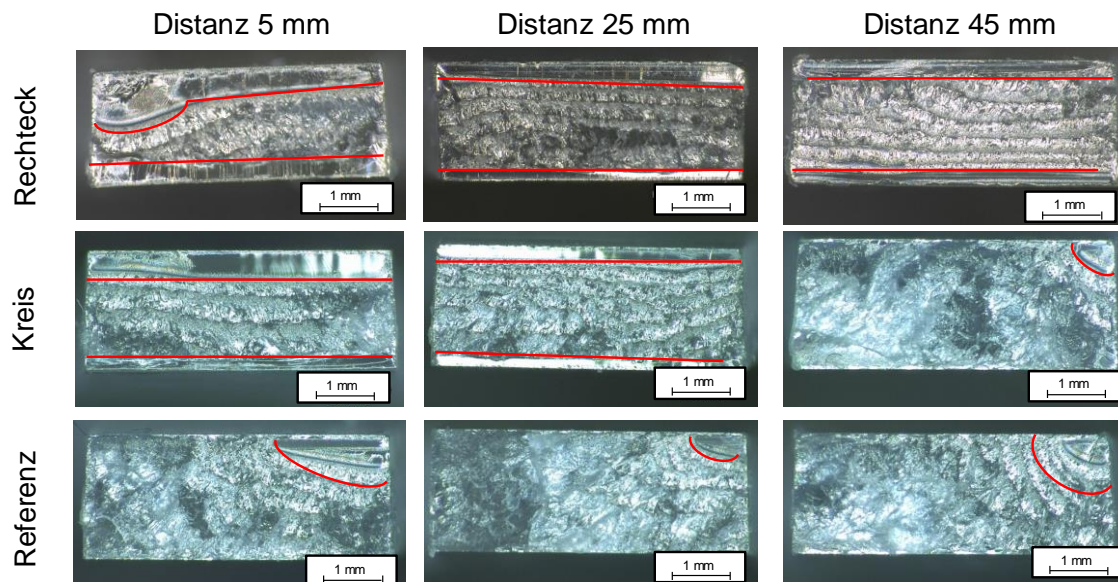
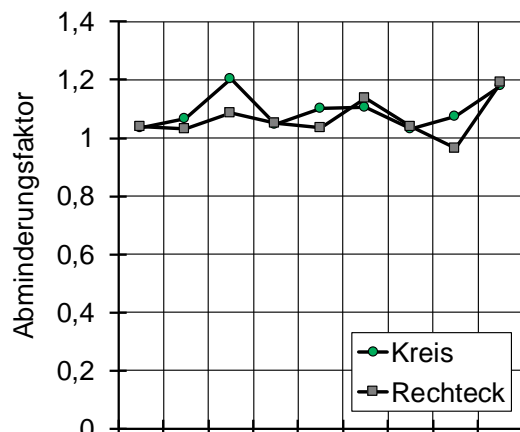


Bild 7: Bruchflächen der Proben mit und ohne Bindenaht am Versuchspunkt
„-“

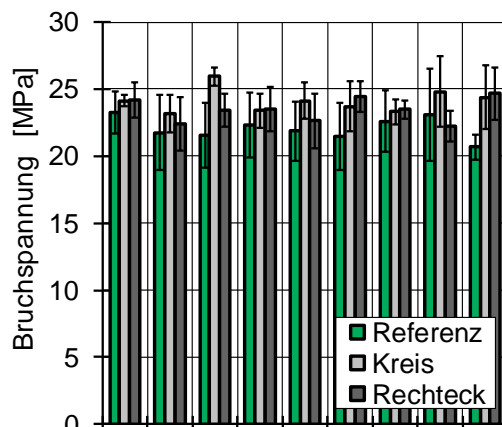
Ob die Temperaturunterschiede in der Plattenmitte bei gleichzeitig schneller abkühlenden Randschichten ausreichen, um die höheren Bindenahtfestigkeiten hervorzurufen, muss weiterführend geklärt werden. Dazu soll in nachfolgenden Untersuchungen die im IGF-Forschungsvorhaben 18132N entwickelte Berechnungsroutine zur Vorhersage der Bindenahtfestigkeit amorpher Thermoplaste verwendet werden [28-30]. Des Weiteren muss geklärt werden, ob und welchen Einfluss etwaige molekulare Orientierungen auf die Bindenahtfestigkeit haben.

4.2 Schubfestigkeit der Bindenähte

Die bei den Schubversuchen gemessenen Schubfestigkeiten und die resultierenden Abminderungsfaktoren der Schubfestigkeit finden sich in Bild 8. Bei den Untersuchungen lässt sich kein erkennbarer Einfluss von Fließhindernisgeometrie und Prozessparametern auf die Abminderungsfaktoren der Schubfestigkeit feststellen. Auch die Betrachtung der absoluten Schubfestigkeiten lässt, auch aufgrund der hohen Standardabweichungen, keinen Zusammenhang zwischen Schubfestigkeit, Fließhindernisgeometrie und Prozessparametern erkennen.



| Versuchspunkt | ++ | +0 | + | 0+ | 00 | 0- | - | -0 | -- |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Temperatur [°C] | 240 | 240 | 240 | 230 | 230 | 230 | 220 | 220 | 220 |
| Nachdruck [bar] | 440 | 410 | 380 | 440 | 410 | 380 | 440 | 410 | 380 |



| Versuchspunkt | ++ | +0 | + | 0+ | 00 | 0- | - | -0 | -- |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Temperatur [°C] | 240 | 240 | 240 | 230 | 230 | 230 | 220 | 220 | 220 |
| Nachdruck [bar] | 440 | 410 | 380 | 440 | 410 | 380 | 440 | 410 | 380 |

Bild 8: Abminderungsfaktoren der Schubfestigkeit und Schubfestigkeit in Abhängigkeit von Fließhindernis und Prozessparametern

Eine Betrachtung der Probekörper nach deren Versagen zeigt in allen Fällen einen Bruch des Probekörpers in einem 45° Winkel zur Schubrichtung, Bild 9. Spröde Thermoplaste sind anfälliger für einen Trennbruch quer zur Richtung der maximalen Normalspannung, welche in einem 45° Winkel zur Schubrichtung auftritt. Daher ist dieses Bruchverhalten für spröde Thermoplaste, zu denen auch Polystyrol gehört, durchaus zu erwarten. Allerdings weist es darauf hin, dass die Bindenaht in den Proben keine Schwachstelle unter Schubbeanspruchung darstellt und der Bruch somit nicht in der Bindenaht, sondern neben der Bindenaht initiiert wird.



Bild 9: Exemplarischer Schubprobekörper nach Versagen

Für dieses Verhalten lassen sich zwei Erklärungsansätze finden. Zum einen besteht die Möglichkeit, dass sich in den Proben keine Bindenaht befindet bzw. die Bindenaht vor Erreichen der Stelle der Probenentnahme bereits ausheilt.

Allerdings lassen sich mit dem Laserkonfokalmikroskop bei Platten mit kreisförmigem Fließhindernis V-Nuten von bis zu 45 mm, bei rechteckigem Fließhindernis von mehr als 45 mm Länge hinter dem Fließhindernis feststellen. Des Weiteren lässt ein Übereinanderlegen von technischer Zeichnung und spannungsoptischen Aufnahmen in Bild 10 noch eine deutliche Bindenaht im Bereich der Probekörper erkennen.

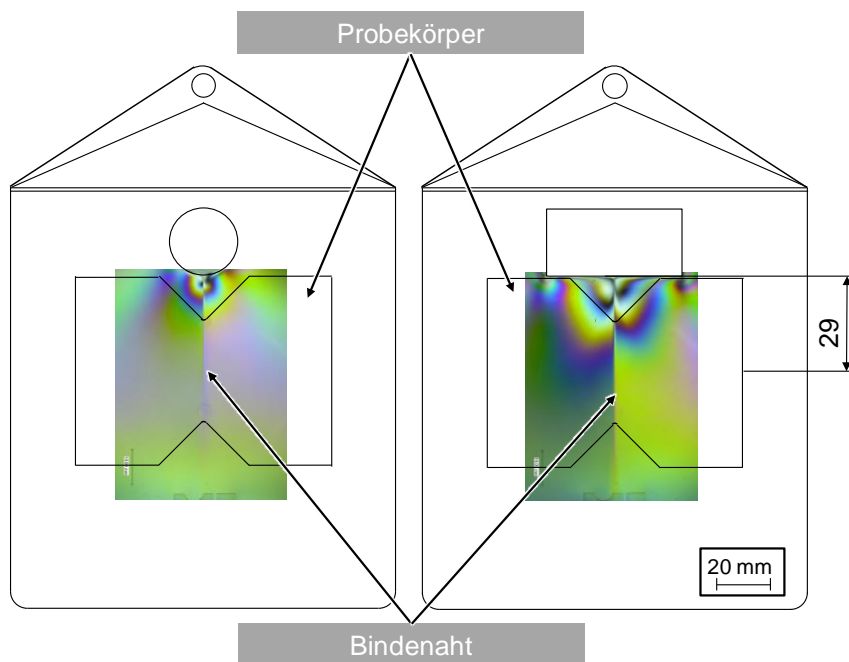


Bild 10: Darstellung der Lage der Bindenaht in den Schubproben bei kreisförmigem und rechteckigem Fließhindernis mithilfe Spannungsoptischer Aufnahmen

Ein zweiter Erklärungsansatz ist, dass Bindenähte keinen Einfluss auf die Schubfestigkeit des Materials haben. Um diesen Ansatz weiter zu überprüfen, wurde am IKV ein rohrförmiger Probekörper konzipiert, Bild 11, in dem durch beidseitige Angusspunkte eine radial umlaufende Bindenaht erzeugt wird. Durch Torsion des Probekörpers kann die Bindenaht unter annähernd reinem Schub belastet werden. Nach Fertigung eines entsprechenden Werkzeugs wird dieser Probekörper für die weitere Untersuchung des Verhaltens von Bindenähten unter Schubbeanspruchung verwendet.

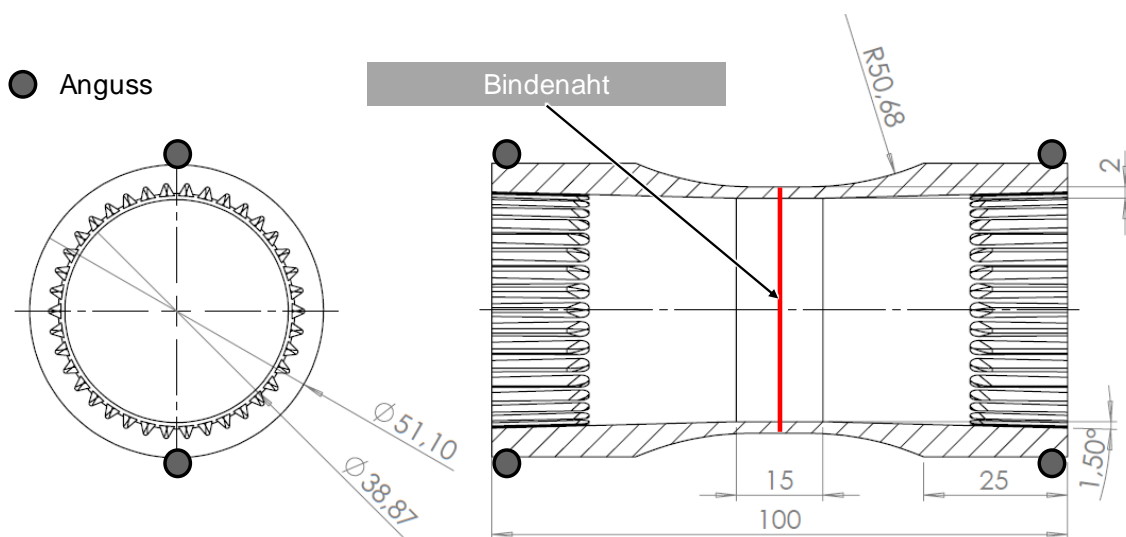


Bild 11: Rohrprobekörper zur Bestimmung der Schubfestigkeit von Bindenähten

5 FAZIT UND AUSBLICK

In den vorliegenden Untersuchungen zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Bindenahtfestigkeit von der Schmelztemperatur, der Nachdruckhöhe, der Fließhindernisgeometrie und dem Abstand zum Fließhindernis. Eine höhere Schmelztemperatur führt zu einer höheren Bindenahtfestigkeit, während eine Veränderung des Nachdrucks je nach Schmelztemperatur unterschiedliche Auswirkungen auf die Bindenahtfestigkeit hat.

Von den zwei untersuchten Fließhindernisgeometrien, kreisförmig und rechteckig, werden beim kreisförmigen Fließhindernis die höheren Bindenahtfestigkeiten erreicht. Entgegen den in der Literatur zu findenden Untersuchungen werden allerdings direkt hinter den Fließhindernissen höhere Bindenahtfestigkeiten als in einem größeren Abstand zu den Fließhindernissen festgestellt. Für diese Beobachtungen wurden zwei Erklärungsansätze, nämlich die Erhöhung der lokalen Schmelztemperatur durch hohe Schergeschwindigkeiten oder die resultierende Erzeugung hoher molekularer Orientierungen aufgestellt, die in weiteren Untersuchungen geprüft werden müssen. Des Weiteren sollte bei einer Anwendung in der Praxis der Abminderungsfaktor mit der höchstmöglichen Festigkeit ermittelt werden, um eine zuverlässige Bauteilauslegung zu ermöglichen.

Eine Abhängigkeit der Schubfestigkeit der Bindenähte von den Prozessparametern und den geometrischen Einflüssen konnte mit den verwendeten Probekörpern nicht festgestellt werden. Daher wurde am IKV ein Probekörper konzipiert, um das Verhalten von Bindenähten unter Schubbeanspruchung weiterführend zu untersuchen.

6 DANKSAGUNG

Das IGF-Vorhaben 19547 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Bereitstellung des Materials erfolgte durch die Ineos Styrolution Group GmbH, Frankfurt am Main.

Allen Institutionen gilt unser Dank.

Literatur

- [1] Nguyen-Chung, T. Strömungsanalyse der Bindenahtformation beim Spritzgießen von thermoplastischen Kunststoffen
Dissertation an der Technischen Universität Chemnitz, 2001
- [2] Xie, L. Study on relevant factors influencing the strength of weld line defect in micro injection molding process
Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: 2, Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik, Bd. 06
Papierflieger-, Clausthal-Zellerfeld, 2010
ISBN: 978-3869481098
- [3] Mennig, G. Die Bindenaht in der Kunststoffverarbeitung
Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 19 (1988) 11, S. 383–390
DOI: 10.1002/mawe.19880191106
- [4] Criens, R. M. Impact strength of knit-lines in injection moulded parts
Materials Chemistry and Physics 14 (1986) 1, S. 69–83
DOI: 10.1016/0254-0584(86)90019-2
- [5] Grewell, D.; Benetar, A. Coupled Temperature, Diffusion and Squeeze Flowmodel for interfacial Healing Predictions
Proceedings of the Annual Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC). Charlotte, USA 2006
- [6] Kim, S.-G.; Suh, N. P. Performance prediction of weldline structure in amorphous polymers
Polymer Engineering and Science 26 (1986) 17, S. 1200–1207
DOI: 10.1002/pen.760261707
- [7] Kausch, H. H.; Tirrell, M.: Polymer Interdiffusion
Annual Review of Materials Science 19 (1989) 1, S. 341–377
DOI: 10.1146/annurev.ms.19.080189.002013

- [8] Doi, M.;
Edwards, S. F. The theory of polymer dynamics.
The International series of monographs on physics,
Bd. 73.
Clarendon Press, Oxford, 1986
ISBN: 9780198520337
- [9] Coyle, D. J.;
Blake, J. W.;
Macosko, C. W. The kinematics of fountain flow in mold-filling
AIChE Journal 33 (1987) 7, S. 1168–1177
DOI: 10.1002/aic.690330711
- [10] Yokomizo, K.;
Banno, Y.;
Yoshikawa, T.;
Kotaki, M. Effect of molecular weight and molecular weight dis-
tribution on weld-line interface in injection-molded
polypropylene
Polymer Engineering & Science 53 (2013) 11,
S. 2336–2344
DOI: 10.1002/pen.23487
- [11] Nguyen-Chung,
T.;
Mennig, G.;
Boyanova, M.
et al. Effect of an obstacle during processing on the weld
line of injection-molded glassy polystyrene: Micro-
hardness study
Journal of Applied Polymer Science 92 (2004) 5,
S. 3362–3367
DOI: 10.1002/app.20335
- [12] Huang, C.-C.;
Wu, Y.-Y.;
Chang, H.-T.;
Yang, Y.-J.: The influence of level of interfacial healing on the
weld-line strengths of injection molded parts
Journal of Polymer Engineering 32 (2012) 6-7,
S. 365–378
DOI: 10.1515/polyeng-2012-0042
- [13] Debondue, E.;
Fournier, J.-E.;
Lacrampe, M.-F.;
Krawczak, P. Weld-line sensitivity of injected amorphous polymers
Journal of Applied Polymer Science 93 (2004) 2,
S. 644–650
DOI: 10.1002/app.20488
- [14] Fellahi, S.;
Meddad, A.;
Fisa, B.;
Favis, B. D. Weldlines in injection-molded parts: A review
Advances in Polymer Technology 14 (1995) 3,
S. 169–195
DOI: 10.1002/adv.1995.060140302

- [15] Cho, K., Ahn, S.;
Park, J.;
Park, C. E.;
An, J. H.: Evaluation of the weld-line strength of thermoplastics by compact tension test
Polymer Engineering & Science 37 (1997) 7,
S. 1217–1225
DOI: 10.1002/pen.11766
- [16] Titomanlio, G.;
Piccarolo, S.;
Rallis, A. Knit lines structure in injection molding of nylon 6. Relation to first solidified sample cross section
Polymer Engineering and Science 29 (1989) 4,
S. 209–213
DOI: 10.1002/pen.760290402
- [17] Tomari, K.;
Tonogai, S.;
Harada, T.;
et al. The V-notch at weld lines in polystyrene injection moldings
Polymer Engineering and Science 30 (1990) 15,
S. 931–936
DOI: 10.1002/pen.760301508
- [18] Criens, R. M.;
Moslé, H. G. The influence of knit-lines on the tensile properties of injection molded parts
Polymer Engineering & Science 23 (1983) 10,
S. 591–596
DOI: 10.1002/pen.760231011
- [19] Shayfull, Z.;
Shuiab, N. A.;
Ghazali, M. F.
et al. Optimizing Length of Weld Line Formation in Thin Plate by Taguchi Method and Analysis of Variance (ANOVA)
International Journal of Engineering & Technology 11 (2011) 1, S. 111–116
- [20] Kovács, J. G.;
Sikló, B. Experimental validation of simulated weld line formation in injection moulded parts
Polymer Testing 29 (2010) 7, S. 910–914
DOI: 10.1016/j.polymertesting.2010.06.003
- [21] Seldén, R. Effect of processing on weld line strength in five thermoplastics
Polymer Engineering & Science 37 (1997) 1, S. 205–218
DOI: 10.1002/pen.11663

- [22] Malguarnera, S.C.; Manisali, A. The effects of processing parameters on the tensile properties of weld lines in injection molded thermoplastics
Polymer Engineering and Science 21 (1981) 10, S. 586–593
DOI: 10.1002/pen.760211004
- [23] Chen, S.-C.; Lee, K.-H.; Sun, S.-P. et al. A Numerical and Experimental Investigation of Factors affecting Weld Line Quality
Proceedings of the Annual Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC). Cincinnati, USA 2013
- [24] Chang, T. C.; Faison, E. Optimization of weld line quality in injection molding using an experimental design approach
Journal of Injection Molding Technology 3 (1999) 2, S. 61–66
- [25] Wieser, J.; Sun, D.-Z.; Seelig, T. Verbesserung der Crashsimulation von Kunststoffbauteilen durch Einbinden von Morphologiedaten aus der Spritzgießsimulation
Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 15826 N
Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT 236), Berlin, 2011
- [26] N.N. DIN EN ISO 527
Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften
Beuth Verlag, Berlin, 2012
- [27] N.N. ASTM D7078
Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method
ASTM International, West Conshohocken, USA, 2012
- [28] Hopmann, Ch. Untersuchung und integrative Simulation der Bindenahtfestigkeit unverstärkter Thermoplaste
Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 18132N
Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, 2016

- [29] Hopmann, Ch.; Knaup, J.; Onken, J. Et al. Prozessbedingte Eigenschaften integrativ simulieren. Umdruck zum 28. Internationalem Kolloquium Kunststofftechnik Aachen, Deutschland, 2016 – ISBN: 978-3-8440-4033-3
- [30] Hopmann, Ch.; Onken, J. Prediction of part geometry-dependent weld line strength in unreinforced polycarbonate Advances in Polymer Technology 26 (2018), S. 1-9 DOI: 10.1002/adv.21933

Bibliography

DOI 10.3139/O999.02022019
Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics
Technology 15 (2019) 2; page 147–168
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
ISSN 1864 – 2217

Stichworte:

Bindenaht, Spritzgießen, Polystyrol, Zugfestigkeit, Schubfestigkeit, Bruchverhalten, Prozesseinfluss, Geometrieinfluss

Keywords:

Weld line, Injection moulding, Polystyrene, tensile strength, shear strengths, fracture behaviour, process influence, geometry influence

Autor / author:

Jakob Onken, M. Sc. RWTH
Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV)
RWTH Aachen
Seffenter Weg 201
52074 Aachen

E-Mail: zentrale@ikv.rwth-aachen.de
Webseite: www.ikv-aachen.de
Tel.: +49 (0)241/80-93806
Fax: +49 (0)241/80- 92662

Herausgeber / Editors:Editor-in-Chief

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29703
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
E-Mail: ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de

Europa / Europe

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, verantwortlich
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29700
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
E-Mail: drummer@lkt.uni-erlangen.de

Amerika / The Americas

Prof. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald, verantwortlich
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Tel.: +1 608/263 9538
Fax: +1 608/265 2316
E-Mail: osswald@engr.wisc.edu

Verlag / Publisher:

Carl-Hanser-Verlag GmbH & Co. KG
Wolfgang Beisler
Geschäftsführer
Kolbergerstraße 22
D-81679 München
Tel.: +49 (0)89/99830-0
Fax: +49 (0)89/98480-9
E-Mail: info@hanser.de

Redaktion / Editorial Office:

Dr.-Ing. Eva Bittmann
Jannik Werner, M.Sc.
E-Mail: redaktion@kunststofftech.com

Beirat / Advisory Board:

Experten aus Forschung und Industrie, gelistet unter
www.kunststofftech.com