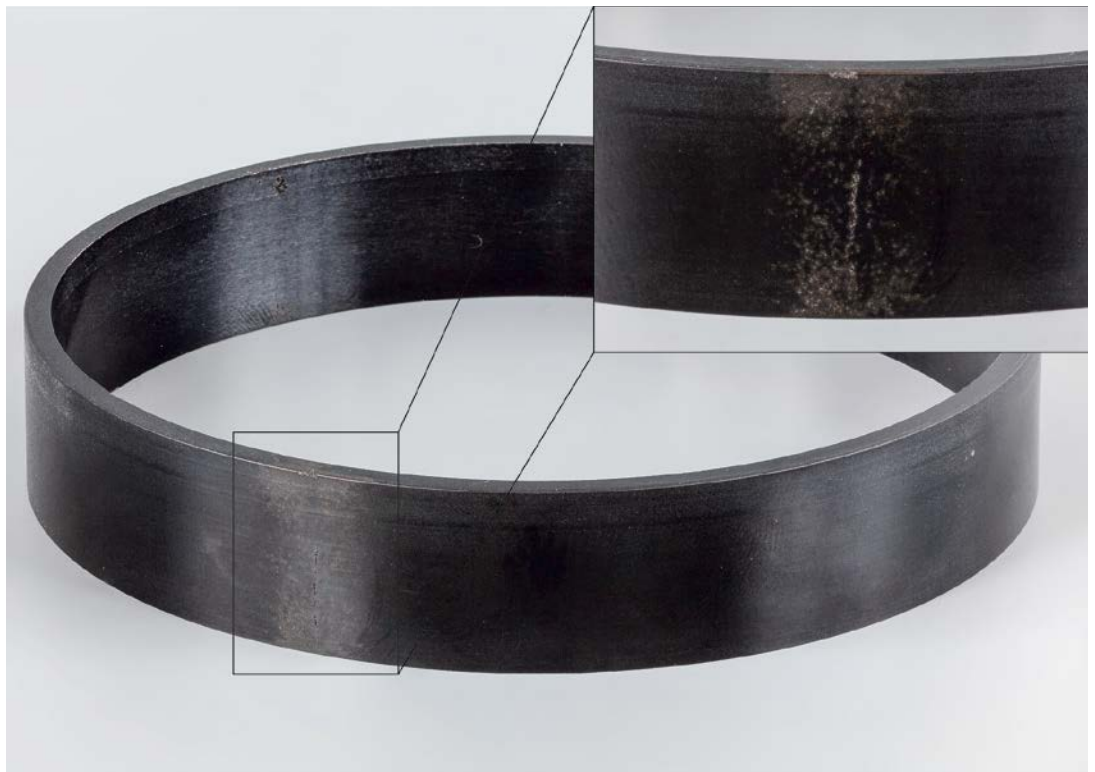


Bindenähte entschärfen

Duroplast-Spritzgießen mit Zwangsentlüftung durch Werkzeugevakuierung

Bindenähte sind bei komplexen Bauteilen unvermeidlich und oft optische sowie mechanische Schwachstellen für spritzgegossene, insbesondere faserverstärkte Bauteile. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass durch Evakuierung der Werkzeugkavität mittels Venturi-Düsen vor dem Einspritzen die beim Duroplast-Spritzgießen entstehenden Bindenähte entschärft werden können.

Ringkörper aus Epoxidharzformmasse: Bindenähte und grau erscheinende Oberflächen sind häufige Fehlstellen spritzgeossener Duroplast-Bauteile (© LKT)



Duroplaste sind vernetzende Werkstoffe, deren charakteristische Materialeigenschaften sich erst durch die während des Verarbeitungsprozesses stattfindende Härtings- bzw. Vernetzungsreaktion ausbilden [1]. Dank der vernetzten Molekularstruktur weisen Duroplaste allgemein hohe elektrische Isolationseigenschaften sowie eine hohe Wärmeformbeständigkeit, Oberflächenhärte und mechanische Festigkeit auf [2]. Dies erfüllt die Anforderungen, die die Automobilindustrie heute an elektrische Umhüllungsmaterialien stellt, z.B. in Anwendungen als Sensorgehäuse im Motorraum, in Rei-

fen, in der Abgasanlage oder im Getriebereich. Daher kommen für diesen Zweck in erster Linie spritzgießfähige Epoxidharzformmassen zum Einsatz. Die Hauptgründe dafür sind die niedrige Viskosität bei der Formfüllung, an die Elektronik angepasste Wärmeausdehnungskoeffizienten der Epoxidformmasse und die gute Haftung an metallischen Oberflächen [3].

Bindenähte entstehen am häufigsten, wenn die Schmelzströmung sich wegen eines Fließhindernisses zuerst teilt und die Teilströmungen später wieder zusammenreffen. Bedingt durch die Bauteil-

geometrie lassen sich Bindenähte konstruktiv oft nicht vermeiden. Die Bereiche der Vereinigung solcher Schmelzströme sind häufig optische und/oder mechanische Schwachstellen. Beim Thermoplast-Spritzgießen sind folgende Ursachen für die verminderte Bindenahtfestigkeit anerkannt [4]:

- die mangelnde Interdiffusion der Makromoleküle der Schmelzfronten über die neugeschaffene Grenzfläche hinweg,
- die starke Orientierung der Makromoleküle oder anisotropen Füllstoffe parallel zur Bindenaht,

- die Ausbildung einer an der Oberfläche um das Bauteil herumlaufenden sogenannten V-Kerbe.

Ähnliche Ursachen sind teilweise auch beim Duroplast-Spritzgießen für die verminderte Bindahtfestigkeit verantwortlich, z. B. die parallel zur Bindaht ausgerichteten Glasfasern, die V-Kerbe und/oder Lufteinschlüsse an der Bindahtstelle. Ein deutlicher Unterschied zwischen der duroplastischen und der thermoplastischen Bindaht liegt in der Bildung der Verbundhaftung. Bei Thermoplasten entsteht die Verbundhaftung durch Verschlaufungen der aus verschiedenen Strömungen kommenden Molekülketten, während bei Duroplasten Vernetzungsreaktionen zwischen den Molekülketten überwiegen.

Werkzeug ohne Pumpe evakuieren

Beim Thermoplast-Spritzgießen wird die Evakuierung der Werkzeugkavität seit Langem praktiziert. Je nach Rahmenbedingungen kann die Zwangsentlüftung die Formfüllung insbesondere bei der Herstellung dünnwandiger Bauteile erleichtern, weil Lufteinschlüsse vermieden werden und sich die Bindahtfestigkeit dadurch erhöht [5]. Um Vakuum im Spritzgießwerkzeug zu erzeugen, sind momentan zwei wesentliche Funktionsprinzipien auf dem Markt:

- das Absaugen der Luft durch eine direkt an die Kavität angeschlossene Vakuumpumpe und
- das Absaugen der Luft mithilfe einer Venturi-Düse.

Die Evakuierung nach dem Venturi-Effekt kommt ohne Pumpe aus, dazu bedarf es

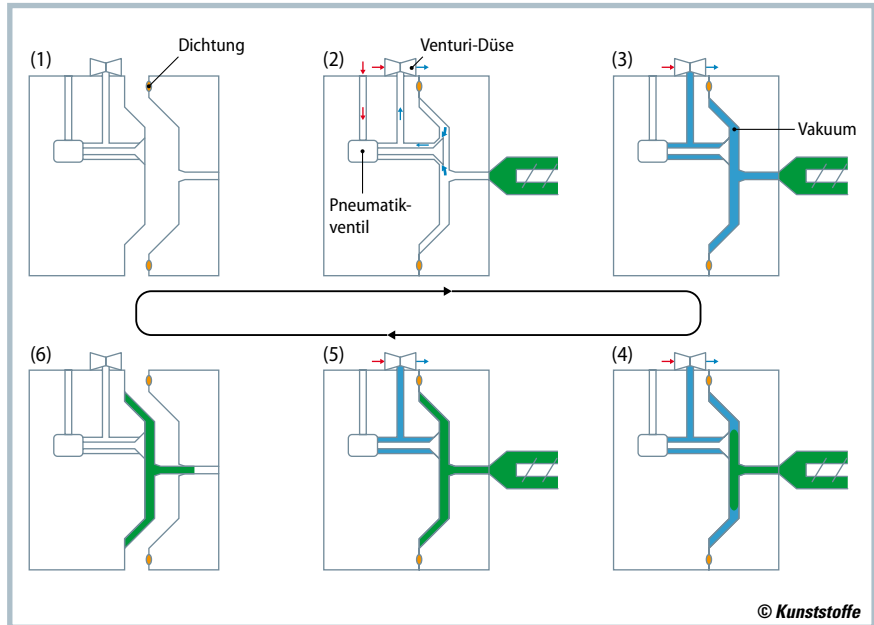


Bild 1. Schematisch dargestellter Prozessablauf des Duroplast-Spritzgießens mit evakuierter Werkzeugkavität: 1) Werkzeug schließen; 2) Pneumatikventil öffnen und Luft ausziehen; 3) Pneumatikventil schließen; 4) Einspritzen im Vakuum; 5) Material aushärten; 6) Werkzeug öffnen und Bauteil auswerfen (Quelle: LKT)

lediglich zweier Druckluftanschlüsse. Beim Duroplast-Spritzgießen mit Venturi-Düse (Bild 1) muss die Kavität z. B. mit einer Dichtungsschnur abgedichtet werden. Wenn das Pneumatikventil öffnet, wird die Werkzeugkavität an die Verengung der Venturi-Düse angeschlossen. Ihr zweiter Druckluftanschluss dient der Erzeugung des Vakuums. Durch die Querschnittsverengung in der Venturi-Düse wird die Strömungsgeschwindigkeit der Luft auf Überschallgeschwindigkeit erhöht. Nach der Bernoulli-Gleichung entsteht ein Unterdruck an der Verengung. Dadurch kann die Luft aus der Kavität gezogen werden.

Diese Variante ist für die Erzeugung eines Vakuums in kleinen Volumen gut geeignet. Beispielweise konnte die Venturi-Düse innerhalb 1s ca. 880 mbar Unterdruck in dem in diesen Untersuchungen verwendeten Zugstab-Werkzeug mit ca. 30 cm³ Einspritzvolumen erzeugen.

Bindahtfestigkeit mit vs. ohne Vakuumtechnik

Da es sich beim Duroplast-Spritzgießen mit Vakuumtechnik um ein neuartiges Verfahren handelt, muss untersucht werden, welchen Einfluss das evakuierte Werkzeug auf die Bindahteigen- ➤

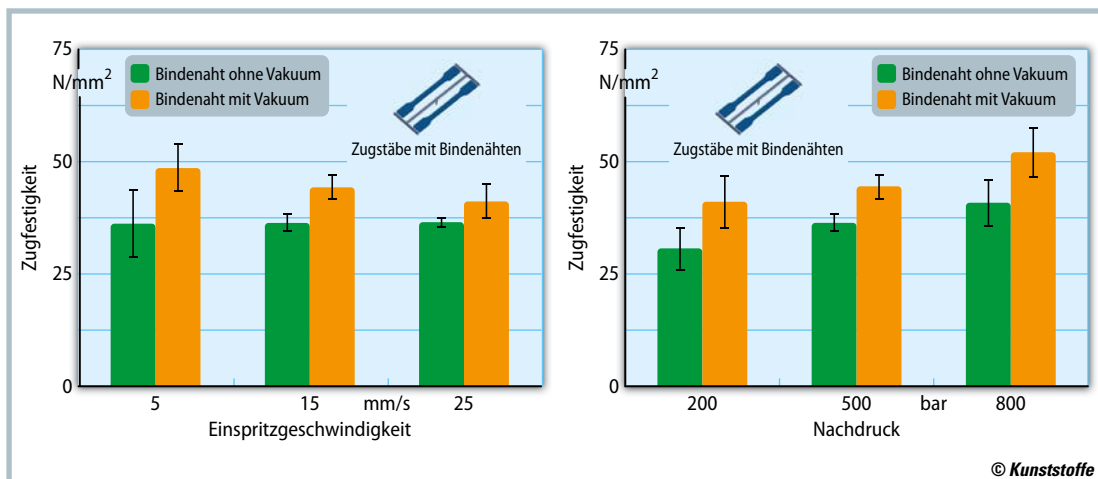


Bild 2. Vergleich der Zugfestigkeit von mit und ohne Vakuumtechnik hergestellten Prüfkörpern mit Bindaht, links bei verschiedenen Einspritzgeschwindigkeiten, rechts bei variiertem Nachdruck. Prüfgeschwindigkeit: 1 mm/s; Prüftemperatur: 25 °C (Quelle: LKT)

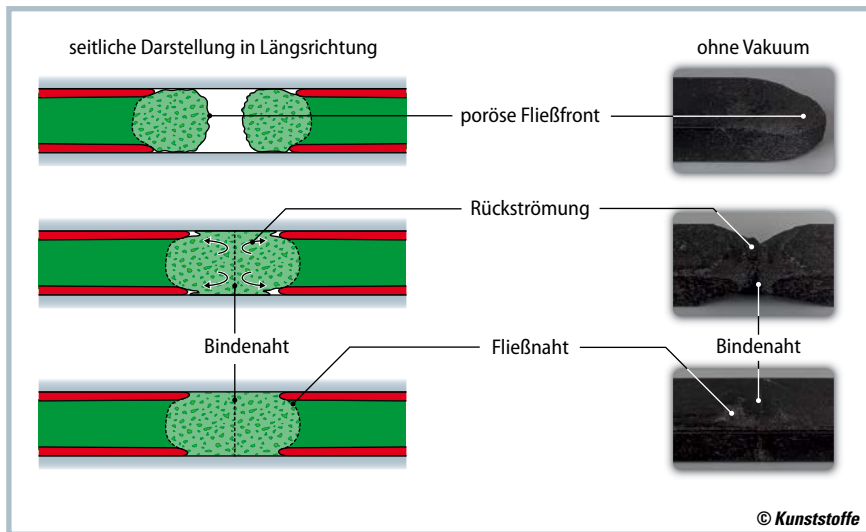


Bild 3. Bildung der Bindenähte beim Duroplastspritzgießen: Poröse Fließfront bildet sich (oben); poröse Fließfronten treffen zusammen und Rückströmungen im Bindebereich entstehen (Mitte); Rückströmungen treffen mit von hinten kommender Schmelze zusammen (unten). Einspritzgeschwindigkeit: 15 mm/s; Werkzeugtemperatur: 175 °C (Quelle: LKT)

schaften im Vergleich zum Spritzgießen ohne Entlüftung ausübt. Als Prüfkörper verwendete der Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT) der Universität Erlangen-Nürnberg Zugstäbe nach DIN EN ISO 10724-1 mit stagnierenden Bindenähten (Referenz: Zugstäbe ohne Bindenaht). Die Prüfkörper wurden auf einer Spritzgießmaschine (Typ: KM 80-180 CX DUR/3; Hersteller: KraussMaffei Technologies GmbH, München) aus einer mit Glasfasern und anorganischen Harzträgern verstärkten Epoxidharzformmasse (Typ: EP 3582 BMS; Hersteller: Raschig GmbH, Ludwigshafen) gefertigt.

Die Bindenahtfestigkeit mit und ohne Vakuumtechnik wurde mit Zugversuchen untersucht. Dabei wurden mit der Einspritzgeschwindigkeit und dem Nachdruck zwei Prozessparameter variiert. Um die Formfüllgeschwindigkeit bei Zugstäben mit und ohne Bindenaht konstant zu halten, wird die Einspritzgeschwindigkeit bei der Herstellung der Zugstäbe ohne Bindenaht halbiert. Dies hat den Grund, dass dafür nur halb so viele Angüsse verwendet werden. Den Unterschied bei der Bildung der Bindenähte mit und ohne Vakuumtechnik betrachtet die Forschungsgruppe anhand von Füllstudien makroskopisch, mikroskopisch und via Computertomographie.

Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen, dass die Einspritzgeschwindigkeit, der Nachdruck und der Zustand der Kavität vor dem Einspritzen wichtige Einfluss-

größen sind (**Bild 2**). Wird die Werkzeugkavität nicht vorevakuert, lässt sich die Bindenahtfestigkeit durch Erhöhung des Nachdrucks verbessern. Wird die Kavität hingegen vor dem Einspritzen evakuert, steigt die Bindenahtfestigkeit bei allen Versuchsgruppen. Als Referenzwert liegt die Zugfestigkeit von Zugstäben ohne Bindenaht bei 88 N/mm². Die Zugfestig-

keit von Bindenaht-Zugstäben erreicht ohne Zwangsentlüftung max. 46% und mit bis zu 59% des Referenzwerts. Wobei sich die Bindenahtfestigkeit bei der langsamsten Einspritzgeschwindigkeit mit Vakuumtechnik (im Vergleich zu ohne) signifikant um ca. 35% erhöhen kann. Um zu verstehen, wie das Evakuieren die Bindenähte verbessert, wurde die Bildung der Bindenaht beim Duroplast-Spritzgießen genauer untersucht.

Mechanismus der Bildung der Bindenaht

Die Füllstudie des Spritzgießens ohne Vakuum zeigt, wie sich duroplastische Bindenähte ausbilden (**Bild 3**). Anders als Thermoplaste weisen Duroplaste während der Füllphase eine zerklüftete und poröse Fließfront auf (Blockströmung). Aufgrund der hohen Werkzeugtemperatur bildet sich ein niedrigviskoser Gleitfilm zwischen Kunststoffschmelze und Werkzeugwand. Dies führt dazu, dass die Schmelze nur wenig an der Werkzeugwand haftet. Die poröse Fließfront verschwindet während der Füllphase nicht und trifft letztendlich bei der Bindenahtbildung mit der anderen Fließfront zusammen. Unter dem Einspritzdruck werden beide Fließfronten nach dem Aufei-

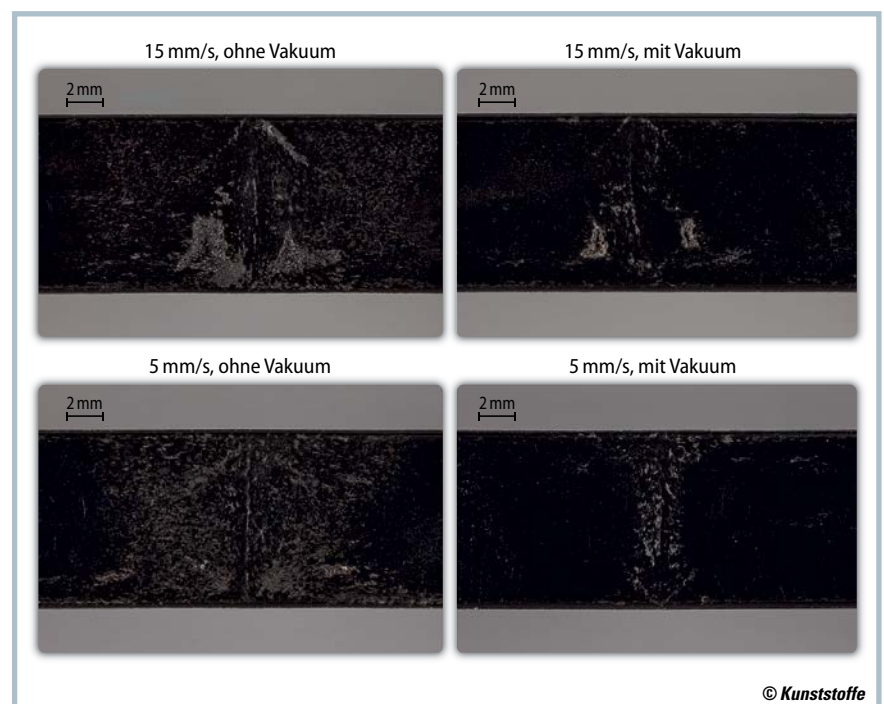


Bild 4. Oberflächen mit unterschiedlichen Prozessparametern gespritzter Teile: Die Draufsicht zeigt, dass die Oberflächen der Bindenähte unter Anwendung der Vakuumtechnik und einer niedrigeren Einspritzgeschwindigkeit deutlich verbessert sind (Quelle: LKT)

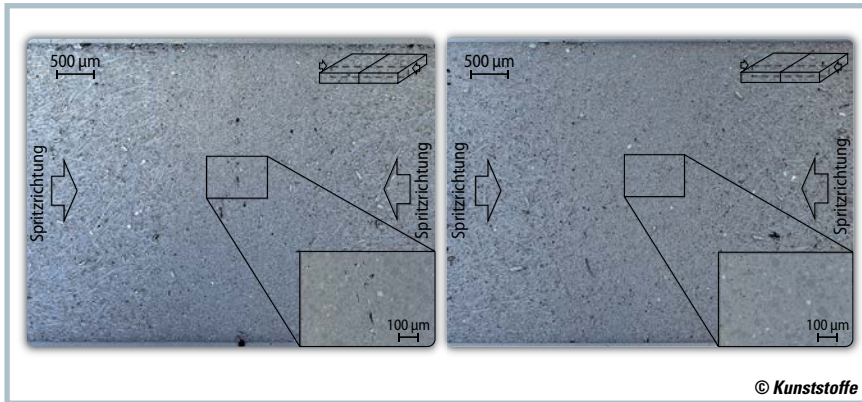


Bild 5. Computertomographie vom Bindenahtbereich unter seitlicher Ansicht (Hellfeld); Einspritzgeschwindigkeit: jeweils 5 mm/s, links ohne, rechts mit Vakuum. Die Vakuumtechnik verringert die Lufteinschlüsse im Bindenahtbereich (Quelle: LKT)

nantertreffen zusammengedrückt. So entstehen Rückströmungen aufgrund der rückkehrenden Fließfront. Wenn die Rückströmungen mit der von hinten kommenden Schmelze zusammentreffen, entstehen Fließnähte neben den Bindenähten. Das Versagen der Bauteile im Zugversuch tritt immer an der Bindenaht auf.

An der Fließnaht sind oft Einfallstellen an der Oberfläche zu finden. Bei einer nicht ausreichenden Entlüftung kann sich Luft auch an den Fließnähten sammeln, weshalb die Einfallstellen oft im Bindebereich zu sehen sind. Diese Einfallstellen lassen sich durch Erhöhung des Nachdrucks oder des Schussvolumens nicht vermeiden. Hingegen können die Einfallstellen durch die geringere Einspritzgeschwindigkeit und/oder das Vorevakuieren der Kavität deutlich reduziert werden (Bild 4). Außerdem kann der graue Bereich an der Bindenaht durch Anwendung der Vakuumtechnik deutlich vermindert werden. Der graue Bereich entsteht durch die unzureichend komprimierte Kunststoffschmelze in der porösen Fließfront. Wird die Kavität vor dem Einspritzen nicht evakuiert, weist die Kavität einen deutlichen höheren Druck (ca. 50 bis 100 bar) zum Ende des Einspritzvorgangs auf als beim Einspritzen mit Vakuumtechnik. Die vorevakuierete Kavität erleichtert also den Füllvorgang. Dadurch lässt sich die poröse Fließfront unter Nachdruck besser komprimieren.

Die Computertomographie ermöglicht es, die Lufteinschlüsse innerhalb des Bauteils beschadigungsfrei zu beobachten. Eine vergleichende Darstellung veranschaulicht, dass das Bauteil mit Vakuum-

technik deutlich weniger Lufteinschlüsse im Bindenahtbereich aufweist (Bild 5). Dies spiegelt das Ergebnis des Zugversuchs wider, bei dem die niedrige Einspritzgeschwindigkeit und vorevakuierete Werkzeugkavität die Zugfestigkeit erhöht haben.

Zugstäbe mit Bindenaht zeigen trotz Vakuum im Zugversuch geringere Festigkeiten als Zugstäbe ohne Bindenaht. Dies lässt sich mit den am Bindenahtbereich quer zur Belastungsrichtung orientierten Glasfasern erklären (Bild 5). Aufgrund der Anisotropie der Füllstoffgeometrie wird keine Verstärkungswirkung der Glasfasern im Bindenahtbereich erreicht. Außerhalb des Bindenahtbereichs, in dem die Glasfasern in Spritzrichtung liegen (die der Belastungsrichtung entspricht), wird die Verstärkungswirkung hingegen ausgenutzt. Daher tritt das Versagen beim Zugversuch immer an der Bindenahtstelle auf. Die ohne Vakuumtechnik gespritzten Zugstäbe haben zusätzlich noch mehr Lufteinschlüsse als die mit Vakuumtechnik erzeugten, was die Zugfestigkeit weiter reduziert.

Ausblick: Tests mit Glaskugeln statt Glasfasern

Beim Spritzgießen duroplastischer Formmassen können poröse Oberflächen mit Grauschleier und Lufteinschlüsse im Bindenahtbereich entstehen. Untersuchungen zeigen, dass die Festigkeit und Oberflächenqualität der Bindenähte durch die Evakuierung der Werkzeugkavität vor dem Einspritzen verbessert werden können. Die Entlüftung erleichtert die Formfüllung beim Einspritzen, verbessert die

Komprimierung der porösen Fließfront unter Nachdruck und vermeidet Lufteinschlüsse in den Bindenähten. Auf diese Weise können im Duroplast-Spritzgießverfahren z.B. Elektronikbauteile mit optimierten Bindenahteigenschaften hergestellt werden.

Nach wie vor stellt die Bindenaht allerdings eine mechanische Schwachstelle im Verhältnis zu Bauteilen ohne Bindenaht dar. Um den Einfluss der Umorientierung von Füllstoffen auf die Bindenahtfestigkeit zu überprüfen, sollen im nächsten Schritt isotrope Füllstoffgeometrien (z.B. Glaskugeln) getestet werden. Hier wird gegenüber den in diesen Untersuchungen verwendeten Glasfasern ein geringerer Unterschied zwischen Bauteilen mit und ohne Bindenaht erwartet. ■

Die Autoren

Prof. Dr.-Ing Dietmar Drummer ist Inhaber des Lehrstuhls für Kunststofftechnik (LKT) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg; drummer@lkt.uni-erlangen.de

Dipl.-Ing. Christian Gröschel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Abteilungsleiter am LKT.

Yang Zhao, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am LKT.

Dank

Das Projekt „Entwicklung neuartiger Kunststoffkäfige für Hochpräzisionskugellager auf Basis duroplastischer Werkstoffe“ (KF2305719PT4) ist gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags. Die Autoren bedanken sich beim BMWi für die Förderung des Projekts. Der Dank gilt auch dem Partner des Vorhabens Peter Brehm Kunststoffspritzguß und Formenbau GmbH, Remshalden-Geradstetten, für die Bereitstellung der Werkzeugtechnik.

Service

Literatur & Digitalversion

» Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/1390912

English Version

» Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com