Titel

Stress im Prozess
–
Messung der Belastung elektronischer Bauelemente im Montagespritzgießprozess

Autoren

Martina Vetter, M.Sc., wissenschaftliche Mitarbeiterin, vetterm@lkt.uni-erlangen.de
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, Leiter des Lehrstuhls für Kunststofftechnik der Universität Erlangen-Nürnberg, drummer@lkt.uni-erlangen.de
Beide: Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

---

Einführung und Motivation

Das Spritzgießen stellt ein sehr wirtschaftliches Verfahren zur Herstellung von komplexen thermoplastischen Bauteilen dar. Durch Sonderverfahren, wie dem Montagespritzgießen, werden die Möglichkeiten des Standardprozesses erweitert und so können komplexe Baugruppen aus verschiedensten Komponenten in einem Fertigungsschritt hergestellt werden. Ein Beispiel ist das Überspritzen von Elektronik zum Schutz der empfindlichen Bausteine vor mechanischen Stößen oder auch aggressiven flüssigen oder gasförmigen Medien, Bild 1. Bei der Verwendung von technischen Thermoplasten können zudem weitere Funktionselemente wie z.B. Schnapphaken zur Anbindung an die Umgebung integriert werden. Dies ist bei den üblichen Verfahren zum Schutz von elektrischen Schaltungsträgern, wie dem Lackieren oder dem Vergießen, nicht möglich. Bei letzteren muss zudem eine Vergusskammer vorgesehen werden, was zu konstruktiven Restriktionen führt.

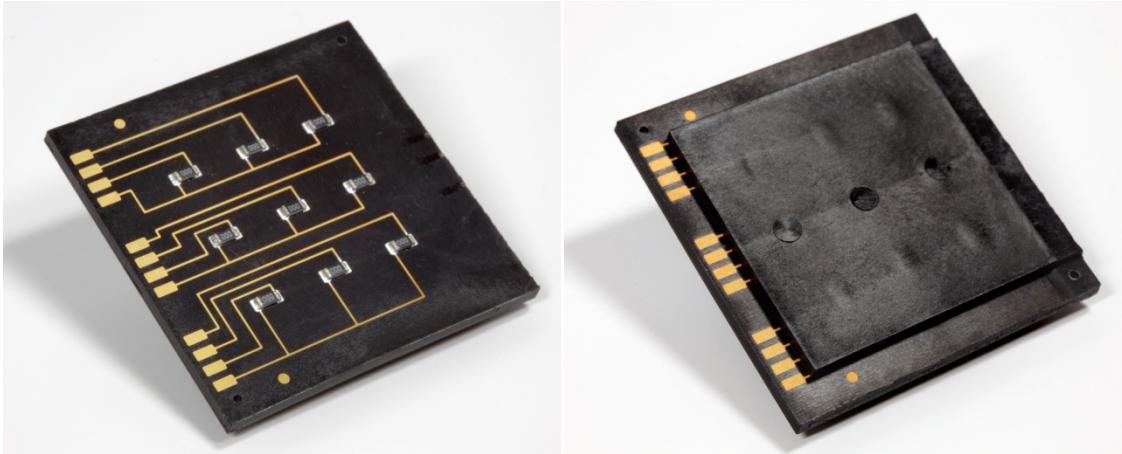

Bild 1: Demonstrator zum Überspritzen von elektronischen Komponenten

links: Schaltungsträger des LKT auf Thermoplastbasis mit Leiterbahnen und gelöteten Bauelementen (Strukturierung: Fa. LPKF, Garbsen; Aufbau- und Verbindungstechnik: FAPS, Universität Erlangen-Nürnberg)

rechts: mit Thermoplast überspritzter Schaltungsträger

PLASTVERARBEITER

Entdecken Sie weitere interessante Artikel und News zum Thema auf plastverarbeiter.de!

Hier klicken & informieren!

Werden Elemente im Werkzeug - seien es Einlegeteile oder Kavitätskomponenten - um- bzw. überspritzt, so sind diese während des Spritzgießprozesses einem komplexen thermisch-mechanischen Belastungskollektiv ausgesetzt. Aufgrund der hohen Schmelzefrontgeschwindigkeit und dem zur Füllung benötigten Druck sind dies zum einen mechanische Belastungen, also Druck- oder Schubkräfte. Zum anderen kommt es zu einer thermischen Belastung je nach Werkzeug- und Schmelzetemperatur sowie Wärmekapazität und -leitfähigkeit der Werkstoffe und thermischem Übergängen. Gerade bei den i.d.R filigranen und empfindlichen elektronischen Schaltungsstrukturen und Bauteilen kann dies zur Schädigung oder sogar zum Ausfall führen.

Die möglichen Belastungen auf ein elektronisches Bauelement beim Umspritzen skizziert Bild 2 schematisch. Die Schmelze übt beim Umströmen des Bauteils auf dieses eine direkte, dem Druck vermutlich proportionale kurzzeitige Kraft aus. In Abhängigkeit der Bauteil und Fließkanalgeometrie resultieren richtungsabhängige Druck- und Schubkräfte, die auf das Bauteil einwirken.

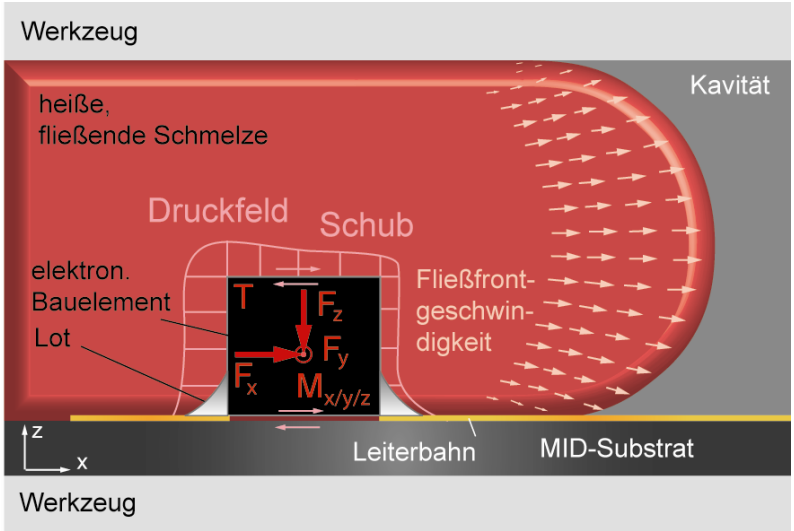

Bild 2: Belastung auf Einlegeteile während des Umspritzens

Dabei ist jedoch zu beachten, dass es sich hierbei nicht um einen statischen Zustand handelt, sondern um einen hochdynamischen Prozess. Die resultierenden Kräfte werden somit nicht lediglich durch den Druck, sondern aus der zeitlichen Änderung des von der Schmelze ausgeübten Impulses definiert. Als wichtige Frage gilt es hier z.B. zu beantworten, inwiefern die Einspritzgeschwindigkeit die Bauteilbelastung beeinflusst.

In Abhängigkeit der Schmelzetemperatur, der Wärmeeindring- und Wärmeübergangskoeffizienten von Kunststoff und Bauteil bildet sich ein bestimmter Wärmestrom und damit eine erhöhte Temperatur von Bauteil und Lötstelle aus. Dies kann zu einer thermischen Schädigung führen. Es sind dabei auch Wechselwirkungen nicht auszuschließen. So können beispielsweise erhöhte Temperaturen zu verringerten mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe führen.

Für die Auslegung von Produkten und Prozessen ist es somit von wesentlichem Interesse die wirkenden Belastungen zu kennen und vor allem auch zu wissen wie diese durch die Werkstoffauswahl, die Prozessführung und die Konstruktion beeinflusst werden können.

Zielsetzung der Untersuchungen

Ziel wissenschaftlicher Untersuchungen ist es, die mechanischen und thermischen Belastungen, die während des Spritzgießprozesses auf die elektronischen Komponenten wirken, direkt im Prozess zu messen und durch eine gezielte Variation des Werkstoffverhaltens, der Prozessparameter und konstruktiven Randbedingungen deren Einflüsse zu ermitteln und zu quantifizieren. Diese Kenntnisse können dann in die Auslegung von Baugruppen und Herstellungsprozessen einfließen. Im Folgenden werden erste Erkenntnisse zu den mechanischen Belastungen und dem Einfluss der Schmelzefrontgeschwindigkeit auf diese dargestellt.

Werkzeug- und Messtechnik zur Ermittlung der Belastungen

Unterstützt von der Firma Wiesauplast / MIDTronic (Wiesau) hat der Lehrstuhl für Kunststofftechnik (Erlangen) ein Spritzgießwerkzeug entwickelt, das es ermöglicht, ebendiese komplexen Belastungen auf kleine Komponenten, wie elektronische Bauelemente, direkt und am Entstehungsort zu messen.

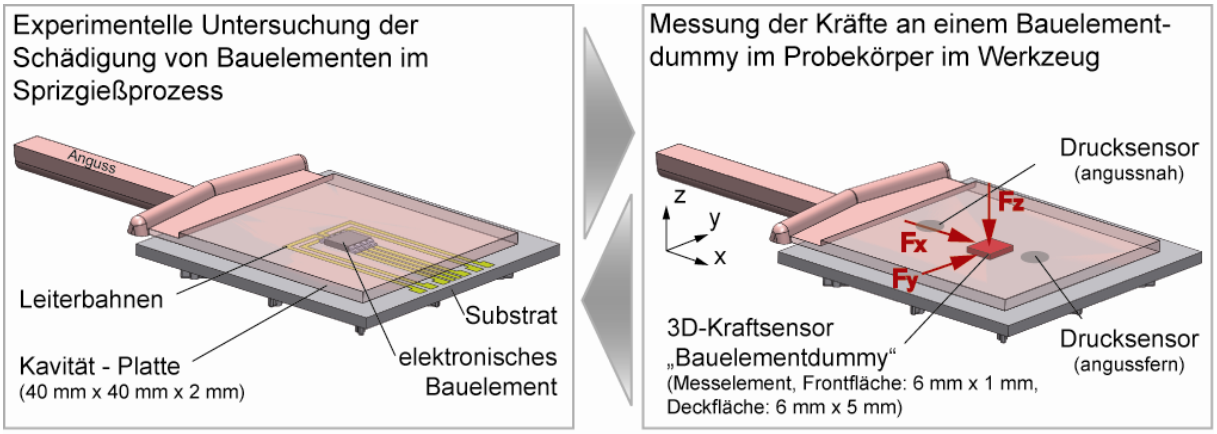

Bild 3: Ermittlung der Bauelementbelastung im Spritzgießprozess

links: Umspritztes elektronisches Bauelement (z.B. Small Outline Transistor SOT-23) auf thermoplastischem Substrat mit Leiterzügen in die Umgebung

rechts: Messpositionen zur Bestimmung der mehrdimensionalen Bauelement-belastung mittels Messelement (Dimensionen entsprechend Bauelement-dimensionen)

In Bild 3 links ist eine der Probekörpervarianten, die mit diesem Werkzeug hergestellt werden können, dargestellt. Es ist sowohl möglich, reale elektronische Schaltungs-träger mit Aufbau- und Verbindungstechnik zu überspritzen, als auch zahlreiche Komponenten des Belastungskollektivs direkt zu messen. Bild 3 rechts zeigt dabei die Messposition für die Kraftmessung auf einen „Bauelementdummie“ in der Kavität,

dessen Abmessungen realen Bauelementen entsprechen. Es wurde eine spezielle Sensorik und Einbautechnik entwickelt, die es erstmalig erlaubt, nicht nur den Druck in eine Richtung, sondern die von der Schmelze in alle drei Raumrichtungen ausgeübten Kräfte aufzunehmen. Komponenten dieses Aufbaus werden dabei vom Sensorhersteller Kistler (Winterthur) bereitgestellt. Durch seinen modularen Aufbau erlaubt das Werkzeug zahlreiche Variation der Probekörpergeometrie wie auch der Prozessführung z. B. durch Prägen oder Schäumen. Neben der hier dargestellten Analyse der mechanischen Belastungen ist es mit diesem Prüfaufbau möglich, gleichzeitig die thermischen Verhältnisse zu analysieren und mit den mechanischen Ergebnissen zu korrelieren. Somit können Ausfallskriterien der umspritzten Bauteile sowohl nach mechanischen und gleichzeitig thermischen Gesichtspunkten erarbeitet werden.

Versuchsdurchführung

Für die nachfolgend dargestellten Untersuchungen wurde ein ungefülltes und ein mit 25 Gew.-% Glasfasern gefülltes Polyamid 66 (Ultramid A3K und Ultramid A3EG5, Fa. BASF, Ludwigshafen) eingesetzt. Die Massetemperatur betrug 280°C, die Werkzeugtemperatur 80°C. Es handelt sich um einen Spritzgießzyklus ohne Nachdruck mit 15 s Kühlzeit, um die Vorgänge während des Einspritzens und Abkühlens detailliert beobachten zu können. Die Untersuchungen wurden auf einer Spritzgießmaschine vom Typ Engel ES 330H / 200V / 80HL (Engel, Schwertberg) mit einem Schneckendurchmesser von 25 mm durchgeführt. Die in den Diagrammen angegebenen Fließfrontgeschwindigkeiten in x-Richtung der Kavität wurden über die Ansprechzeiten zweier baugleicher Drucksensoren (Typ: 6157BAE, Kistler, Winterthur) bestimmt.

Es werden Ergebnisse zum Kraftverlauf in x- und z-Richtung (vgl. Bild 3) gemeinsam mit den Messungen der Werkzeuginnendrucksensoren dargestellt, sowie eine Auswertung der maximalen Kräfte in Fließrichtung ($F_{x,max}$, vgl. Bild 3) bei unterschiedlichen Fließfrontgeschwindigkeiten.

Ergebnisse

Die Diagramme in Bild 4 und Bild 5 zeigen exemplarisch, welche Messergebnisse und Informationen über die in einer Schmelze wirkenden Kräfte mit der Sensortechnik erzielt werden können. In Bild 4 sind die Kraftverläufe in Fließrichtung (F_x) und senkrecht (F_z) dazu gemeinsam mit dem Verlauf dem Druckverlauf in der Kavität dargestellt. Es zeigt sich ein sehr starker Ausschlag der Kraft senkrecht zur Bauteiloberfläche (F_z). Synchron dazu kommt es zu einem geringeren Kraftpeeks in Fließrichtung (F_x) der Schmelze.

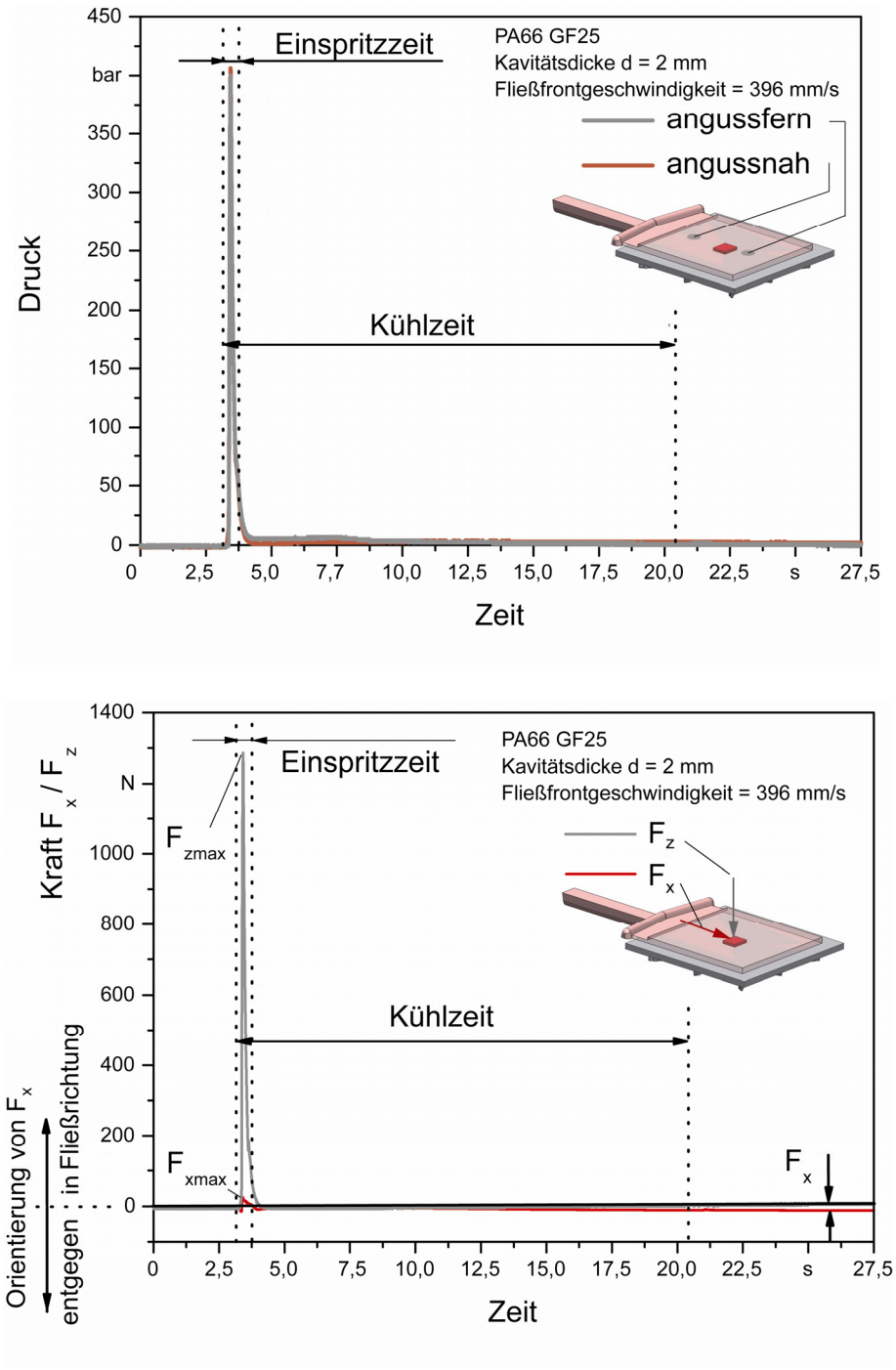

Bild 4: Simultan bestimmte zeitliche Druck- und Kraftverläufe

oben: Druckverlauf (angussnah und angussfern) im Werkzeug gemessen über Drucksensoren

unten: Verlauf der in Fließrichtung (F_x) und senkrecht dazu (F_z) auf den „Bauelementdummy“ wirkende Kräfte bestimmt über die Kraftmesstechnik

Es fällt dabei auf, dass während des Abkühlens auf das Messelement eine Kraft entgegengesetzt zur Fließrichtung (ΔF_x) entsteht. Deutlich wird dies durch das Abdriften der Kraft (Bild 4, rote Linie) während des Abkühlens in negative Richtung. Diese Kraft ist auf die Schwindung des Kunststoffes zurückzuführen und wird sozusagen „eingefroren“.

Die bisherigen Untersuchungen zum Einfluss der Prozessparameter lassen erkennen, dass durch deren Variation die Ausprägung der Kräfte stark beeinflusst werden kann. Die in Bild 5 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass beispielsweise bei den gewählten Randbedingungen die hohe Einspritz-geschwindigkeit, die in einer hohen Fließfrontgeschwindigkeit resultiert, eine erhöhte maximale Kraft in Fließrichtung (F_{xmax}) zur Folge hat.

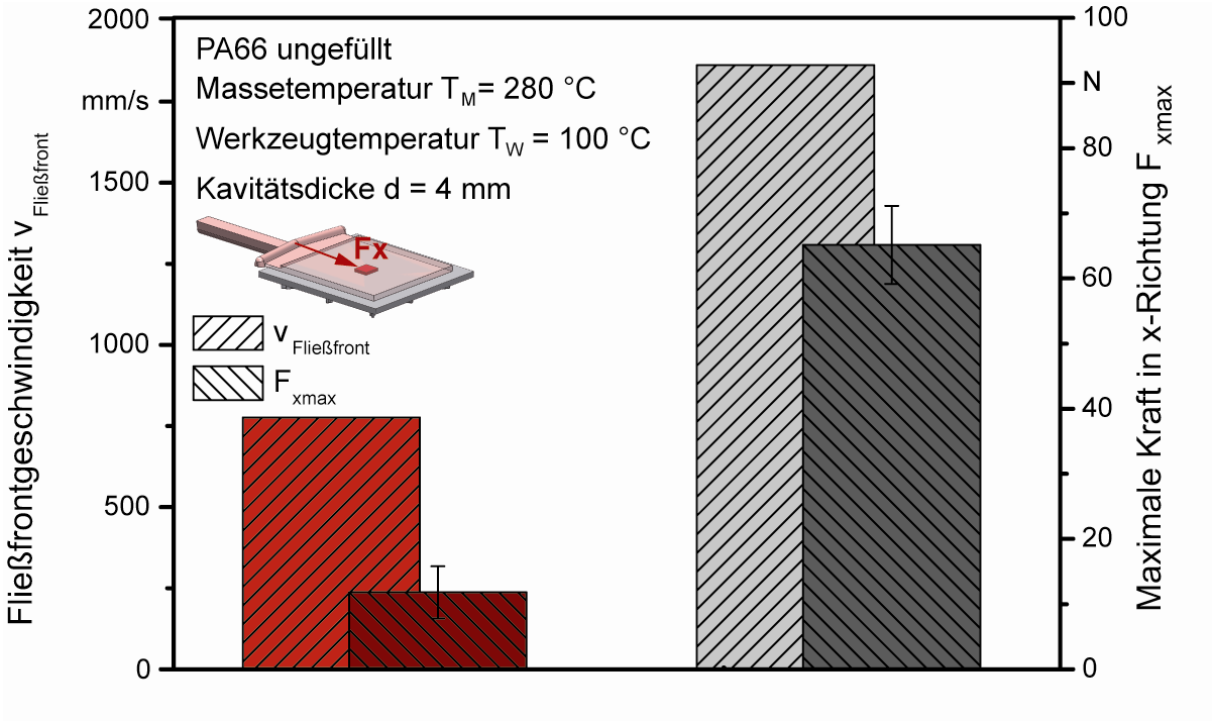

Bild 5: Maximale Kraft in x-Richtung und Fließfrontgeschwindigkeiten bei verschiedenen Einspritzgeschwindigkeiten

Schlussfolgerungen

Das in Bild 4 unten dargestellte Kraftdelta in Fließrichtung (ΔF_x) und daraus resultierende Spannungen können eine „Vorlast“ darstellen und müssen, z. B. bei einer Gebrauchssimulation, mit beachtet werden. Das Schwindungs- und Verzugsverhalten während der Abkühlphase ist somit neben der Belastung in der Füllphase ein weiterer wichtiger zu berücksichtigender Effekt. Er kann das Bauteilversagen gerade unter dynamischer Langzeitbelastung, wie sie etwa durch Temperaturwechsel entstehen, stark beeinflussen.

Der Kraftpeek in Fließrichtung (F_x) während des Füllvorgangs, Bild 4 unten, resultiert aus dem Impulsübertrag der strömenden Schmelze. Der Impuls der Schmelze ist abhängig von deren tatsächlichen Geschwindigkeit und Dichte in der Kavität. So scheint es zunächst offensichtlich, dass eine Steigerung der Einspritzgeschwindigkeit eine Krafterhöhung zur Folge hat, Bild 5. Die Ausbildung der tatsächlichen Fließfront-geschwindigkeit in der Kavität ist jedoch abhängig von Impulsübertrag der Schnecke infolge der Vorschubbewegung auf die Schmelze im Schneckenvorraum, deren

Kompressions- bzw. Expansionsbedingungen und -eigenschaften und nicht zuletzt den Abkühlbedingungen der Schmelze in der Kavität.

Über die weiteren Prozessparameter die beim Spritzgießen variiert werden können, wie der Werkzeug- und Massetemperatur ergeben sich zusätzliche Stellschrauben für eine Prozessoptimierung im Hinblick auf die mechanischen Belastungen bei der Kavitätsfüllung. Durch die Erhöhung der Massetemperatur lässt sich durch eine Reduzierung der Viskosität eine geringere Belastung erwarten, jedoch ist davon auszugehen, dass sie auch eine Erhöhung der Schwindung zur Folge hat. Diese kann wie gezeigt ebenso zu einer Belastung der umspritzten Strukturen führen und stellt zudem eine bleibende Last dar. Einen wichtigen Parameter bei der Schwindungsreduktion stellt der Nachdruck dar. Jedoch ist auch hier davon auszugehen, dass der Druck und ggf. Effekte einer vorhandenen Schmelzeströmung während der Nachdruckphase Kräfte auf die Bauelemente bedeuten, die zu deren Schädigung führen können.

Typische Ausfallursachen von umspritzten elektronischen Komponenten, Bild 6, wie die Rissbildung oder das Abkippen von Bauelementen können direkt mit den wirkenden Kräften in Verbindung gebracht werden. Betrachtet man sich die in Bild 6 links oben dargestellte Einbausituation eines gelöteten Widerstandes, so sieht man, dass der unter dem Bauteil vorhandene Hohlraum beim Überspritzen nicht zwangsläufig mit Schmelze gefüllt wird. Die von der Schmelze ausgeübte Kraft in z-Richtung führt somit zu einer beim Biegebalken ähnlichen Belastungssituation. Bei großflächigen Bauelementen und/oder hohen Drücken kann dies eine mögliche Ursache für eine Rissbildung im Bauelement, wie in Bild 6 links unten dargestellt, gesehen werden. Ebenso können entsprechende geometrische Rahmen- und Prozessbedingungen zu hohen Kräfte bzw. Momenten in Fließrichtung führen und dadurch das zum Abkippen von Bauelementen bewirken, Bild 6 rechts.

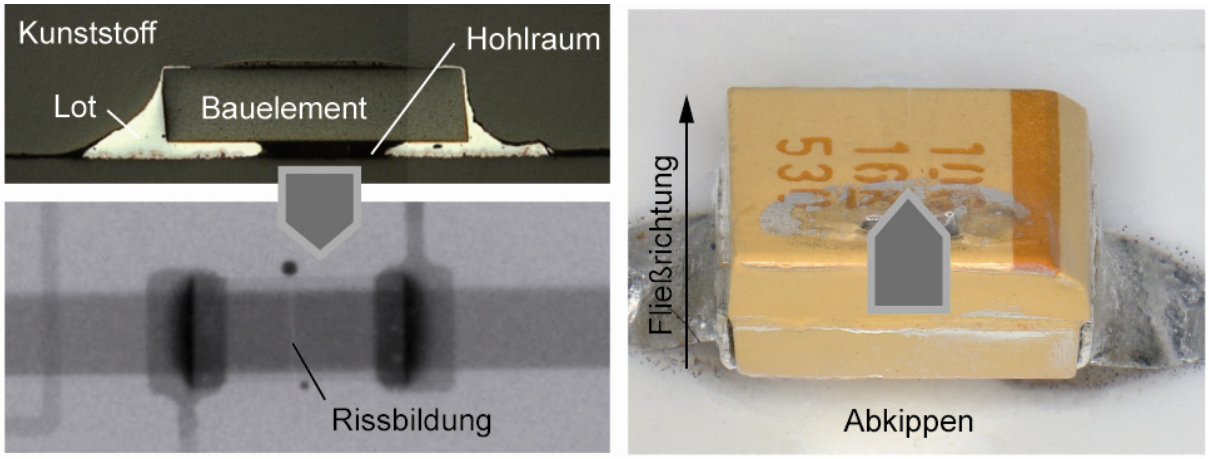

Bild 6: Mögliche Ausfallursachen von im Spritzgießprozess überspritzten Bauelementen mit Bezug zur mechanischen Belastung

links: Hohlraum unter dem Bauelement (Anschliff, oben) und Rissbildung im Bauelement (Röntgenbild, unten)

rechts: Abkippen eines Bauelements vom Substrat

Zusammenfassung und Ausblick

Um eine Vorhersage der optimalen Fertigungsbedingungen tätigen zu können, ist es notwendig, eine zweigeteilte Prozessbewertung durchzuführen. Nicht nur die Kräfte sondern vor allem deren Einwirkzeitpunkt- und dauer dürfen als zentrale Einflussfaktoren genannt werden. Während Bauteile vor allem aufgrund der geometrischen Randbedingungen wie einer schlechten Positionierung bzw. nicht ausreichender Befestigung auf den kurzzeitig, hohen Kraftpeak in Fließrichtung mit Versagen im Prozess reagieren, so werden die durch die zwar geringen, aber lang einwirkenden und durch Erstarren des Kunststoffes in der Baugruppe eingefrorenen Spannungen, das Versagensverhalten im Langzeitgebrauch zentral beeinflussen.

In der Schnittmenge zwischen möglichst geringer Kurzzeitbelastung durch Schmelzeströme und -drücke im Prozess und niedriger Langzeitbelastung durch die Schwindung und thermische Dehnung müssen die idealen werkstofflichen, geometrischen und prozesstechnischen Rahmenbedingungen ermittelt werden, was auf Basis der entwickelten Prozesstechnik in weiteren Untersuchungen geschehen soll. Diese Informationen können zum einen zur Erarbeitung von Gestaltungs- und Verarbeitungshinweisen für die praktische Anwendung herangezogen werden. Zum anderen können damit bislang unzugängliche Kenndaten generiert werden, die eine Bewertung und evtl. Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit von Spritzgieß-simulationsprogrammen erlaubt.

InfoDIRECT

- Der Lehrstuhl für Kunststofftechnik informiert auf seiner Website (www.lkt.techfak.uni-erlangen.de) über aktuelle Forschungsarbeiten im Bereich Kunststoffe in der Mechatronik
- Weitere Informationen zur MID-Technologie und Möglichkeit zum Engagement für Interessierte bietet die 3-D MID e.V. Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen (www.3d-mid.de)