# Schwindung und Verzug glasfaserverstärkter Thermoplaste lassen sich berechnen



Weiterentwickelte Berechnungsprogramme bieten heute die Möglichkeit, den Spritzgießprozess – auch bei glasfaserverstärkten Kunststoffen – zu simulieren. Die Orientierung der Fasern im Spritzgussteil lässt sich in Abhängigkeit von den Verarbeitungsbedingungen und der Werkzeuggeometrie berechnen. Hieraus werden die richtungsabhängigen Schwindungswerte und anisotrope Materialeigenschaften wie E-Modul und Wärmeausdehnungskoeffizient ermittelt. Mit diesen Daten kann der Verzug vorausberechnet werden, wie an einem Praxisbeispiel gezeigt wird.

Glasfaserverstärkte Kunststoffe dringen aufgrund ihrer besseren mechanischen Eigenschaften zunehmend in Anwendungsbereiche vor, die bislang den traditionellen Werkstoffen (Stahl, Aluminium) vorbehalten waren. Allerdings muss der Anwender die durch Glasfasern erreichten Verbesserungen mit einer höheren Verzugsneigung erkaufen. Dies gilt es bei der Auslegung von Bauteil und Werkzeug zu berücksichtigen.

Da Änderungen eines fertigen Werkzeuges mit erhöhtem Kosten- und Zeitaufwand verbunden sind, werden schon seit Längerem in der Planungsphase rheologische, thermische und mechanische Berechnungen von Werkzeugen und Formteilen durchgeführt.

Neuentwickelte Programmmodule bieten die Möglichkeit, schon im Vorfeld Verzug und seine Ursachen zu erkennen. Durch Änderung der Formteilgeometrie, des Angusssystems und des Kühlsystems lassen sich Verzugseffekte weitgehend beherrschen.

Im Folgenden werden Faktoren, die Schwindung und Verzug beeinflussen, zusammengestellt. An einem Praxisbeispiel werden die Funktionsweise und die Ergebnisse der Programme erläutert.

**Schwindung und Verzug haben viele Ursachen**

Die Einflussgrößen auf das Schwindungs- und Verzugsverhalten von thermoplastischen Spritzgussteilen sind sehr vielfältig. Ihr gegenseitiges Zusammenwirken ist komplex und oftmals nicht einfach vorauszusagen. Die Einflussgrößen lassen sich in drei Gruppen unterteilen (Bild 1):

– Material
– Formteilgeometrie
– Prozess

Die Berechnungsprogramme berücksichtigen diese Größen und ihren Einfluss auf die Schwindung und den Verzug.

Der Prozess lässt sich durch die Vorgabe von Einspritzzeiten, Einspritz- und Nachdruckprofilen sowie anderen Verarbeitungsparametern (Massetemperatur, Werkzeugtemperatur und dergleichen) beschreiben.

Die in Bild 2 dargestellten qualitativen Zusammenhänge zwischen diesen Prozessgrößen und dem Schwindungsverhalten können berechnet werden.

| **Material** | **Formteilgeometrie** | **Prozess** |
|---|---|---|
| • p-, v-, t-Verhalten | • Wanddicken/-verhältnisse | • Nachdruckhöhe |
| • Viskosität | • Fließweglängen | • Nachdruckprofil |
| • Temperaturleitfähigkeit | • Materialanhäufung | • Massetemperatur |
| • Mechanische Kennwerte | • Ecken | • Wandtemperatur |
| • Kristallinität | • Anschnittlage | • Kühlzeit |
| • Füllstoffe | | |

**Schwindung/Verzug**

**Bild 1: Einflussgrößen Schwindung und dem Verzug von thermoplastischen Spritzgussteilen [1]**

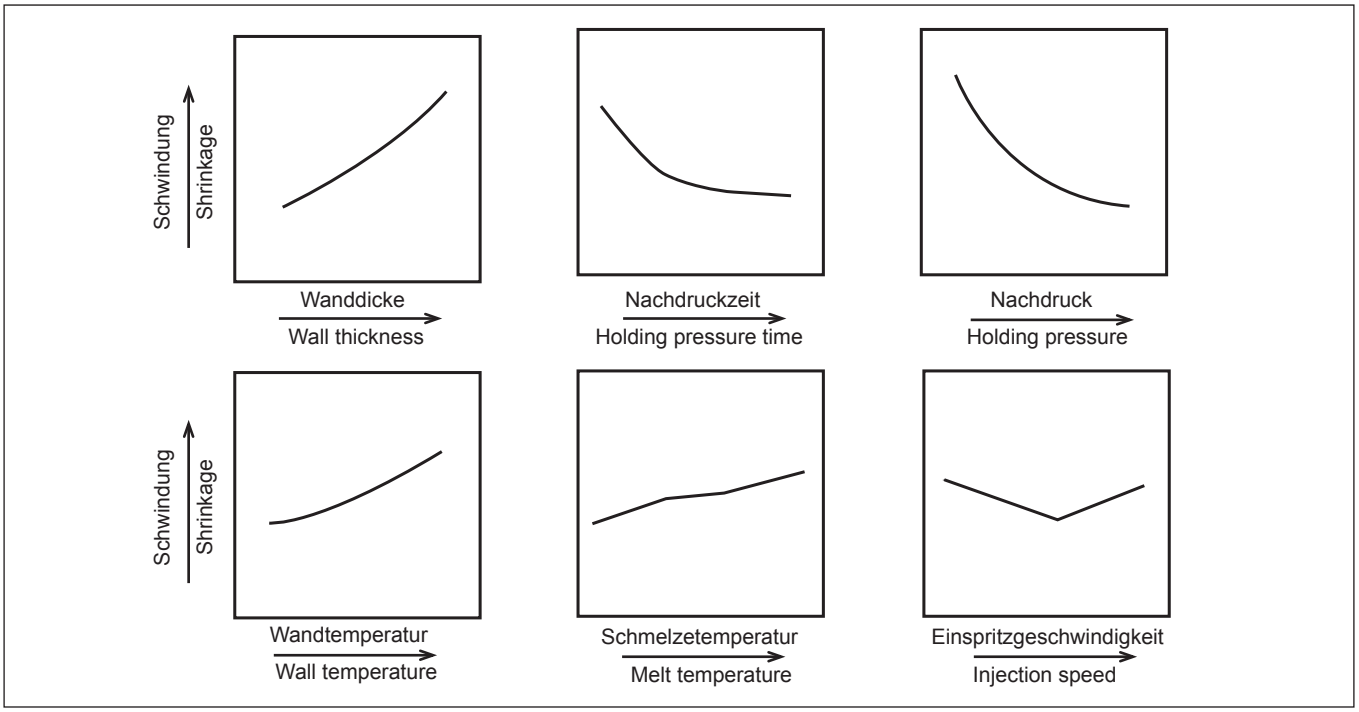



**Bild 2: Qualitative Zusammenhänge zwischen den einzelnen Prozessgrößen und dem Schwindungsverhalten**

Die Temperierverhältnisse werden dabei durch die Simulation der Werkzeugkühlung erfasst. Effekte wie die in Bild 3 links dargestellte Verformung durch eine inhomogene Temperaturverteilung werden richtig vorausgesagt.

Die Formteilgeometrie wird durch Wanddicken, Fließweglängen, Durchbrüche sowie Rippen u. a. beschrieben. Auch die Anschnittlage und -gestalt sowie die Angussart (Kaltkanal, Heißkanal, Tunnelanguss, Stangenanguss usw.) lassen sich modellmäßig berücksichtigen. Hierdurch werden die Einflüsse der Formteilgeometrie auf den Verzug in die Gesamtbetrachtung mit aufgenommen. Formteilrippen beispielsweise können den Verzug eines Formteils stark beeinflussen. Bild 3 rechts zeigt hierzu qualitativ den Verzug eines Formteils mit der Rippe. Die unterschiedlichen Wanddicken von Rippe und Grundfläche und die damit verbundenen unterschiedlichen Abkühlverhältnisse führen zu unterschiedlichen Schwindungen in Rippe und Grundfläche. Das Resultat ist bei unverstärkten Thermoplasten der dargestellte Formteilverzug.

Der zu verarbeitende Kunststoff, das Material, wird durch Stoffgesetze aus der Rheologie (Fließen) und der Thermodynamik (Wärmeaustausch) in die Rechnung mit einbezogen. Dazu werden die vom Rohstoffhersteller gemessenen rheologischen Daten und thermischen Kenngrößen (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Fließgrenztemperatur, Kristallisationstemperatur) benötigt.

Zudem wird das pvt-Verhalten, d. h. die Abhängigkeit des spezifischen Volumens von Druck und Temperatur, erfasst, jedoch oft ohne den Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit. Hieraus wird die Volumenschwindung in den einzelnen Formteilbereichen berechnet.

Neben den hier aufgeführten Einflussgrößen bestimmt bei glasfasergefüllten Thermoplasten die Orientierung dieser Füllstoffe maßgeblich den Verzug. Berechnungsprogramme müssen daher in der Lage sein, die Ausrichtung (d. h. die Orientierung) der Füllstoffe aufgrund des Verarbeitungsprozesses (z. B. Einspritzgeschwindigkeit) und der Formteilgeometrie (Anschnitt, Wanddicken, Durchbrüche vorauszubestimmen.

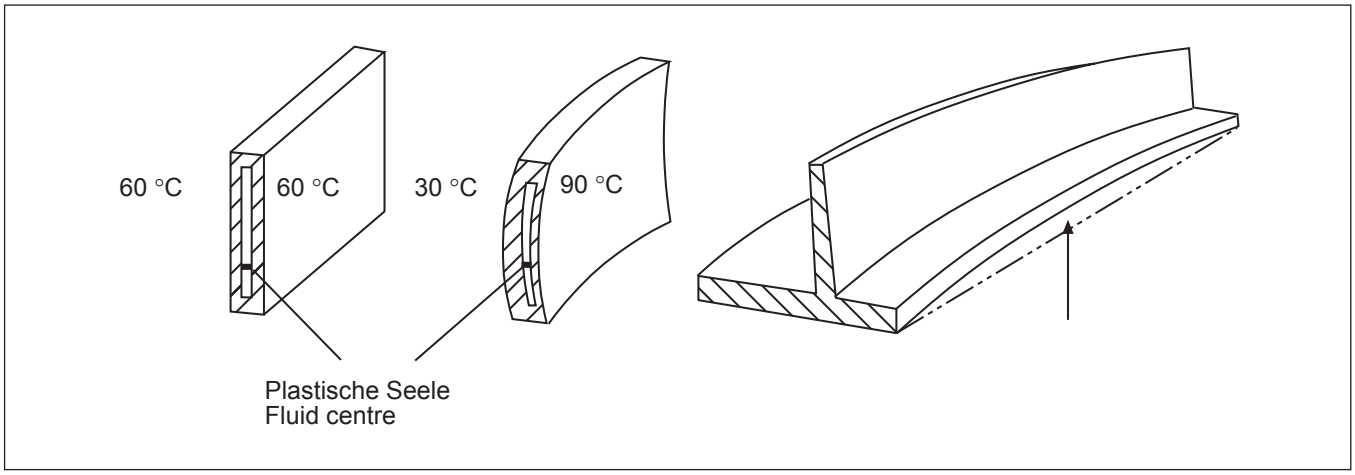



**Bild 3: Verzug einer Platte durch Wandtemperaturdifferenzen (links) und aufgrund eine Rippe mit geringerer Wanddicke (rechts)**

**Die Glasfaserorientierung bestimmt die Bauteileigenschaften**

Die Glasfaserorientierung wird im Werkzeughohlraum von den dort herrschenden Strömungsverhältnissen bestimmt. Man findet nicht nur unterschiedliche Orientierungszustände in verschiedenen Formteilbereichen, sondern auch im Formteilquerschnitt selbst.

Betrachtet man die Glasfaserorientierung an einem einfachen Formteil (z. B. Rechteckplatte mit Filmanguss), findet man im Allgemeinen drei verschiedene Zonen der Orientierung im Formteilquerschnitt (Bild 4).

Bild 4 links zeigt die Zusammenhänge. In der mittleren Schicht geht der Geschwindigkeitsgradient gegen null, somit auch die Schergeschwindigkeit. In der Scherzone ist das Geschwindigkeitsgefälle besonders groß. Die Faser wird sich aufgrund der unterschiedlichen Kräfte, die an ihr wirken, parallel zur Fließrichtung ausrichten. In der Regel gilt die Schichtaufteilung 2 x 2,5 % Randschicht, 2 x 40 % Scherzone und 15 % Mittelschicht [2]. Diese hängt u. a. von der Einspritzgeschwindigkeit und der Wanddicke sowie der Viskosität der Schmelze ab. Mit abnehmender Viskosität verringert sich die Dicke der Mittelschicht.

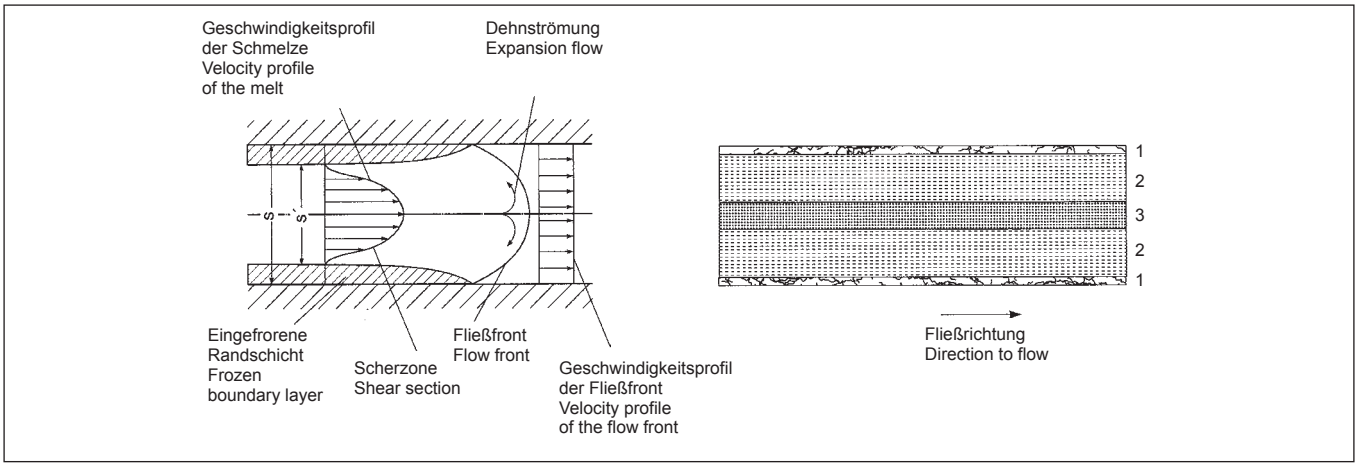



**Bild 4: Strömungsverhältnisse in einer Thermoplastschmelze (links) und Zonen verschiedener Orientierungen über den Fließquerschnitt (rechts) [2]**

In der Wandhaftungszone (1) findet man eine Mischorientierung. In der Scherzone (2) sind die Fasern parallel zur Fließrichtung ausgerichtet, während sie in der Mittelschicht (3) senkrecht zu ihr stehen [2]. Sowohl die Fasern der Scherzone als auch die der Mittelschicht liegen parallel zur Formteiloberfläche. Diese Verteilung der Glasfasern wird durch die Tatsache begründet, dass Schergeschwindigkeit und Dehnströmung einen entscheidenden Anteil an dieser Verteilung haben.

Berechnungsprogramme bieten die Möglichkeit, die Glasfaserorientierung in mehreren Schichten über den Querschnitt vorauszusagen. Bild 5 zeigt die berechnete Glasfaserorientierung für einen stirnseitig angespritzten Zugstab nach DIN 53 457 aus PBT-GF 20.

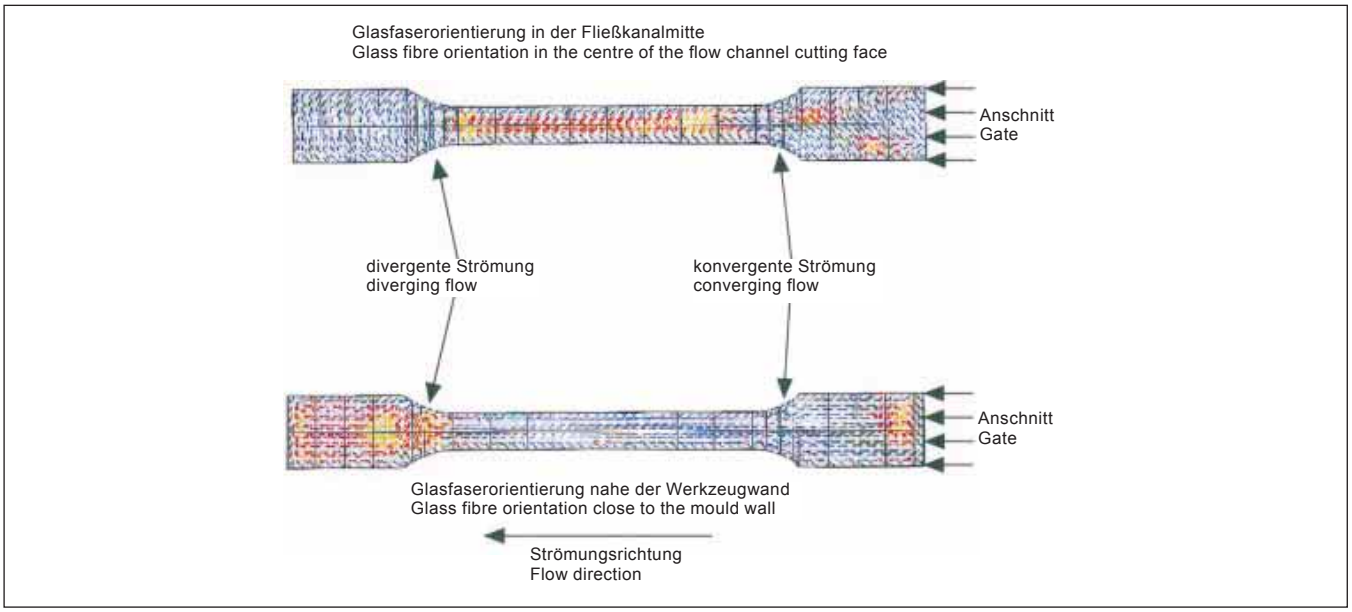



**Bild 5: Glasfaserorientierung in einem Zugstab (Programm: Autodesk Moldflow)**

Die Unterschiede der Faserorientierungen in den einzelnen Schichten werden gut wiedergegeben. In der Mittelschicht (oben) liegen die Glasfasern schwachorientiert quer zur Strömungsrichtung, in der Scherzone (unten) liegen sie hochorientiert in Fließrichtung. Diese in Fließrichtung orientierten Fasern sind entscheidend für das Verzugsverhalten. Daneben findet man in beiden Schichten auch die typische Glasfaserorientierung, wie sie aufgrund der konvergenten Strömung (Fließkanal verengt sich) und aufgrund der divergenten Strömung (Fließkanal weitet sich – Dehnströmung) vorliegt.

Anhand der Glasfaserorientierung werden neben den richtungsabhängigen Schwindungswerten auch die richtungsabhängigen E-Moduln berechnet (Bild 6). In den hochorientierten Bereichen (Übergang von der rechten Schulter zum schmalen Mittelbereich) findet man die höchsten E-Modul-Werte vor (ca. 7.200 MPa). Der Wert stimmt sehr gut mit dem für dieses Material im Zugversuch gemessenen E-Modul-Wert überein. E-Modul-Verteilung und Glasfaserorientierung zeigen auch die mögliche „Schwachstelle“ des Zugstabs deutlich: Sie liegt im divergenten Strömungsbereich.

**Anwendungsbeispiel Toasterabdeckung**

Die eingangs gezeigte Toasterabdeckung aus PBT-GF wird in der oberen, rechteckigen Öffnung über einen Kaltverteiler zweimal angespritzt. Gut zu erkennen ist der starke Einfall (Verzug) der langen Seitenflächen nach innen. Die Ursache des Verzugs konnte durch Berechnung erkannt und durch geeignete konstruktive Maßnahmen weitgehend eliminiert werden. Bild 7 zeigt links die berechnete Formteilfüllung (Füllzeit ca. 2,5 s) und rechts die berechnete Glasfaserorientierung in der Scherzone. Aufgrund der Werkzeuggeometrie – unterschiedliche Durchmesser der Kaltverteiler, Formteilwanddicken und Zweifachanbindung – ergeben sich ein verstärkter Schmelzefluss über den vorderen Anschnitt und eine Bindenaht in den langen Seitenflächen.

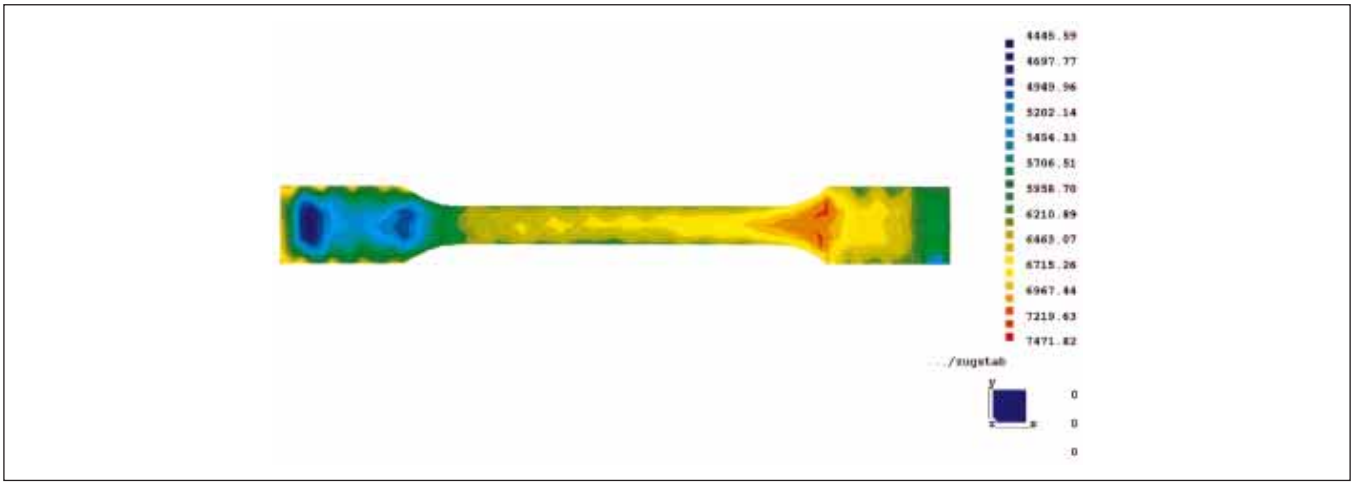



**Bild 6: E-Modul-Verteilung parallel zur Fließrichtung, berechnet nach dem Materialgesetz von Ogorkiewicz-Weidmann-Counto (Programm: Autodesk Moldflow)**

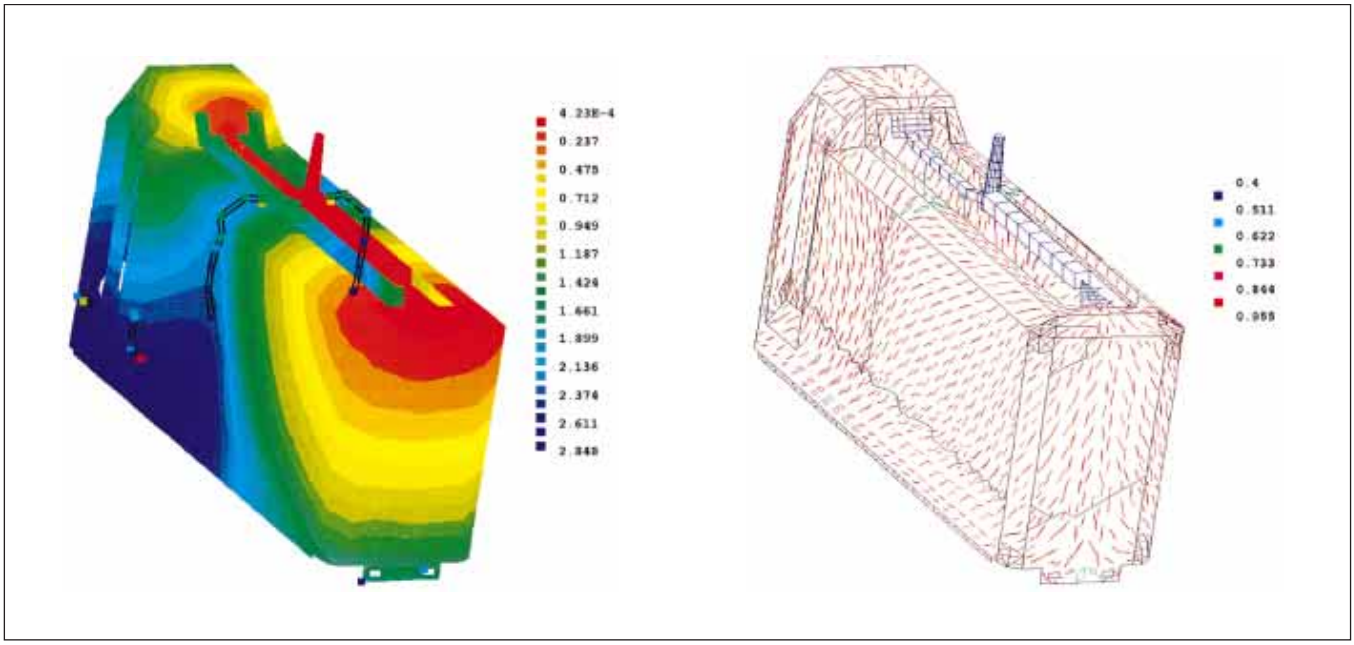



**Bild 7: Berechnete Formteilfüllung (links) und zugehörige Glasfaserverteilung in der Scherzone (rechts), berechnet nach Autodesk Moldflow**

Die Strömungsverhältnisse in der Füllphase und der sich anschließenden Nachdruckphase sind maßgeblich für die Glasfaserverteilung im Formteil. Bild 7 rechts zeigt die berechnete Glasfaserverteilung in einer Scherschicht. In den Seitenflächen liegen die Glasfasern senkrecht nach unten gerichtet (rote „Nadeln“). Am unteren Rand legt sich die Glasfaser erfahrungsgemäß parallel zur Kante an. Diese Orientierungsunterschiede verursachen den Verzug.

Die Wirkungskette von der unterschiedlichen Orientierung (Bild 7) bis zum Verzug (Bild 8) lässt sich wie folgt erklären: Die horizontal liegenden Glasfasern an der Unterkante sorgen für minimale Horizontalschwindung.

Hingegen ist die Horizontalkomponente der Schwindung in der Seitenfläche deutlich höher. Hierdurch wirken auf den Rand Kräfte, die ihn zusammendrücken wollen. Dies bewirkt thermisches Beulen [3]. Ein freigeschnittener Teil des Randes verhält sich ähnlich dem aus der Festigkeitslehre bekannten „Euler-Stab“ (Bild 9).

Unter der Wirkung der Druckkräfte weicht die Unterkante seitlich in die neue Gleichgewichtslage aus. Der Winkelverzug [4] (Wärmespannungen auf der Innenseite) gibt hier nur die Richtung nach innen vor, ist aber nicht, wie gelegentlich geglaubt wird, die Ursache. Die Seitenwand könnte sich ohne diese Richtungsangabe auch nach außen verformen.

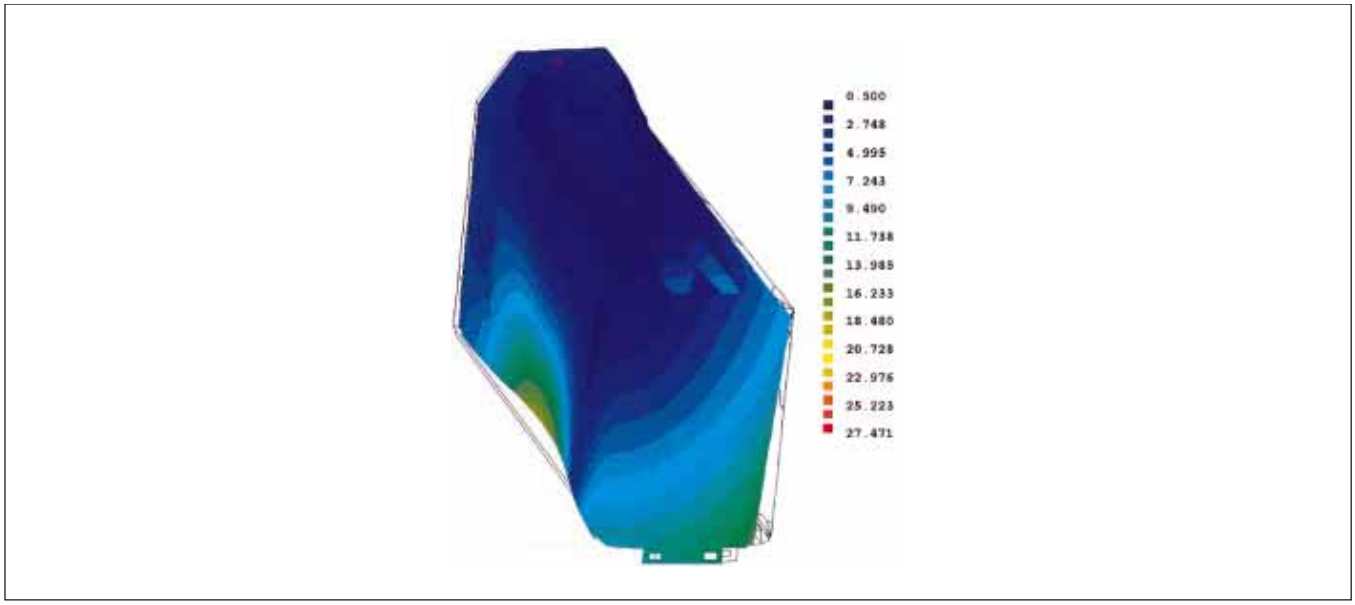



**Bild 8: Mit dem Programm Autodesk Moldflow berechneter Formteilverzug des Ist-Zustands**

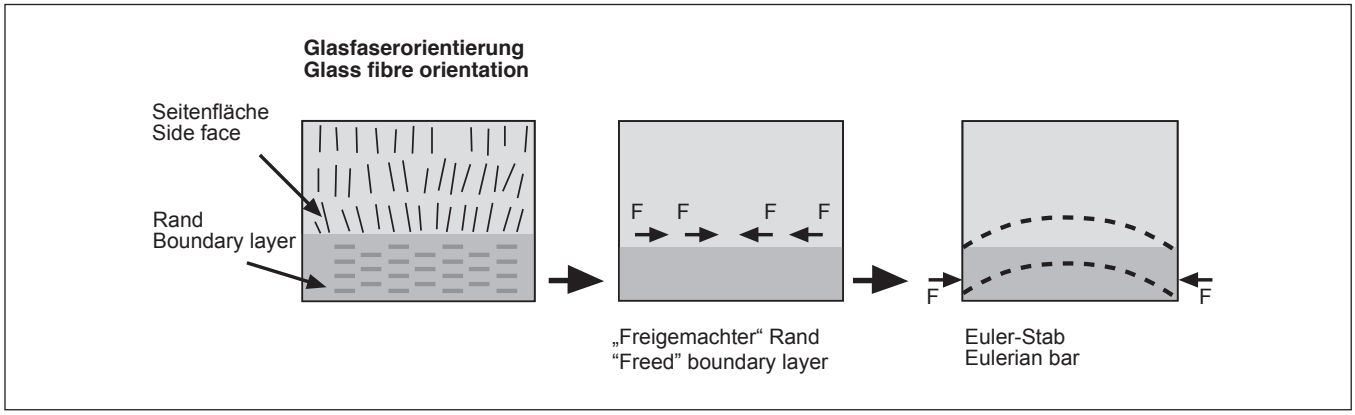



**Bild 9: Analogie zum „Euler-Stab“**

Die Ergebnisse der Berechnungen (Bild 7 und 8) geben Hinweise, wie der Verzug reduziert werden kann: Anschnittverlegung in eine Stirnfläche (Tunnelanguss), Wanddickenerhöhung in der angespritzten Stirnfläche. Hierdurch erfolgen eine rasche Schmelzeausbreitung und eine gleichmäßige Füllung der Seitenwände. Bild 10 zeigt die neu berechnete Formteilfüllung (links) und die berechnete Glasfaserorientierung in der Scherzone (rechts). Die Glasfasern liegen jetzt in den Seitenflächen gleichmäßig längsorientiert. Dies hat zur Folge, dass sich der Verzug (Bild 11) gegenüber der Ausgangssituation (Bild 9) im Maximalwert um mehr als das Fünffache verringert hat.

Das dargestellte Beispiel und viele andere zeigen, dass der heute zur Verfügung stehenden Berechnungsprogramme eine qualitative Vorausberechnung des Formteilverzugs spritzgegossener glasfaserverstärkter Bauteile möglich ist. Vergleiche mit dem tatsächlich vorgefundenen Verzug belegen, dass trotz der den Rechnungen zugrunde liegenden Vereinfachungen diese Simulation befriedigende Ergebnisse liefert. Es gilt aber auch bei diesen Berechnungen, dass erst durch die stetige kritische Durchsicht der Ergebnisse, die genaue Kenntnis der Materialeigenschaften und den engen Bezug zur Praxis die Schwindungs- und Verzugsprogramme zu einer großen Arbeitserleichterung für den Konstrukteur werden und helfen, Kosten zu reduzieren.

Erstausgabe Kunststoffe 81 (1994) 8
Carl Hanser Verlag, Kolbergerstraße 22, 81679 München

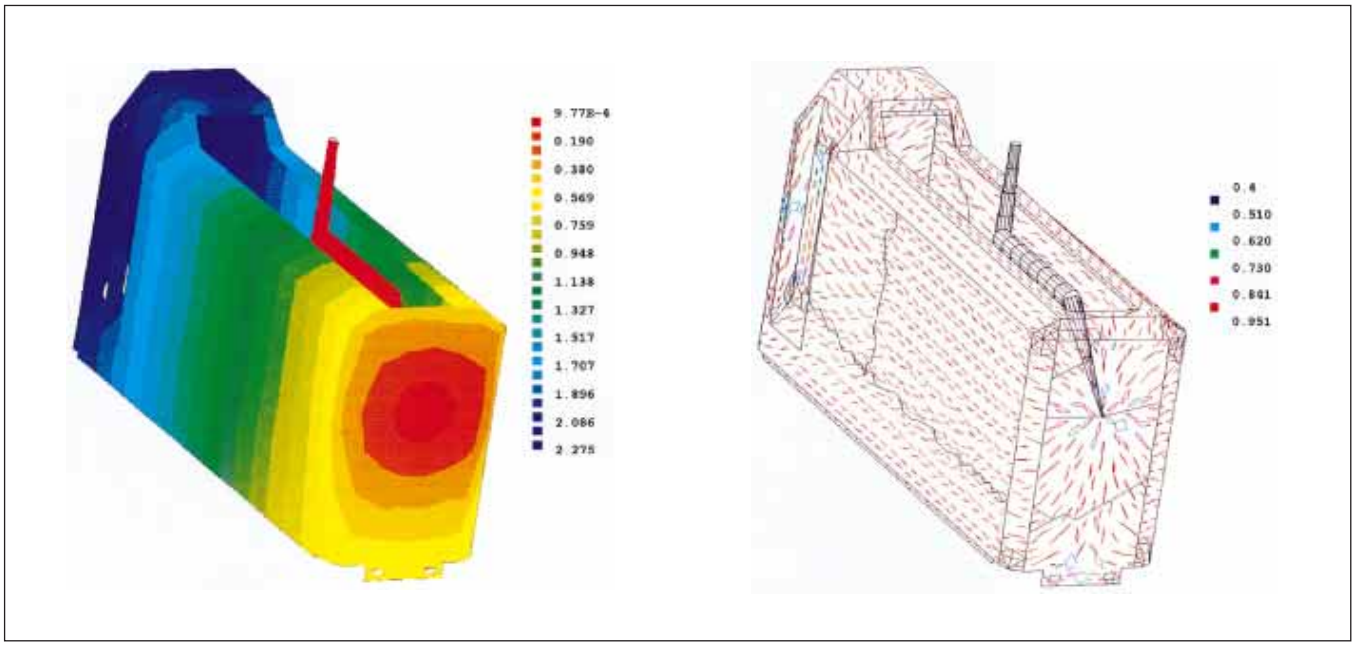



**Bild 10: Formteilfüllung (links) und Glasfaserorientierung (rechts) nach der Werkzeugänderung, berechnet nach Autodesk Moldflow**

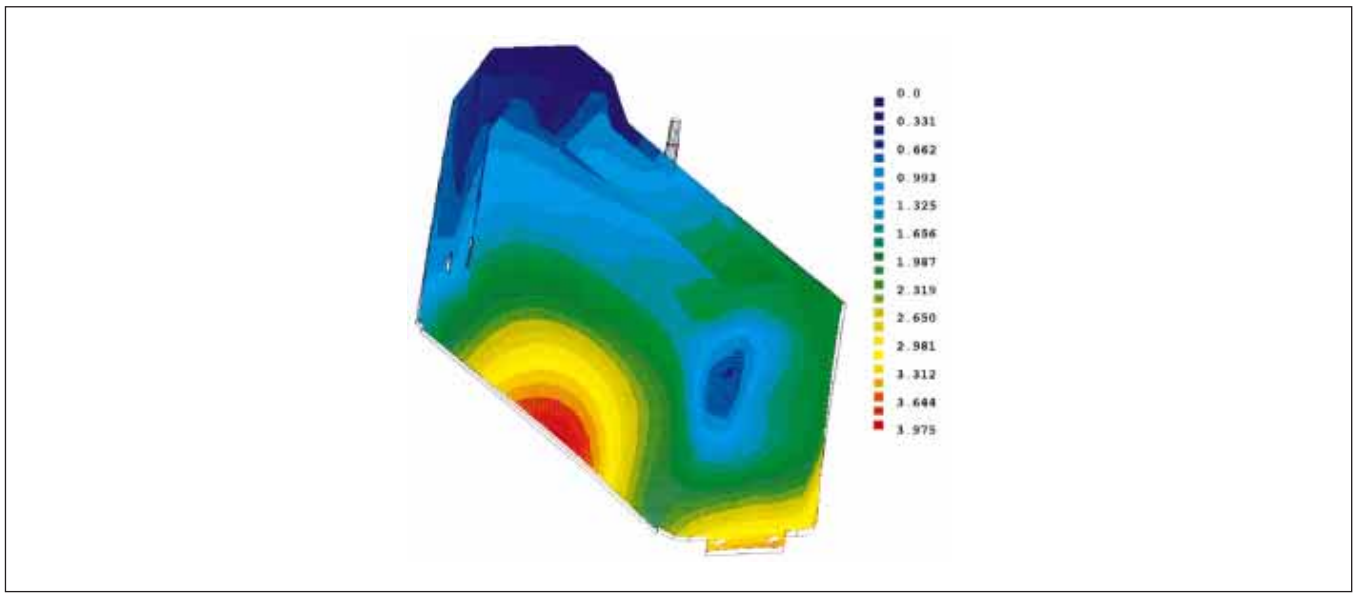



**Bild 11: Berechneter Verzug nach den Werkzeugänderungen, berechnet nach Autodesk Moldflow**

## Literatur


[1] Pötsch, H. G.: Prozeßsimulation zur Abschätzung von Schwindung und Verzug thermoplastischer Spritzgußteile. Diss., RWTH Aachen 1991

[2] Wölfel, U.: Verarbeitung faserverstärkter Formmassen im Spritzgießprozeß. Diss., RWTH Aachen 1988

[3] Kammerer, R.: Relationship between Testing and Computing Methods in Engineering Plastics Applications. ATA-Seminar, Turin 1989

[4] Schauf, D.: Zusammenhänge zwischen Schwindung, Orientierung, Toleranz und Verzug bei der Verarbeitung von Spritzgußteilen. Anwendungstechnische Information, Bayer AG, Leverkusen

[5] Stitz, S.: Sind Schwindung und Verzug berechenbar? Kunststoffe 81 (1991) 10, S. 880 – 885



**Typischer Wert**
Die angegebenen Werte sind typische Werte. Sofern nicht ausdrücklich schriftlich mit uns vereinbart, stellen sie keine garantierten Werte oder Produktspezifikation im Sinne einer vereinbarten Beschaffenheit dar. Die angegebenen Werte können durch Werkzeuggestaltung, die Verarbeitungsbedingungen oder durch die Einfärbung des Produkts beeinflusst werden. Die angegebenen Eigenschaftswerte wurden, soweit nicht anders angegeben, an genormten Prüfkörpern bei Raumtemperatur ermittelt.

Es liegt außerhalb unserer Kontrollmöglichkeiten, wie und zu welchem Zweck Sie unsere Produkte, unsere technische Unterstützung und unsere Informationen (in Wort, Schrift oder durch Produktionsbewertung), einschließlich vorgeschlagener Formulierungen und Empfehlungen, anwenden und einsetzen. Daher ist es unerlässlich, dass Sie unsere Produkte, unsere technische Unterstützung und unsere Informationen selber zu Ihrer eigenen Zufriedenheit daraufhin prüfen, ob unsere Produkte, unsere technische Unterstützung bzw. unsere Informationen für die von Ihnen beabsichtigten Zwecke und Anwendungen geeignet sind. Diese anwendungsspezifische Untersuchung muss mindestens eine Prüfung auf Eignung in technischer Hinsicht sowie im Hinblick auf Gesundheit, Sicherheit und Umwelt umfassen. Derartige Untersuchungen wurden nicht notwendigerweise von uns durchgeführt. Der Verkauf aller Produkte erfolgt – sofern nicht schriftlich anders mit uns vereinbart – ausschließlich nach Maßgabe unserer Allgemeinen Verkaufsbedingungen, die wir Ihnen auf Wunsch gerne zusenden. Alle Informationen und sämtliche technische Unterstützung erfolgen ohne Gewähr (jederzeitige Änderungen vorbehalten). Es wird ausdrücklich vereinbart, dass Sie jegliche Haftung (Verschuldenshaftung, Vertragshaftung und anderweitig) für Folgen aus der Anwendung unserer Produkte, unserer technischen Unterstützung und unserer Informationen selber übernehmen und uns von aller diesbezüglichen Haftung freistellen. Hierin nicht enthaltene Aussagen oder Empfehlungen sind nicht autorisiert und verpflichten uns nicht. Keine hierin gemachte Aussage darf als Empfehlung verstanden werden, bei der Nutzung eines Produkts etwaige Patentansprüche in Bezug auf Werkstoffe oder deren Verwendung zu verletzen. Es wird keine konkludente oder tatsächliche Lizenz aufgrund irgendwelcher Patentansprüche gewährt.

Zum Schutz von Gesundheit, Sicherheit und Umwelt beachten Sie bitte vor Verarbeitung unserer Produkte das betreffende Sicherheitsdatenblatt (MSDS) und sonstige Produktkennzeichnungen.



Covestro Deutschland AG
Business Unit Polycarbonates
D-51365 Leverkusen

plastics@covestro.com
www.plastics.covestro.com