Werkzeugfüllvorgang dünnwandiger Spritzgießteile berechnen

- Wanddicken kleiner 1 mm
- Finite-Element-Differenz-Verfahren
- Gute Praxisannäherung

Die Anwendung rheologischer Berechnungsprogramme bei der Konstruktion von Spritzgussteilen und Spritzgießwerkzeugen ist heute Stand der Technik. Programme dafür sind in den letzten Jahren stetig weiterentwickelt worden. Die jüngste Programmgeneration ermöglicht es durch Aufteilung des Fließkanalquerschnitts in eine Anzahl von Schichten, auch sehr dünnwandige Spritzgussteile zu berechnen. Einfriereffekte lassen sich praxisgerecht simulieren (diese Effekte spielen besonders bei dünnwandigen Formteilen eine wesentliche Rolle). Die Möglichkeiten dieser Schichtenprogramme und die Unterschiede zu Berechnungen ohne Schichten stellt dieser Beitrag an einem konkreten Kunststoffteil vor.

Verbesserte Programme …

Neue Programme bieten die Möglichkeit, das Modell über den Querschnitt (d. h. in Scherrichtung) in Schichten zu teilen. Damit lassen sich u. a. die Temperaturprofile über dem Fließkanalquerschnitt und somit die Dicke von eingefrorenen Randschichten exakter erfassen. Dieses Berechnungsschema kombiniert die Finite-Elemente-Methode (FEM) mit dem Finite-Differenzen-Verfahren: Beim Berechnen der Größen Temperatur, Schergeschwindigkeit, Viskosität und Fließgeschwindigkeit werden nicht nur die Unterschiede längs des Fließwegs, sondern auch über dem Querschnitt berücksichtigt.

Konventionelle Berechnungsprogramme beschreiben mit Hilfe der FEM und mit Schalenelementen den Füllvorgang von thermoplastischen Formteilen. Dabei ist das Berechnen von Temperaturspitzen und Einfriereffekten nur bedingt möglich. Typisch für Schalenelemente war es bislang, dass man nur mit über die Wanddicke gemittelten Werten für Temperaturen, Viskositäten und Schergeschwindigkeiten gerechnet hat. Bei Formteilen mit sehr geringer Wanddicke oder mit großen Wanddickensprüngen (z. B. Formteilen mit Filmscharnier) ist eine Vorausberechnung des Füllvorgangs dann nur sehr ungenau möglich. Bereiche mit geringer Fließgeschwindigkeit der Schmelze und mit Einfriereffekten der Randschichten treten bei solchen Artikeln in der Praxis auf, konnten aber kaum erfasst werden.

… mit dem Finite-Differenzen-Verfahren …

Neuere Berechnungsprogramme kombinieren die FEM mit dem Finite-Differenzen-Verfahren. Dazu wird die Wanddicke des Fließkanals in eine bestimmte Anzahl von Schichten geteilt. In jeder Schicht werden Temperatur, Schergeschwindigkeit und Viskosität berechnet. Dabei ergibt sich z. B. für die Temperatur in jeder Schicht ein anderer Wert. Er wird unter Berücksichtigung der Wärmeleitung zu Nachbarschichten bzw. zur Werkzeugwand sowie der Erwärmung durch Scherung ermittelt.

Der Wärmeübergang zur Werkzeugwand wird oft mit einer speziell definierten Übergangsschicht berechnet. Der weitere Wärmetransport von der Werkzeugoberfläche zum Kühlkanal kann durch die Einteilung des Abstands zwischen Kühlkanal und Werkzeugoberfläche in zusätzlichen Schichten berücksichtigt werden (Bild 1). So lassen sich Lage und Abstand der Kühlkanäle zur Werkzeugoberfläche in die Berechnung einbeziehen. Dies ergibt genauere Aussagen über Fließgeschwindigkeiten und Einfriereffekte.

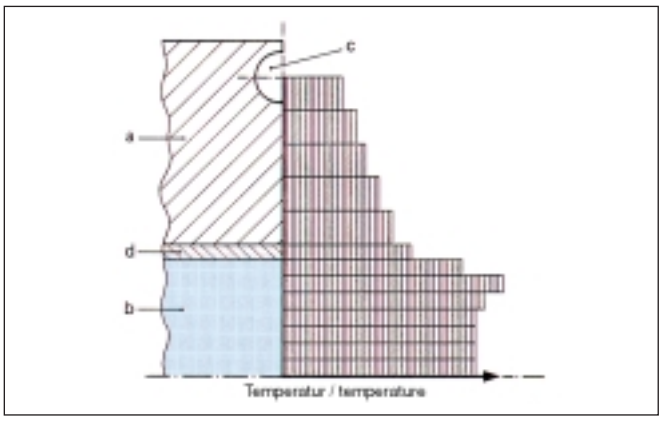


Bild 1: Schichtenmodell für Formteil und Werkzeug für rheologische Berechnungen beim Spritzgießen;
a: Werkzeug,
b: schmelzegefüllte Kavität,
c: Kühlkanal,
d: Schicht zur rechnerischen Erfassung des Wärmeübergangs von der Schmelze zum Werkzeug

… führen zu genaueren Ergebnissen

Der Füllvorgang beansprucht die Schmelze im Düsenangusssystem sowie in der Kavität mechanisch und thermisch stark. Die Haupteinflussgrößen sind

– die Düsen- und Angussgeometrie,
– die Formteilwanddicke,
– die Füllgeschwindigkeit,
– die Temperatur der Formmasse und
– die Werkzeugwandtemperatur.

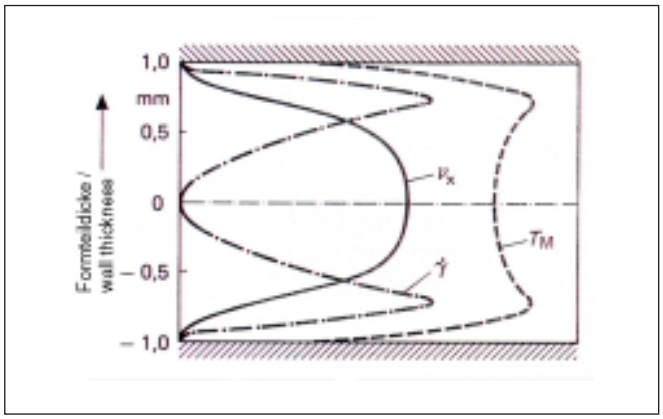


Bild 2: Qualitativer Verlauf von Geschwindigkeit vx, Schergeschwindigkeit und Temperatur T_M über dem Formteilquerschnitt

Im Formteilquerschnitt hat die Geschwindigkeit das für strukturviskose Flüssigkeiten charakteristische abgeplattete Profil in der Kanalmitte (Bild 2). Die Schergeschwindigkeit weist in den randnahen Schichten (hoher Geschwindigkeitsgradient) ein Maximum auf. Die Temperaturverteilung kann ebenfalls ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes Maximum haben. Ihr Verlauf ergibt sich aus der Wärmeableitung zur Kanalwand und der Wärmezufuhr durch Friktion und innere Reibung. Der Einfluss der Scherwärme kann bei kleinen Durchmessern oder Wanddicken, niedrigen Massetemperaturen und hohen Fließgeschwindigkeiten von großer Bedeutung sein, sie kann ausgeprägte Temperaturspitzen hervorrufen.

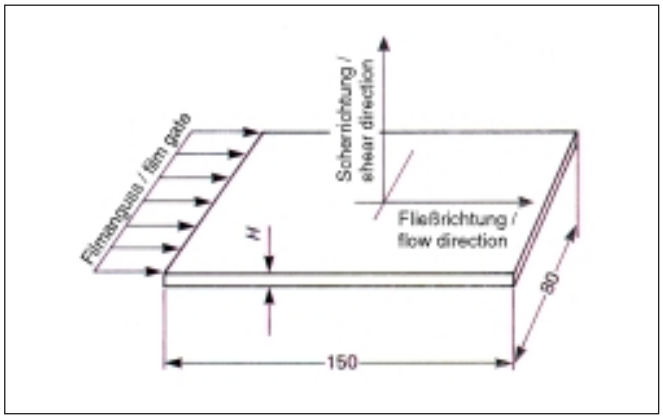


Bild 3: Geometrie des Plattenwerkzeugs für rheologische Modellrechnungen

Ein plattenförmiges Formnest (Bild 3) zeigt den Einfluss von Massetemperatur und Wanddicke auf den Verlauf von Schergeschwindigkeit und Temperatur. Die dargestellten Ergebnisse sind mit einem Finite-Differenzen-Programm berechnet. Den Einfluss verschiedener Massetemperaturen auf den Temperaturverlauf bei gleicher Füllzeit zeigt Bild 4. Das Temperaturmaximum ist bei niedriger Massetemperatur stärker ausgeprägt als bei hoher Massetemperatur. Bei der kleineren Temperatur ist die Viskosität und damit die in die Schmelze eingebrachte Scherenergie höher. Die Maximaltemperaur wächst mit steigender Massetemperatur [1].

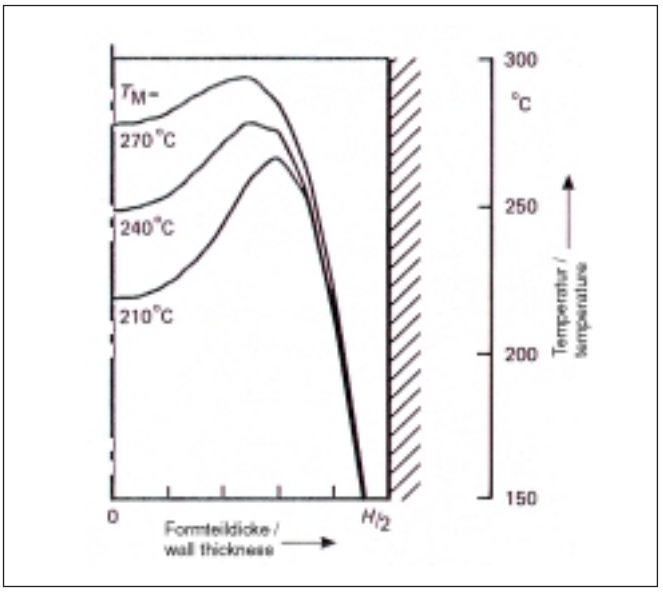


Bild 4: Einfluss der Massetemperatur T_M auf das Temperaturprofil im Fließkanal (Programm: Moldflow MFLP, Werkstoff: ABS, Typ Novodur P2MT, Verarbeitungsbedingungen: Werkzeugtemperatur 60 °C, Füllzeit 0,4 s)

In Bild 5 ist der Einfluss der Formteildicke auf das Temperatur- und Schergeschwindigkeitsprofil dargestellt. In der linken Bildhälfte beträgt die Wanddicke 3 mm, in der rechten 1 mm. Die Füllzeit ist in beiden Fällen gleich groß. Im dünnwandigen Bereich ist durch die stärkere Scherung die Temperaturerhöhung ungefähr doppelt so groß. Trotz höherer Maximaltemperatur ist die über den Querschnitt gemittelte Temperatur wegen der stärkeren Abkühlung beim dünnen Formteil niedriger [1].

Diese Berechnungsmöglichkeiten der Schichtenprogramme erlauben es, die Strömungsverhältnisse in einer Thermoplastschmelze besser als ohne Schichteneinteilung zu beschreiben. Besonders wichtig ist die Schichteneinteilung bei extremen Verarbeitungsbedingungen, bei stark variierenden Fließkanalquerschnitten und vor allem bei geringen Wanddicken. Die Wechselwirkungen zwischen starker Abkühlung und Schererwärmung lassen sich nur durch eine Schichtenberechnung über dem Fließquerschnitt erfassen.

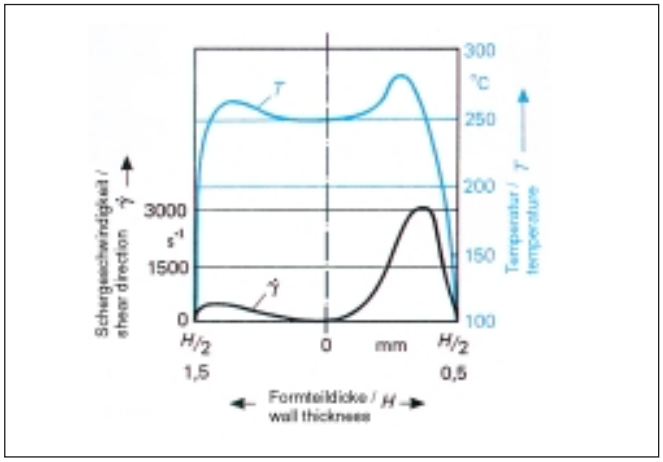


Bild 5: Einfluss der Wanddicke (links 3 mm, rechts 1 mm) auf den Verlauf von Temperatur T und Schergeschwindigkeit (Programm: Moldflow MFLP, Werkstoff und Verarbeitungsbedingungen wie bei Bild 4, Schmelzetemperatur 240 °C)

Zweischalige Steckerleiste mit Filmscharnier

Das Beispiel einer zweischaligen Steckerleiste (Bild 6) aus elastomermodifiziertem Polybutylenterephthalat (PBT) soll die Möglichkeiten eines Schichtenprogramms und die Unterschiede zu konventionellen Programmen darlegen.

Die Steckerleiste besteht aus einem Grundkörper und einem Verschlussdeckel. Beide sind durch ein Filmscharnier verbunden. Die Wanddicke im Grundkörper und im Verschlussdeckel liegt zwischen 0,9 und 1,6 mm. Die Wanddicke im Filmscharnier geht von 0,45 mm an den Übergangsstellen auf 0,3 mm im Mittelbereich des Scharniers zurück. An der oberen und unteren Kante dient ein dünner Verbindungssteg (1 mm Durchmesser) zwischen Grundkörper und Verschlussdeckel zur Ausrichtung in einer Montagevorrichtung. Er wird beim Verschließen der Steckerkammern automatisch zerstört. Die Anbindung liegt an der rechten Stirnseite des Grundkörpers.

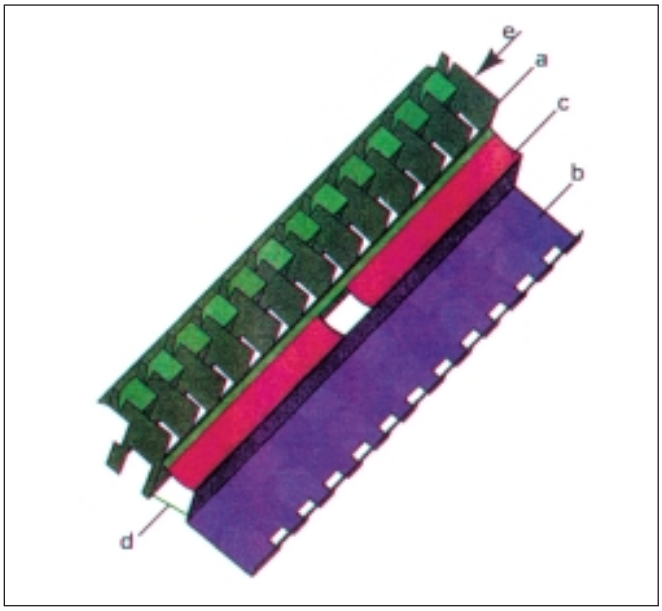
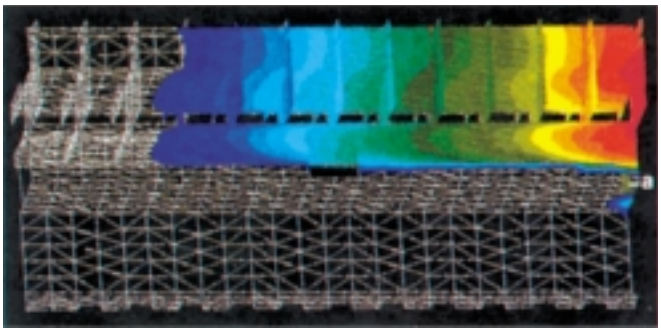


Bild 6: Geometriemodell einer Steckerleiste aus Grundkörper a und Verschlussdeckel b mit einem Filmscharnier c und Verbindungsstegen d; der Anguss e liegt stirnseitig am Grundkörper

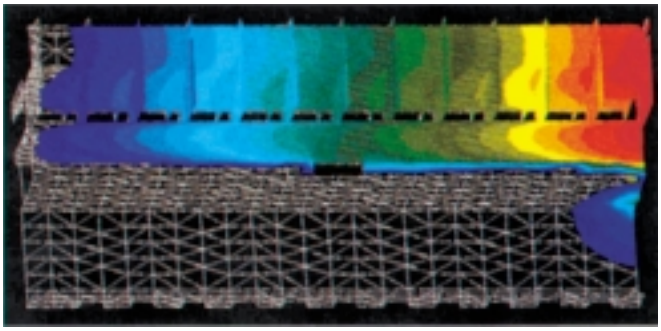
Verlauf des Füllvorganges mit Schichtenberechnung

Bei den Berechnungen ist die Lage der Kühlkanäle im Werkzeug nicht berücksichtigt. Vielmehr wurde eine einheitliche Oberflächentemperatur von 80 °C für das gesamte Formnest angenommen.

Bild 7 A zeigt die berechnete Füllung bei etwa 45 % Füllgrad. Die Schmelze strömt in den Grundkörper und fließt senkrecht hierzu in das Filmscharnier hinein. Gleichzeitig erreicht den Verschlussdeckel eine weitere Schmelzefront durch den rechten Verbindungssteg.



A

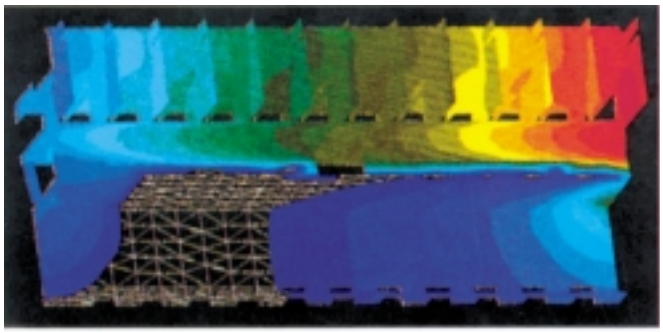


B

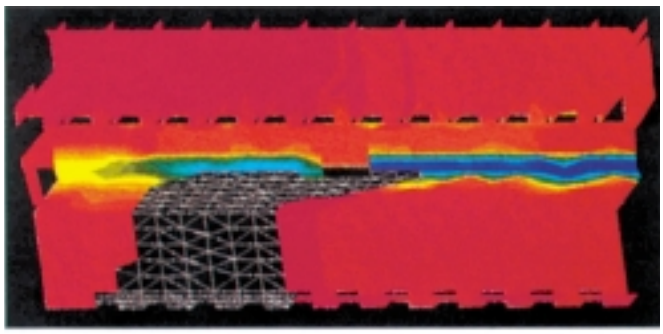
Bild 7: Teilfüllung der Steckerleiste aus Bild 6 bei einem Füllgrad von 45 % (A, am Verbindungssteg a strömt Schmelze zum Verschlussdeckel) bzw. 60 % (B)

In Bild 7 B ist ein Füllgrad von rund 60 % erreicht. Der Grundkörper ist fast ganz gefüllt, der Filmscharnierbereich noch kaum durchströmt. Wegen des hohen Fließwiderstands im Filmscharnier wurde der Grundkörper bevorzugt gefüllt. Dies führt zu einem zeitweiligen Schmelzestillstand im Filmscharnier und zum partiellen Einfrieren der Schmelzefront im Scharnier. Der Verschlussdeckel wird weiter durch den rechten Verbindungssteg gefüllt.

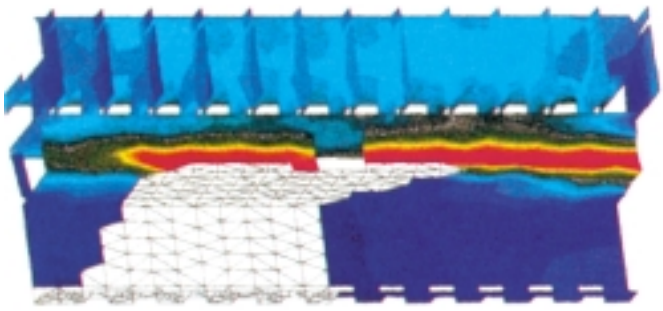
Auch bei einem Füllgrad von 85 % hat die Schmelze den Scharnierbereich noch nicht vollständig durchströmt (Bild 8). Nun strömt auch durch den linken Verbindungssteg Schmelze aus dem Grundkörper in den Verschlussdeckel. Die Temperaturen an den Fließfronten im Filmscharnier sind bis unter die Fließgrenztemperatur abgesunken.



A



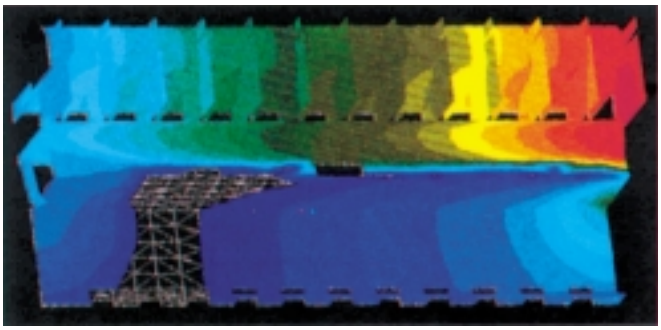
B



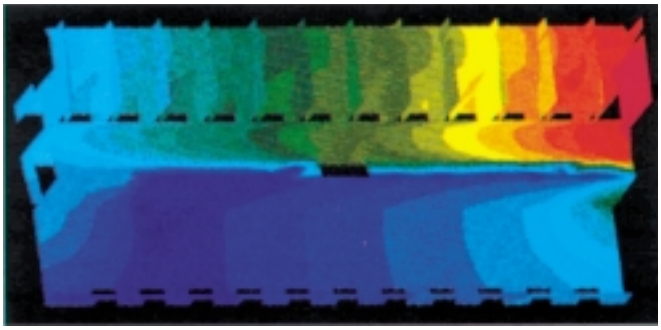
C

Bild 8: Verschiedene Berechnungsergebnisse an der Steckerleiste bei 85 % Füllgrad;
A: berechnetes Füllbild,
B: Temperaturen in der Kanalmitte (blau: 95 °C, Fließgrenztemperatur 210 °C),
C: Anteil der eingefrorenen Randschichten (rot: 100 % des Fließkanals eingefroren)

Die Position der Schmelzefronten im Filmscharnier ist auch bei 95 % Füllgrad unverändert (Bild 9 A). Im linken Filmscharnierbereich bildet sich eine Bindenaht aus bereits erstarrter Schmelze und dem Schmelzestrom, der aus dem Verschlussdeckel in das Scharnier strömt. In der Deckelseitenfläche deutet sich ein Lufteinschluss an. Die vollständige Formteilfüllung (als Berechnungsergebnis) zeigt schließlich Bild 9 B.



A



B

Bild 9: Füllzustand der Steckerleiste bei einem Füllgrad von 95 % (A) bzw. 100 % (B)

Spritzgießversuche bestätigen die Rechnung

Die berechneten Füllstufen stimmen mit den Teilfüllungen im Spritzgießwerkzeug (Bild 10) gut überein. Das starke Bremsen des Schmelzestroms im Filmscharnier, die Entstehung einer Bindenaht im Filmscharnier und das Füllen des Verschlussdeckels fast ausschließlich durch die beiden Verbindungsstege gibt die Rechnung mit dem Schichtenprogramm gut wieder.

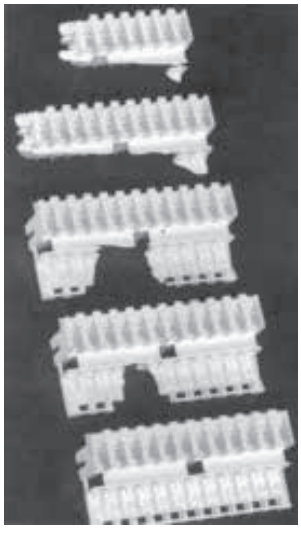
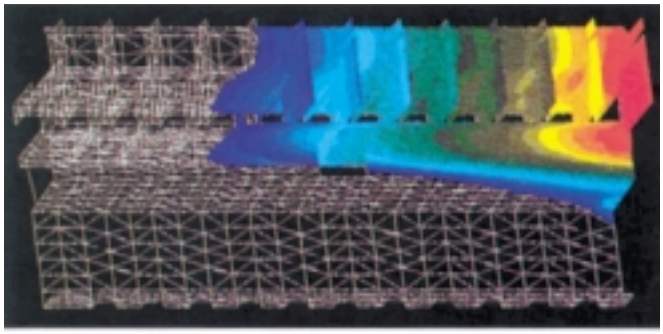
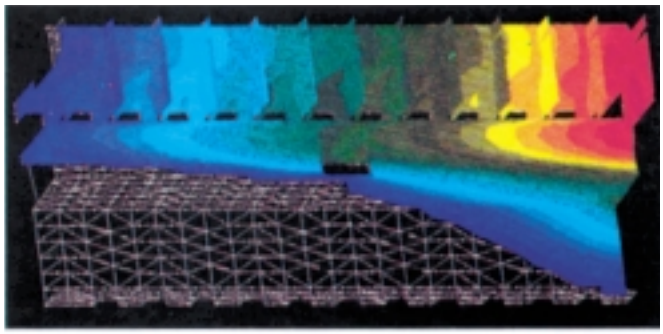


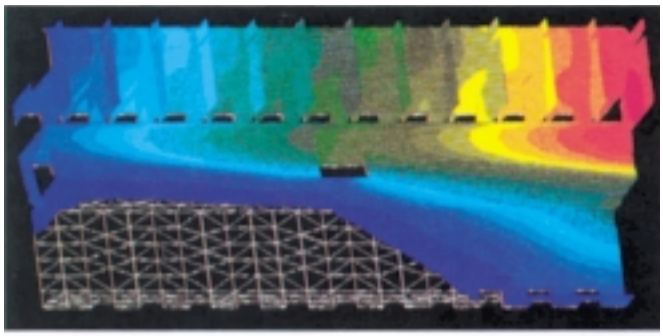
Bild 10: Im Spritzgießversuch ermittelte Teilfüllungen der Steckerleiste bei seitlicher Angusslage



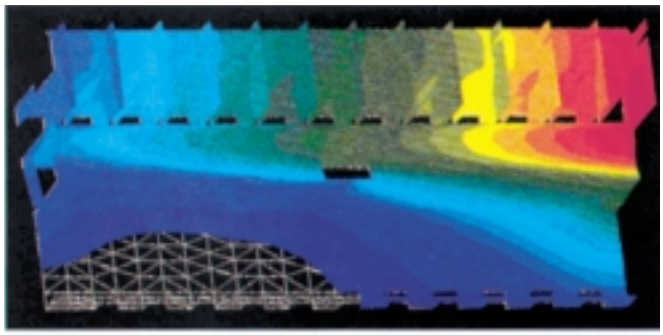
A



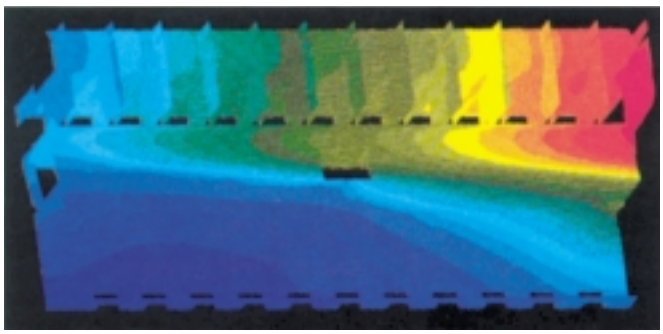
B



C



D



E

Bild 11: Die ohne Anwendung eines Schichtenprogramms berechneten Füllbilder der Steckerleiste (geordnet nach wachsendem Füllgrad) zeigen erhebliche Abweichungen von den tatsächlichen Teilfüllungen in Bild 10 (Programm: Moldflow MFL4)

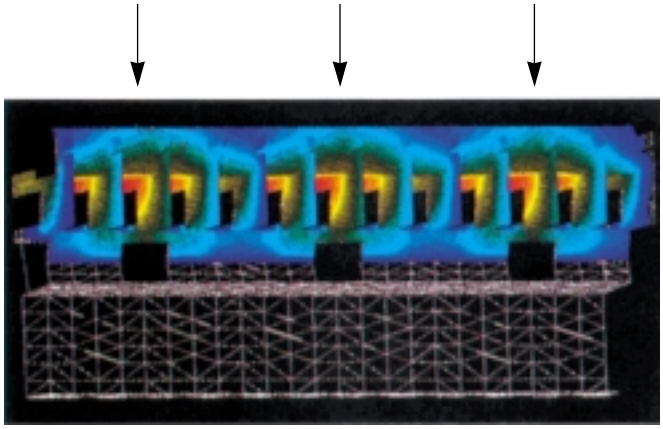
Die Berechnung mit einem konventionellen Programm ohne Schichteinteilung führt zu einer vom realen Füllverhalten stark abweichenden Füllung. Bild 11 zeigt dies für fünf Füllstufen. Gemäß diesem Ergebnis durchströmt die Schmelze das Filmscharnier als kaum merklichen Fließwiderstand.

Bessere Ergebnisse mit dreifachem Anspritzen

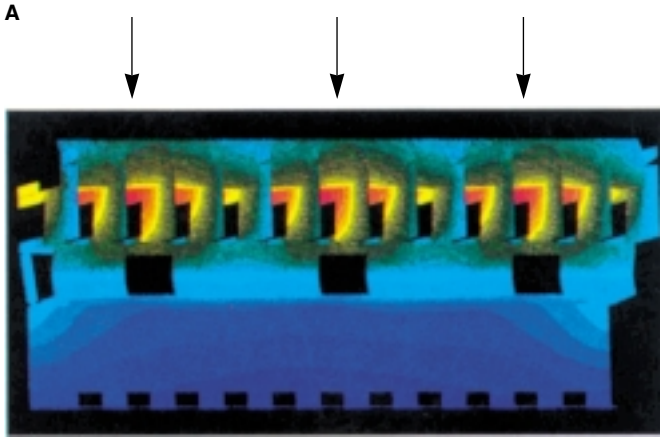
Rechnung und Praxis haben gezeigt, dass bei stirnseitiger Anbindung die Schmelze im Filmscharnier einfriert. Solche Einfriereffekte lassen sich bei vielen Kunststoff-Formteilen beobachten, bei denen gleichzeitig Bereiche mit stark unterschiedlichen Wanddicken gefüllt werden sollen.

Eine Kunststoffschmelze fließt in Richtung des geringsten Fließwiderstands, also zuerst in dickwandige Bereiche. Sie dringt kaum in den dünnwandigen Bereich ein. Zum weiteren Fließen im dünnwandigen Bereich wäre ein höherer Druck als im dickwandigen Bereich notwendig. Als Folge kann es zu einem zeitweiligen Schmelzestillstand und zu partiellem Einfrieren der Schmelze im dünnen Bereich kommen.

Einfriereffekte im Filmscharnier lassen sich mit dem Anspritzkonzept in Bild 12 vermeiden. Der Grundkörper ist dreimal an der Seitenfläche angebunden. Dadurch wird der Grundkörper sehr schnell gefüllt. Anschließend ist die Schmelze gezwungen, durch das Filmscharnier zu fließen. Zwei zusätzliche Durchbrüche im Scharnier verhindern, dass die Schmelze durch die angussnahen Kammerwände zu schnell in das Filmscharnier strömt. Dadurch lässt sich das Einfrieren der Schmelze vermeiden.



A



B

Bild 12: Die dreimalige seitliche Anbindung der Steckerleiste ergibt ein günstiges Füllverhalten;
A: Füllgrad 50 %, B: Füllgrad 100 %

Die dargestellte dreimalige seitliche Anbindung stellt für Kunststoffartikel wie die betrachtete Steckerleiste vom Füllverhalten her eine optimale Lösung dar. In der Praxis ist man jedoch oft gezwungen, Kompromisse einzugehen.

Die seitliche Anbindung konnte aus werkzeugtechnischen Gründen nicht realisiert werden. Aufgrund des sehr komplizierten Werkzeugaufbaus (Schieber, Kombinationswerkzeug für verschiedene Steckergrößen) musste an der stirnseitigen Anbindung festgehalten werden. Die zu Beginn auftretenden Füllprobleme konnten durch partielle Wanddickenanhebung im Scharnier und durch optimale Verarbeitungsbedingungen beseitigt werden, sodass einwandfreie und funktionstüchtige Teile gefertigt wurden.

Zusammenfassende Wertung

Die bislang gewonnenen Erfahrungen beim Berechnen dünnwandiger Formteile mit Hilfe von Finite-Differenzen-Programmen können als positiv bewertet werden. Der Rechenaufwand gegenüber Berechnungen ohne Schichteneinteilung ist jedoch erheblich höher. Im vorliegenden Fall war die Berechnungszeit im Schichtenverfahren fünfmal so lang.

Bei der derzeit auf dem Markt zur Verfügung stehenden Hardware und unter Berücksichtigung der stetigen Weiterentwicklung zu immer leistungsfähigeren Rechnern liegen die Berechnungszeiten beim Schichtenverfahren in einem vertretbaren Rahmen und werden immer kürzer werden. Aufgrund der vorliegenden Erfahrungen und nach der Aussage von Softwareherstellern sollte das Schichtenverfahren bei Formteilen unter 1,5 mm Wanddicke angewandt werden. Dies gilt besonders dann, wenn die Wanddicken in einem Formteil zusätzlich stark variieren. Die bei diesen Teilen auftretenden Einfriereffekte und die unterschiedlichen Fließfrontgeschwindigkeiten geben Nichtschichtenprogramme nicht genügend genau wieder. Schichtenprogramme eignen sich auch dazu, die Verhältnisse in der Nachdruckphase zu berechnen. Die Ergebnisse aus der Füllberechnung dienen dabei als Eingangsgrößen. Mit Daten zur Abhängigkeit des spezifischen Volumens von Temperatur und Druck (pvT-Daten) lassen sich u. a. Volumenschwindung und Verzug in verschiedenen Bereichen des Formteils berechnen. Erste Progamme hierzu werden seit einiger Zeit getestet, und die Erfahrungsberichte machen einen optimistischen Eindruck. Doch wird es sicher noch einige Zeit dauern, bis sich mit solchen Programmen der gesamte Spritzgießprozess und alle Einflüsse auf das Spritzgussteil genau und praxisgerecht beschreiben lassen.

Die Tendenz zu immer komplexeren, aber auch leistungsfähigeren Rechenprogrammen nimmt sicherlich zu. Doch werden sie den erfahrenen Kunststoff-Fachmann nicht ersetzen können. Er muss mit kritischem Urteil die Fülle der Berechnungsergebnisse auswerten und in die Praxis umsetzen.

Literatur

[1] Thienel, P.: Der Formfüllvorgang beim Spritzgießen von Thermoplasten. Diss., RWTH Aachen 1977

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 Kontroll- und Einflussmöglichkeiten, in welcher Art und Weise und zu welchem Zweck Sie unsere Produkte, technischen Unterstützungen sowie Informationen (unabhängig ob mündlich, schriftlich oder anhand von Produktionsbewertungen erhalten), einschließlich vorgeschlagener Formulierungen und Empfehlungen, anwenden und/oder einsetzen. Daher ist es unerlässlich, dass Sie unsere Produkte, technischen Unterstützungen und Informationen sowie Formulierungen und Empfehlungen eigenverantwortlich daraufhin überprüfen, ob sie für die von Ihnen beabsichtigten Zwecke und Anwendungen auch tatsächlich geeignet sind. Eine anwendungsspezifische Untersuchung muss mindestens eine Überprüfung auf Eignung in technischer Hinsicht sowie hinsichtlich Gesundheit, Sicherheit und Umwelt umfassen. Derartige Untersuchungen wurden nicht notwendigerweise von Covestro 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 selbst 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