

# Simulation und Praxis

## Analyse von Differenzen zwischen rheologisch berechneten und praktischen Formteilmüllungen

Thomas Droste, Lüdenscheid

Bei der Spritzgießverarbeitung von Kunststoffen treten z. T. Phänomene auf, die dem Fließprozess und den Materialeigenschaften zugeordnet werden können. Diese Phänomene können sich z. B. bei Mehrfach-Werkzeugen in Form einer ungleichmäßigen Kavitätsfüllung bei anscheinend symmetrischer Anordnung des Verteilersystems zeigen. Auch eine lokale Entmischung von Farbpigmenten oder eine nur partiell auftretende thermische Materialschädigung kann auf ein solches Phänomen hinweisen. Dies senkt die Qualität der Formteile in erheblichem Maße.

Die rheologische Simulation dient der Vorhersage der Formteilmüllung, wie sie in der Praxis abläuft. Eine partiell sehr hohe Schmelzebelastung kann signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Berechnungen und dem tatsächlichen Verlauf verursachen, da diese in den Simulationsprogrammen nicht berücksichtigt wird.

nähten und bei einigen Gehäuseteilen zu Lufteinschlüssen, die eine vorhergehende Füllbildsimulation nicht vorausberechnet hatte. Auch umfangreiche Nachrechnungen mit den Softwareprogrammen Moldflow und C-Mold konnten diesen Voreileffekt im Randbereich nicht nachstellen (Bild 2).

### Abmusterungs- und Simulationsergebnis

Bei der Musterung der Werkzeuge mit dem Serienmaterial (ABS) zeigt der Fließfrontverlauf eine große Abhängig-

der berechneten sekundären Bindenähte stimmt in Praxis und Theorie überein.

Eine Variation der oben genannten Parameter innerhalb der Berechnungsmodule zeigt keine Veränderung am Fließfrontverlauf. Der Voreileffekt ist zurzeit nicht berechenbar. Aufgrund dieses unbefriedigenden Ergebnisses sollten die Ursachen untersucht werden, die einen solchen Effekt hervorrufen können. Zu Beginn wird eine Annahme getroffen, die praktische Untersuchungen im Anschluss untermauern.

### Annahme zur Ergründung des Voreileffekts

Innerhalb des Angussystems wird die Schmelze während der Einspritzphase in den äußeren Schichten thermisch und mechanisch hoch beansprucht. Insbesondere durch eine Reduzierung der Einspritzzeit und der Masstemperatur nimmt die Scherung und somit die Friktionswärme während der Formteilmüllung zu und die Viskosität der Schmelze ab. Fließen diese niedrigviskosen Schmelzebereiche konzentriert in den Randbereich des Formteils, kann ein Voreilen der Fließfront auftreten. Bild 3 zeigt qualitativ den Zusammenhang zwischen dem Geschwindigkeits-, Schergeschwindigkeits-, Temperatur- und Viskositätsverlauf über dem halben Formteilquerschnitt.

### Mehrschichtströmung

Werden zwei Schmelzen mit unterschiedlicher Viskosität einem Strömungsprozess ausgesetzt, so hat die niedrigviskose Schmelze das Bestreben, in der Nähe der Werkzeugwand zu fließen, um den Strömungswiderstand so gering wie möglich zu halten [1]. In diesen

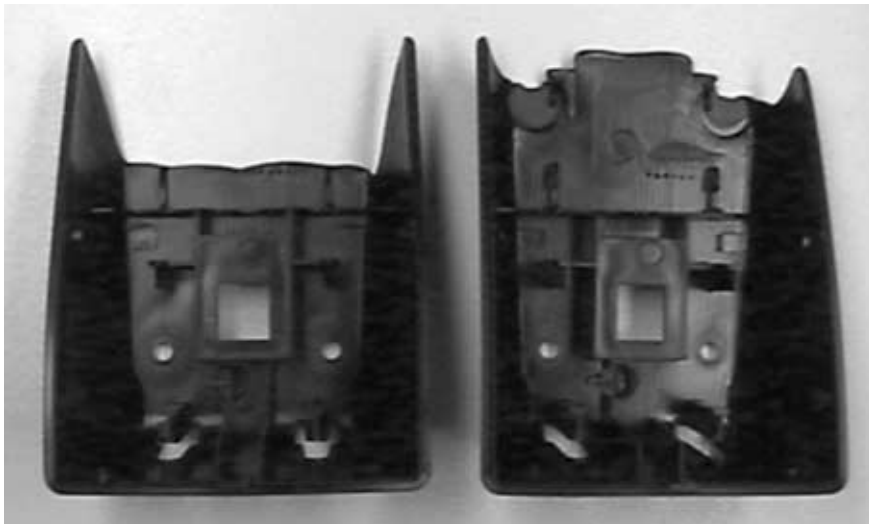


Bild 1. Teilfüllungen (links: 220°C Masstemperatur, 1,5 s Einspritzzeit; rechts: 260°C Masstemperatur, 3,0 s Einspritzen): annähernd gleiches Niveau der Fließfront im Randbereich

Die anschließende Untersuchung soll das Phänomen des partiellen Voreilens einer Schmelzefront veranschaulichen, die bei Gehäuseteilen aus dem Telekommunikationsbereich auftrat. Das starke Voreilen der Fließfront im Randbereich (Bild 1 links) führte zu Sekundärbinde-

keit von der Einspritzzeit und der Masstemperatur. Durch eine Erhöhung dieser Parameter wird der Voreileffekt beseitigt (Bild 1 rechts). Die Teilfüllungen entsprechen jetzt dem Simulationsergebnis (Bild 2), d. h., es traten keine Lufteinschlüsse mehr auf, und auch die Position

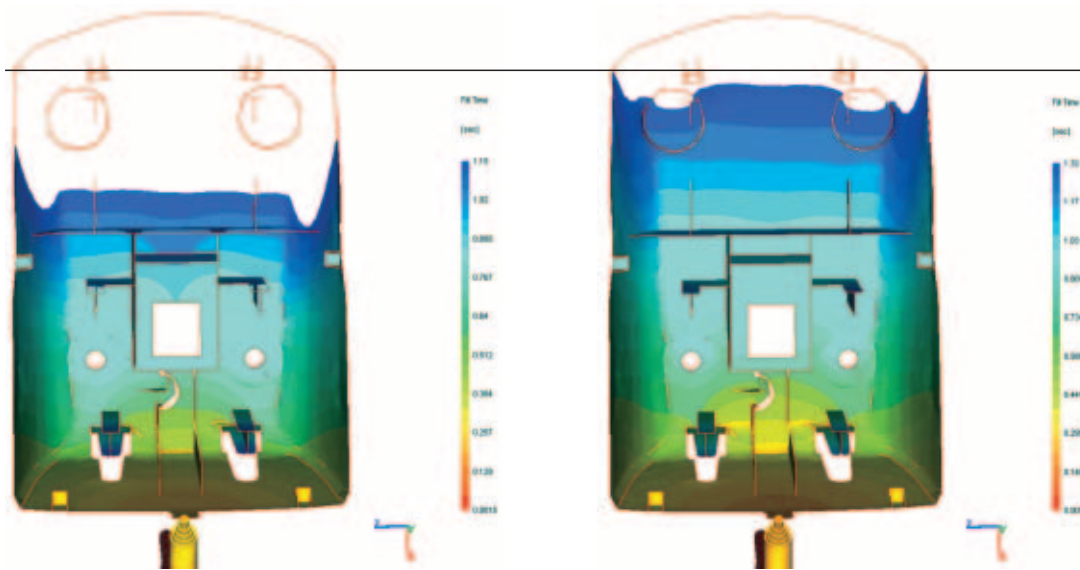


Bild 2. Berechnete Teilfüllungen (220°C Masse-temperatur, 1,5 s Einspritzzeit): ungleiches Niveau der Fließfront im Randbereich

äußeren Bereichen liegt auch die größte Scherbelastung vor (Bild 3).

In einem Versuch wurden ein schwarzes ABS mit einem MVR von 27 cm<sup>3</sup>/10 min und ein transparentes MABS mit einem MVR von 8 cm<sup>3</sup>/10 min während eines Materialwechsels gemeinsam in ein Werkzeug eingespritzt. Hierdurch sollten die im Angussystem stark gescherten Schmelzebereiche und

deren Verlauf in der Kavität optisch sichtbar gemacht werden.

In Bild 4 ist deutlich das leichter fließende schwarze ABS in den wandnahen Bereichen des Angusskegels zu erkennen. Die „streifenförmige“ Verteilung wird durch den Plastifiziervorgang während des Materialwechsels vom schwarzen auf das transparente Material hervorgerufen. Aufgrund der gleich großen Strömungsgeschwindigkeit der mittleren Schichten (Bild 3) wird auch ein geringer Anteil des leicht fließenden schwarzen ABS hier transportiert und ist als schwarzer „Faden“ im Querschnitt zu erkennen (Bild 4). Das schwer fließende transparente MABS befindet sich in den mittleren Bereichen.

tionsergebnis nicht zu erkennen (Bild 7). Die mittleren Kavitätsbereiche werden überwiegend mit dem schwer fließenden transparenten MABS-Kunststoff gefüllt,

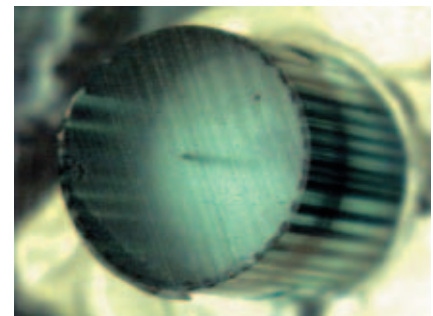


Bild 4. Mehrschichtströmung im Querschnitt eines Angusskegels

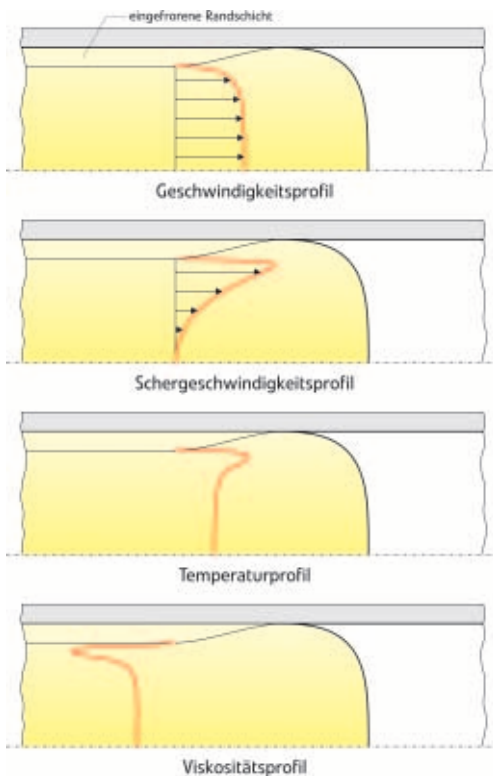


Bild 3. Geschwindigkeits-, Schergeschwindigkeits-, Temperatur- und Viskositätsverlauf über einen halben Formteilquerschnitt (qualitativ)

Anschließend durchströmt die Schmelze den rechteckigen Hilfssteg. Das im Angussystem bereits stark gescherte und leichter fließende schwarze ABS fließt überwiegend entlang der schmalen Stirnflächen (Bild 5) in die Kavität. In der Mitte befindet sich wieder das schwerer fließende transparente MABS, so dass sich auch hier ein möglichst geringer Fließwiderstand durch diese Verteilung der Schmelzen einstellt.

In der Kavität gelangt das leichter fließende schwarze ABS durch den Strömungsprozess in den Randbereich (Bild 6), wo es weiterhin einer relativ hohen Scherung an drei Flächen (Gesenkseite, Kernseite und Stirnfläche) unterliegt. Dieser Effekt ist beim Simula-

der im Angussystem einer wesentlich geringeren Schmelzebelastung unterlag.

Während der Formteilfüllung bildet sich vom Hilfssteg ausgehend eine annähernd halbkreisförmige Schmelzefront, deren Fließgeschwindigkeit abnimmt. Es findet eine Desorientierung der Molekülketten statt, wodurch die Viskosität und der Fließwiderstand ansteigen. Die Fließfähigkeit der Kunststoffschmelze weist also Unterschiede zwischen den Randbereichen und den übrigen Bauteilbereichen auf.



Bild 5. Mehrschichtströmung im Hilfssteg

Mit diesem praktischen Versuch konnte nachgewiesen werden, dass die im Angussystem stark gescherten und somit sehr leicht fließenden Materialbereiche relativ konzentriert in den Randbereich fließen und zum Voreileffekt führen.

**Einschichtströmung**

Fälschlicher Weise wird sehr oft davon ausgegangen, dass ein thermoplastischer Kunststoff bei einer Massetemperatur, auch während des Einspritzvorgangs, nur eine Viskosität besitzt. Durch den Strömungsvorgang bildet sich aber ein Schergeschwindigkeitsprofil über den jeweiligen Fließquerschnitt aus, das die Schmelzetemperatur und die Viskosität der einzelnen Schichten beeinflusst (Bild 3). Diese Viskositätsunterschiede können in kleinen Querschnitten durchaus den Faktor 100 überschreiten. Es liegt also bei jedem Strömungsvorgang eine

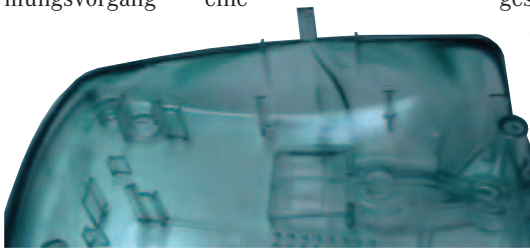


Bild 6. Mehrschichtströmung im Gehäuseunterteil

hinsichtlich der Viskosität inhomogene Schmelze vor.

Der bei der Mehrschichtströmung genannte Sachverhalt, dass die im Angussystem partiell sehr stark gescherten und niedrigviskosen Schmelzebereiche konzentriert in die Randbereiche der Kavität fließen und dass somit Fließanomalien entstehen können, gilt auch bei der Verarbeitung eines einzigen Kunststoffes.

Bild 7. Maximale Schergeschwindigkeiten einer Teilfüllung (skaliert von  $9 \text{ s}^{-1}$  bis  $5000 \text{ s}^{-1}$ )

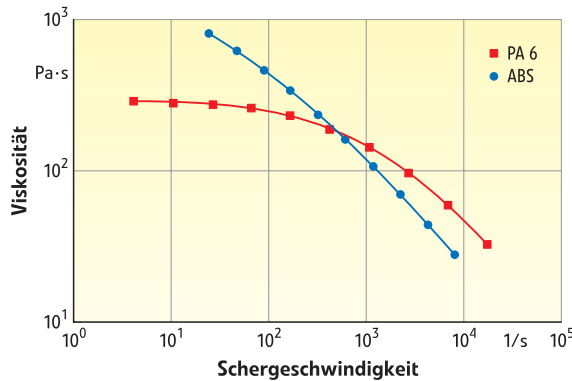
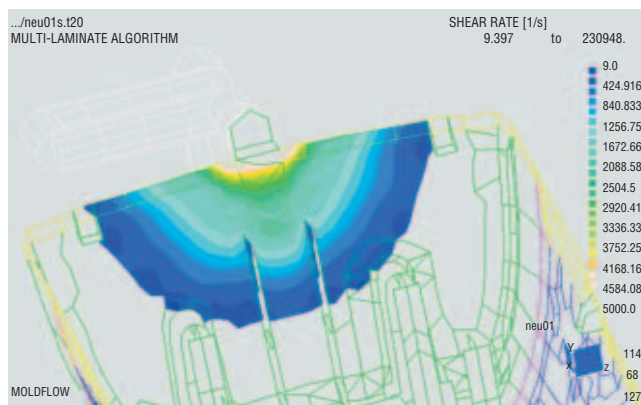


Bild 8. Viskosität in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit für ein PA 6 und ein ABS bei 250 °C

**Abmusterung mit Polyamid und Geometrieinfluss**

Um die vorhergehende Aussage zu bestätigen, wurde ein Versuch mit einem leicht fließenden Polyamid 6 durchgeführt. Durch die im Vergleich zu einem ABS-Material wesentlich geringere Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit (Bild 8) und der Schmelzetemperatur muss der Voreileffekt kleiner werden oder darf überhaupt nicht mehr auftreten.

Bild 9 ist deutlich der wesentlich geringere Voreileffekt des Polyamids zu entnehmen, wodurch die Annahme bestätigt wird.

Auch die geometrische Anordnung der Anbindung hat einen Einfluss auf die „Verteilung“ der im Angussystem stark gescherten Schmelzebereiche. Um dies zu verdeutlichen, wurden wieder zwei Materialien unterschiedlicher Viskosität verwendet. Bei den in Bild 10 dargestellten Formteilen aus einem 1+1-fach Werkzeug weist, wie bereits dargestellt, das rechte Formteil Fließanomalien in Form eines Voreileffekts im Randbereich auf. Dieses Formteil wird über einen Hilfssteg direkt auf der Seitenwand angebunden (Bild 6).

Bei dem linken Teil ist eine großflächigere Verteilung der im Angussystem stark gescherten und schwarz eingefärbten Schmelzebereiche zu erkennen. Hierdurch kommt es zu einer besseren Vermischung der hoch- und niedrigviskosen Schmelzebereiche, so dass keine Fließanomalien entstehen. Weiterhin wird durch die großflächigere Verteilung in die mittleren Bereiche der Kavität die Schmelzebelastung reduziert. Das im Angussystem stark beanspruchte Material kann in der Formteilkavität relaxieren, wodurch die Viskosität ansteigt.

Die Anbindung erfolgt hier ebenfalls über einen Hilfssteg, der allerdings nicht über die Seitenwand, sondern über einen vertieften Bereich im Formteil anbindet. Dadurch wird eine bessere Vermischung der niedrig- und hochviskosen Schmelzebereiche erreicht, die aus dem Angussystem in die Kavität fließen.

**Resümee**

Treten Fließanomalien auf, so können diese durch lokal stark gescherte Schmelzebereiche verursacht werden. Dabei ist es wichtig, nicht nur die Höhe, sondern auch die zeitliche Dauer der Schmelzebelastung zu beachten.

Auch bei Heißkanalwerkzeugen können Fließanomalien auftreten, wenn die Fließwege im System sehr lang sind bzw. zusätzliche Scherstellen in Form von Stegen zur Fixierung eines Torpedos oder durch den Übergang zum Nadelraum bei Nadelverschlussdüsen vorhanden sind.

Fließanomalien können auftreten in Form von:

- ▶ partiellem Voreilen der Schmelzefront;
- ▶ ungleichmäßiger Formfüllung bei Mehrfach-Werkzeugen, obwohl das Verteilersystem anscheinend symmetrisch angeordnet ist;





Bild 9. Vergleich zweier Teilfüllungen (links ABS; rechts PA 6)

## Ausblick

Bei der Simulation von Kunststoffbauteilen können die auftretenden Fließanomalien zurzeit nicht berechnet werden. Die verwendeten Schalenelemente (Shell-Elemente) können nur die Materialscherung auf der Kern- bzw. Gesenkseite berücksichtigen, die Stirnseiten werden vernachlässigt. Diese Vereinfachung kann durch den Einsatz von echten

3D-Simulationsprogrammen beseitigt werden.

Der hier vorliegende Voreffekt im Randbereich konnte aber auch mittels der 3D-Simulation nicht nachgestellt werden, so dass die möglichen Ursachen nicht nur im Bereich der verschiedenen Finite-Elemente zu suchen sind, sondern auch im Berechnungsalgorithmus sowie in der Beschreibung des Materialmodells.

- ▶ Entmischung von Farbpigmenten und Füllstoffen;
- ▶ thermisch lokal geschädigtem Kunststoff.

Um diese Effekte zu beseitigen bzw. zu reduzieren, sollten folgende Abhilfemaßnahmen durchgeführt werden:

- ▶ Bereiche erhöhter Scherung entschärfen.
- ▶ Günstige Anbindungsposition und Geometrie (kreisrunde Querschnitte)

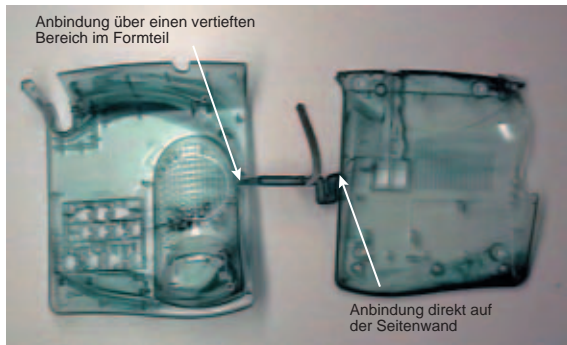


Bild 10. Mehrschichtströmung in einem 1+1-fach Werkzeug

der Schmelzeverteilung wählen, um eine Vermischung der niedrig- und hochviskosen Schmelzebereiche zu erreichen.

- ▶ Verteilerkanäle sollten einen 90°-Winkel zueinander aufweisen, damit auch bei hohen Fließgeschwindigkeiten die Scher- bzw. Viskositätsverteilung möglichst symmetrisch ausfällt und die Angussbalancierung den Erwartungen entspricht.
- ▶ Seitens der Verarbeitung kann eine Beeinflussung der Fließanomalien über alle Parameter erfolgen, die die Materialscherung verringern. In erster Linie sind dies die Einspritzgeschwindigkeit und die Masse- bzw. Heißkanaltemperatur. Bei dünnwandigen Formteilen kommt auch der Werkzeugwandtemperatur eine Bedeutung zu.

## Dank

Wir danken der Siemens AG in Bocholt für die Unterstützung der Projektarbeit und für die Zustimmung zur Veröffentlichung der Ergebnisse.

## Literatur

- 1 Lee, B. L., White, J. L.: Experimental Studies Disperse Two-Phase of Molten Polymers Through Dies. Trans. Soc. Rheol. 19 (1975) 3, S. 481-492

## Der Autor dieses Beitrags

Dipl.-Ing. Thomas Droste, geb. 1964, ist seit Juli 1992 im Kunststoff-Institut Lüdenscheid in den Bereichen Formteil- und Werkzeugoptimierung sowie in der Verfahrenstechnik tätig und seit April 1999 Leiter des Bereichs Formteil- und Werkzeugoptimierung.

**Kontakt:** droste@kunststoff-institut.de