

# Spritzguss für Krafteinleitungselemente

Krafteinleitungselemente für faserverstärkte Kunststoffe weisen sehr komplexe Geometrien auf. Die meist aus Metall bestehenden Elemente können kosteneffizient mit dem Metallpulverspritzgussverfahren gefertigt werden. Für eine bestmögliche Prozessführung haben sich die Wissenschaftler der Hochschule für Technik Rapperswil mit der numerischen Simulation des Herstellungsprozesses auseinander gesetzt.

Um Lasten in kontinuierlich faserverstärkte Kunststoffe (FVK) einzuleiten, werden heute meist metallische Krafteinleitungselemente verwendet, welche in die Struktur der faserverstärkten Kunststoffe eingebettet oder auf diesen aufgeklebt werden. Die Krafteinleitungselemente weisen oft komplexe Geometrien auf und werden teilweise durch aufwendige Dreh- und Fräsprozesse aus dem vollen Material gearbeitet. Einfacher und kostengünstiger wäre die Produktion dieser Bauteile mittels Metallpulverspritzgiessen. Denn damit liessen sich grössere Stückzahlen filigraner und technisch anspruchsvoller Verbindungs- oder Krafteinleitungselemente mit äusserst geringen Toleranzen herstellen. Doch dazu fehlten bis anhin die Grundlagen: Wie verhält sich das Material? Wie müssen verschiedene Parameter eingestellt sein, um den Herstellungsprozess optimal zu steuern? Wie müssen die Spritzgusswerkzeuge ausgelegt sein? Mit diesen Fragen setzte sich das Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung IWK der Hochschule für Technik Rapperswil in einem von der Gebert RUF Stiftung geförderten Forschungsprojekt auseinander.

## Bewährtes Verfahren

Das ursprünglich für die Kunststofftechnik entwickelte Spritzgussverfahren wird seit längerem auch für die Herstellung metallischer Bauteile angewendet. Das Metallpulverspritzgiessen (Metal Injection Moulding = MIM) eignet sich insbesondere für kleine, komplexe Bauteile, die üblicherweise in grossen Stückzahlen gefertigt werden. Verbreitet ist das Verfahren für die Herstellung von Uhrengehäusen, Teilen für die Brillenindustrie sowie medizinischen Komponenten. Das Ausgangsmaterial ist eine Mischung aus Metallpulver und einem Binder. Dieses Granulat wird in einem Spritzgussprozess zunächst geformt. Durch Wärmebehandlung unterhalb der Schmelztemperatur des Metalls wird der Binder anschliessend ausgebrannt und das Bauteil verdichtet und ausgehärtet (Sintern). So können Bauteile gefertigt werden, die ähnliche Eigenschaften aufweisen wie das metallische Ausgangsmaterial. Um mit diesem Verfahren komplexe Krafteinleitungselemente in hoher Präzision produzieren zu können, muss der gesamte Herstellungsprozess optimal ausgelegt werden. Die Grund-

lage dafür bildet die Simulation des Prozesses. Der Formfüllvorgang beim Spritzgiessen wird in der Regel mit der Methode der finiten Elemente simuliert. Dazu muss ein Materialmodell vorhanden sein, welches das physikalische Verhalten des zu verarbeitenden Materials beschreibt. Dazu gehören die Viskosität in Abhängigkeit der Scherrate und der Temperatur sowie die thermischen Eigenschaften des Werkstoffs. Diese Parameter haben die Forscher am IWK mit rheologischen Analysen bestimmt und damit ein mathematisches Modell evaluiert, welches das Fließverhalten des Werkstoffs innerhalb des betrachteten Prozessfensters beschreibt. Zum besseren Verständnis des Fließverhaltens auf mikroskopischer Ebene wurde auch die Struktur sowie die Zusammensetzung des Granulates analysiert.

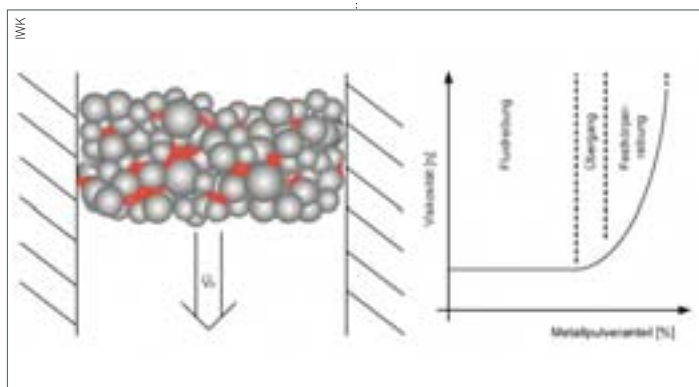
## Materialcharakterisierung

Die Ausgangsmaterialien für Metallpulverspritzgussteile können bereits vorgemischt bezogen werden. Wie sich zeigte, waren auf dem Markt nur fünf Catamold-Werkstoffe von BASF erhältlich. Die Grundmasse des Catamold-Werkstoffes besteht

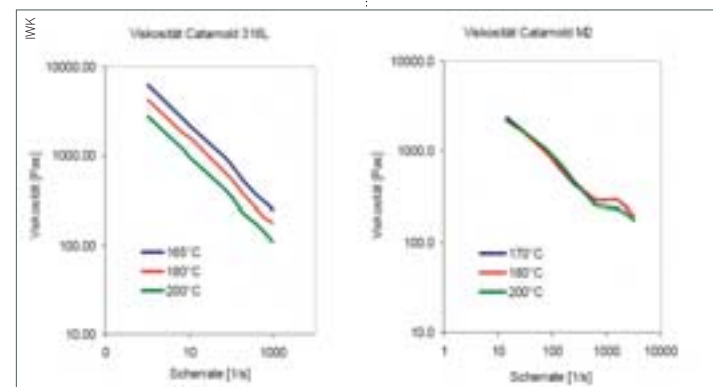
aus Metallpulver, das mit Polyacetal (POM) angereichert wird. Da der Werkstoff in Granulatform vorliegt, kann er somit direkt auf der Spritzgiessmaschine plastifiziert und verarbeitet werden. Um den Einfluss der Metallpartikel auf die Viskosität der Catamold-Werkstoffe zu analysieren, wurde das Gefüge unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Wie die 1000fache Vergrösserung zeigte, besteht das Granulat aus mehrheitlich kugelförmigen Metallpartikeln in der Grösse zwischen 5 und 15  $\mu\text{m}$ . Dazwischen zeigen sich helle Streifen. Dabei handelt es sich um den Polyacetalbinder, der das Fliesen der Schmelze fördert und dem spritzgegossenen Bauteil (Grünling) eine gewisse Formstabilität verleiht. Damit durch das Entbindern der Grünlinge nicht zu viel Zeit und Energie in Anspruch genommen wird, beschränkt sich der Anteil des Binders auf ein Minimum. Der Massenanteil des Kunststoffbinders wurde durch einen Ausbrennversuch bestimmt. Er beträgt typischerweise zwischen 6,0 und 9,5 Massenprozent.

## Analyse des Fließverhaltens

Das Fließverhalten des mit POM angereicherten Metall-



Grafik 1: Modell der Schüttung (links) und Viskositätsverhalten in Abhängigkeit des Metallpulveranteils (rechts).



Grafik 2: Viskositätskurven der Rheologiemessungen der Werkstoffe mit der Bezeichnung 316L und M2.

pulvers wird einerseits massgebend beeinflusst von Form und Grösse der Metallpartikel und andererseits vom Binderanteil. Dabei sind für das Fliessverhalten folgende Einflussgrössen von Bedeutung: Mechanische und elektrostatische (van der Waals) Kräfte zwischen den Metallpartikeln sowie Kapillareffekte zwischen dem Metallpulver und dem Binder. Der Binder wirkt zudem als eine Art «Schmiermittel» zwischen den Metallpartikeln und verhindert bei grösseren Mengen Brückenbildungen zwischen den Metallpartikeln. Bei einem geringen Binderanteil überwiegt die Festkörperreibung, was einen starken Anstieg der Viskosität zur Folge hat und allenfalls zu Brückenbildungen zwischen den Partikeln führen kann. (vgl. Grafik 1)

Zur experimentellen Bestimmung der Materialparameter haben die Wissenschaftler die Viskosität bei unterschiedlichen Temperaturen und Scherraten bestimmt (vgl. Grafik 2). Die rheologischen Messungen am Kapillarviskosimeter haben unterschiedliche Resultate hervorgebracht: Zum einen wurde auch bei geringen Scherraten ein ausschliesslich strukturviskoses Verhalten der Schmelze festgestellt, das heisst, dass die Viskosität mit zunehmender Scherrate sinkt. Zum anderen stellte sich heraus, dass sich die Viskosität bei Temperaturschwankungen wenig ändert. Der Einfluss der Temperatur ist bei den Granulaten Catamold M2 und 100Cr6 besonders gering.

**Gute Übereinstimmung**

Die Simulation wurde mit dem Füllsimulationsprogramm von Cadmould erstellt. Anhand einer einfachen Platte wurde die Qualität der Resultate mit dem vorgeschlagenen Materialmodell verifiziert. Die Simulation zeigt, dass die Fliessgeschwindigkeit über die Breite und die Höhe der Kavität nahezu uniform ist. Es bildet sich eine so genannte Pfropfströmung, wie sie bei Schüttgütern wie Zement oder Sand beobachtet werden kann. Diese Art von Strömung tritt

**Konventionelles, metallisches Krafteinleitungselement für faserverstärkte Kunststoffe.**

dann auf, wenn ein hoher Pulveranteil vorliegt und daher die Metallpartikel viskositätsbestimmend sind. Da die Fliessfront des Bauteils eine gleichmässige Geschwindigkeit annimmt, kann an jedem Punkt der Fliessfront (ausser im Randbereich) von derselben Partikelgeschwindigkeit ausgegangen werden. Die Validierung des Materialmodelles erfolgte in einem praktischen Versuch, bei welchem die Druckverhältnisse mit zwei Sensoren gemessen wurden. Während die gemessenen Druckwerte ziemlich gut mit den simulierten Daten übereinstimmten, kam es bei der Ansprechzeit zu geringen Abweichungen. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Kompression des Werkstoffes, wie sie im realen Spritzgussprozess zu erwarten ist, in der Simulation nicht berücksichtigt wurde. In der hier vorgestellten Simulation wird der Werkstoff als inkompressibel modelliert. Generell sind aber die Abweichungen zwischen den experimentellen Ergebnissen und den numerischen Resultaten aus der Simulation gering.

**Optimale Auslegung möglich**

Die Verarbeitung von Metallpulverwerkstoffen benötigt einige Erfahrung. Da sich der Werkstoff nicht wie gewöhnlicher Kunststoff verhält, müssen die Maschinenparameter der Spritzgussmaschine entsprechend angepasst werden. Bis zum jetzigen Zeitpunkt sind Werkzeugformen mit dem System nach «Trial and Error» ausgelegt worden. Durch die rheologische Modellierung der Werkstoffe 17-4PH, 316L sowie 100Cr6 ist es möglich das Verhalten des Werkstoffes in Füllsimulationen mit genügender Genauigkeit im Voraus zu berechnen. Teure Nachbesserungen an den Werkzeugen zur Herstellung von Pulverspritzgussbauteilen können so verhindert werden. Für die Werkstoffe F15 sowie M2



sind weitere Untersuchungen im Bereich der Brückenbildung sowie des mikroskopischen Verhaltens bezüglich des Stick-Slip-Effektes erforderlich. Bei Verwendung anderer Feedstocks aus dieser Produktlinie oder selbst gemischten Feedstocks, müssen die rheologischen Daten erneut ermittelt werden, da das Verhalten von hochgefüllten

Kunststoffen nicht im Voraus bekannt ist. ☞

Dipl.-Ing. FH Gabriel von Rickenbach und Prof. Dr. sc. techn. Markus Henne  
 Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung IWK  
 Hochschule für Technik Rapperswil  
 8640 Rapperswil, iwkw@hsr.ch  
 www.iwk.hsr.ch

**zudem**

**Simulationsformel**

Üblicherweise wird das rheologische Verhalten der Schmelze mit dem Ansatz von Carreau beschrieben. Der Ansatz von Carreau geht davon aus, dass sich ein Fluid bei niedrigen Schergeschwindigkeiten newtonsch verhält, das heisst, dass sich die Viskosität bei Änderung der Scherrate nicht ändert. Durch Erhöhen der Scherrate geht das Fluid in strukturviskoses Verhalten über. Bei den analysierten Werkstoffen zeigte sich allerdings auch bei kleinen Scherraten kein newtonsches Verhalten. Daher wird der Faktor  $1/P_2$  gleich 1 gesetzt.

Da die Schmelze beim Variieren der Temperatur eine andere Viskosität zeigt, muss mit Hilfe des Ansatzes nach William Landel Ferry WLF der Temperaturkoeffizient  $a_T$  eingebracht werden. Wie die Messungen an den Werkstoffen zeigten, ist der Temperatureinfluss aufgrund des niedrigen Binderanteils relativ gering. Deshalb strebt  $a_T$  gegen 1.

Somit ergibt sich eine Gerade mit der negativen Steigung  $P_3$ , die mit dem vereinfachten Ansatz von Oswald de Wale beschrieben werden kann, der sich für die Simulation von Metallpulverspritzgussbauteilen als geeignet erwiesen hat.

Generell sind aufgrund des tiefen Binderanteils die thermischen Einflüsse auf das Werkstoffverhalten gering, das heisst die Temperaturleitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit spielen in der Simulation eine untergeordnete Rolle.

$$\eta = \frac{a_T \cdot P_1}{(1 + a_T \cdot (1/P_2) \cdot \dot{\gamma})^{P_3}} \approx P_1 \cdot \dot{\gamma}^{-P_3}$$

$P_1$	= Newtonsches Fliessverhalten	[Pas]
$1/P_2$	= Übergangspunkt	[-]
$P_3$	= Steigung der Strukturviskosität	[-]
$\dot{\gamma}$	= Scherrate	[1/s]
$\eta$	= Viskosität	[Pas]
$a_T$	= Temperaturfaktor WLF	[-]