

# Blut ist dicker als Wasser

Viele Beziehungen sind nur dann stark oder in unserem Falle zäh, wenn die Belastung klein ist. Treten große Spannungen auf, verschwindet diese Zähigkeit sehr rasch. Vergleichbar verhält sich Blut: Ist die Belastung, die auf das Blut wirkt, klein und fließt es sehr langsam, ist es so zäh wie Honig. Bei großer Belastung wird das Blut so dünnflüssig wie Wasser.

Die Eigenschaft, die dafür verantwortlich ist, dass die Zähigkeit eines Stoffes mit Zunahme der Belastung sinkt, nennt man Strukturviskosität oder auch Scherverdünnung. Nicht nur Blut verhält sich so. Viele Stoffe, mit denen wir täglich umgehen, haben diese Eigenschaft und das ist gut so, weil sie den Gebrauchswert der Stoffe erhöht. Dank des strukturviskosen Verhaltens moderner Lacke können beispielsweise auch handwerkliche Laien glatt lackierte Oberflächen ohne Nasen und Tropfen herstellen: Beim Aufnehmen des Lacks auf den Pinsel ist er sehr zäh und fließt nicht vom Pinsel ab. Sobald jedoch das Werkzeug über die zu lackierende Fläche streicht, wird der Lack mechanisch belastet und dünnflüssig, wodurch er sich gleichmäßig verteilt. Hinter dem Pinsel wird der Lack wieder zäh; das verhindert das Abfließen des Lacks in Form von Nasen.

34

Die Wissenschaft, die sich mit diesen Phänomenen beschäftigt, ist die Rheologie. Der Name stammt vom griechischen Verb „ $\rho\epsilon\iota\nu$ “ – „fließen“; er wurde in den zwanziger Jahren des letzten Jahrhunderts von Eugene Bingham eingeführt, der sich intensiv mit den Fließeigenschaften von Kunststoffen beschäftigt hat. In diesem Sinn meint Rheologie die Untersuchung, Beschreibung und Deutung von Materialeigenschaften, die Fließen und Verformen betreffen. Die rheologische Gruppe der Aachener Verfahrenstechnik, kurz AVT, befasst sich im Wesentlichen mit den Eigenschaften einer besonderen Stoffklasse: den Suspensionen und Emulsionen, zu denen man auch das Blut zählen kann.



Eine Suspension ist die Mischung von festen Partikeln und einer Flüssigkeit. Eine Emulsion ist die Mischung von zwei Flüssigkeiten, die nicht untereinander mischbar sind und bei der eine der beiden als Tröpfchen vorliegt. Höher konzentrierte Suspensionen und Emulsionen zeigen eine besondere Eigenschaft, die man Viskoplastizität nennt: Das Material kann sich wie ein fester Körper verhalten. Ein typisches Beispiel dafür ist Butter, die eine hochkonzentrierte Emulsion ist. Wenn keine Kraft auf einen Butterklotz wirkt, ist er formstabil wie ein fester Körper. Wenn

man ihn aber mit einem Messer belastet, beginnt er zu fließen und lässt sich auf einer Brotscheibe verstreichen.

Die AVT gehört zu den wenigen rheologischen Arbeitsgruppen in der Welt, die sich mit ganz speziellen Suspensionen befasst, den halbflüssigen Metalllegierungen. Diese haben im Unterschied zu reinen Stoffen keine einheitliche Schmelz- oder Erstarrungstemperatur, sondern weisen ein Temperaturintervall auf, in dem flüssige und feste Metallphasen nebeneinander vorliegen. In diesem Zustand ist die Legierung also eine Suspension. Vollständig flüssige Metalle verhalten sich

rheologisch gesehen wie Wasser. Die metallischen Suspensionen sind aber nicht nur viskoplastisch, sondern auch noch thixotrop. Thixotropie ist eine besondere Form der Strukturviskosität: Das Material ändert bei einer neuen Belastung nicht sofort seine Fließeigenschaften, sondern nimmt sich dafür Zeit. Bild 1 zeigt den Block einer industriellen Aluminiumlegierung, die bei einer Temperatur von 630 °C mit einem einfachen Messer geschnitten wird. Die Ähnlichkeit im Verhalten zu Butter ist offensichtlich – einerseits formstabil, andererseits fließfähig. Ausgehend von den besonderen Fließeigenschaften

# Suspensionsrheologie bei der Aachener Verfahrenstechnik

*Bild 1:  
Viskoplastischer  
Aluminiumbolzen  
bei 630° C.*



*Bild 2:  
Dieses Hochtemperaturrheometer erlaubt die Untersuchung flüssiger Metalllegierungen bis 1000° C.*

des Materials wird weltweit an der Realisierung eines Formgebungsverfahrens gearbeitet, das sich „Thixoforming“ nennt. Gegenüber klassischem Schmieden oder Gießen weist dieses Verfahren einige technologische Vorteile auf. Unter anderem lassen sich damit sehr filigrane aber mechanisch hochstabile Bauteile herstellen, was zum Beispiel für Produkte in der Automobilindustrie vorteilhaft ist. Zum Thema „Thixoforming“ gab es bis vor kurzem an der RWTH einen Sonderforschungsbereich, der über 12 Jahre von der DFG gefördert wurde und an dem die AVT beteiligt war. Die Aufgaben, mit denen

sich ein Rheologe auf diesem Gebiet beschäftigt, sind die experimentelle Untersuchung der Fließeigenschaften der Stoffe, die Formulierung von mathematischen Beziehungen, mit denen sich diese rheologischen Eigenschaften berechnen lassen und, falls es möglich ist, die Deutung der Eigenschaften durch Analyse der inneren Struktur des Stoffes. Dabei ist der Rheologe außerordentlich stark auf Zusammenarbeit mit den Wissenschaftlern und Ingenieuren der anderen beteiligten Disziplinen angewiesen. Dazu gehören Materialwissenschaftler, Metallurgen und Prozesstechniker. Andererseits sind die

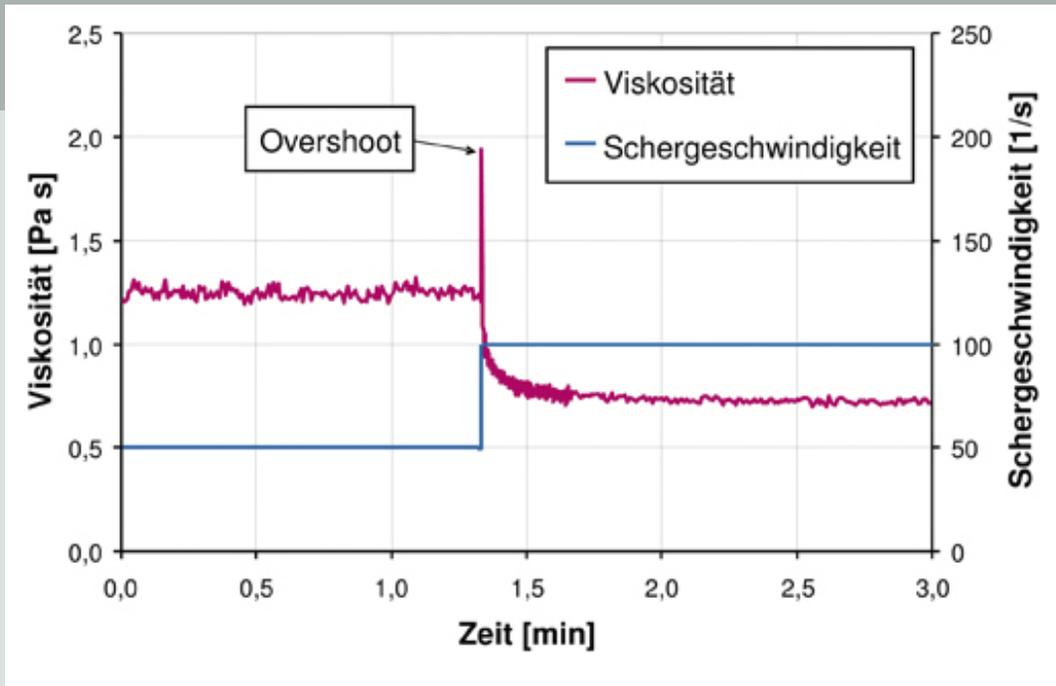
Ergebnisse, die der Rheologe bereitstellt, lebenswichtige Grundlagen für die Entwicklung sowohl von Thixolegierungen als auch des Formgebungsprozesses selbst, der sich von den klassischen Prozessen stark unterscheidet. Dies zeigt, dass die Rheologie eine interdisziplinäre Wissenschaft ist.

Die AVT hat zusätzlich einen weiteren Aspekt in Kooperation mit einem befreundeten Wissenschaftler der Technischen Universität Lodz, Polen, bearbeitet, der über das ursprüngliche Feld der Rheologie hinausgeht: Die numerische Berechnung der Füllung einer Form im Thixoprozess. Bei die-

ser anspruchsvollen Aufgabenstellung müssen nicht nur die komplexen rheologischen Eigenschaften des Metalls, sondern auch die sehr diffizilen Randbedingungen des Prozesses berücksichtigt werden.

Die experimentelle Untersuchung der rheologischen Eigenschaften erfolgt in besonderen Messinstrumenten, den Rheometern. Das Grundprinzip aller Rheometer ist, die Kraft zu messen, die erforderlich ist, um eine bestimmte Verformung oder Verformungsgeschwindigkeit zu erreichen. Weit verbreitet sind die Rotationsrheometer. In einem zylindrischen Becher befindet sich die Probe,

*Bild 5:  
Dipl.-Phys. Axel Moll  
überprüft vor der Messung  
mit einer Lupe eine Probe  
von einer Aluminiumlegierung,  
die unter anderem in  
der Automobilfertigung  
verwendet wird. Anschließend  
wird diese Probe in einem  
Hochtemperaturrheometer bei  
Temperaturen von 600°C  
teilflüssig gemacht und in der  
Anlage vermessen.  
Foto: Peter Winandy*



*Bild 3:  
Viskositätsverlauf einer  
Aluminiumlegierung  
bei 590° C während  
eines Schersprungsversuchs.*

36

die untersucht werden soll. In den Becher taucht ein zylindrischer Rotationskörper ein, der sich mit einer einstellbaren Geschwindigkeit in dem Material dreht. Die von dem Rotationskörper über das Material auf den Becher übertragene Kraft wird gemessen. Da diese Kräfte sehr klein sind, müssen Rheometer hochpräzise konstruiert und gebaut werden.

Von großer Bedeutung für technische Anwendungen sind zum Beispiel Aluminiumlegierungen mit typischen Verarbeitungstemperaturen von 600 bis 700 °C und Stahl mit einer Prozess Temperatur bis zu 1400 °C. In diesem Temperaturbereich sind Metalllegierungen außerdem chemisch aggressiv. Das Material, aus dem das Rheometer gebaut ist, muss darauf angepasst werden wie auch die Zusammensetzung der Gasatmosphäre, die im Kontakt mit der Probe ist. Rheometer, die diesen Bedingungen gerecht werden, sind bei der AVT entwickelt und gebaut worden, beziehungsweise basierend auf den Erfahrungen bei der AVT

von Geräteherstellern kommerziell umgesetzt worden, siehe Bild 2. Zwei typische Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Bildern 3 und 4 dargestellt. Bild 3 zeigt den Viskositätsverlauf einer Al-Legierung bei einer Temperatur von 590 °C während eines so genannten Schersprungexperiments. Zunächst wird dem Probenmaterial eine konstante Verformungsgeschwindigkeit aufgeprägt, bei der sich ein konstanter, zu dieser Verformungsgeschwindigkeit gehörender Viskositätswert einstellt.

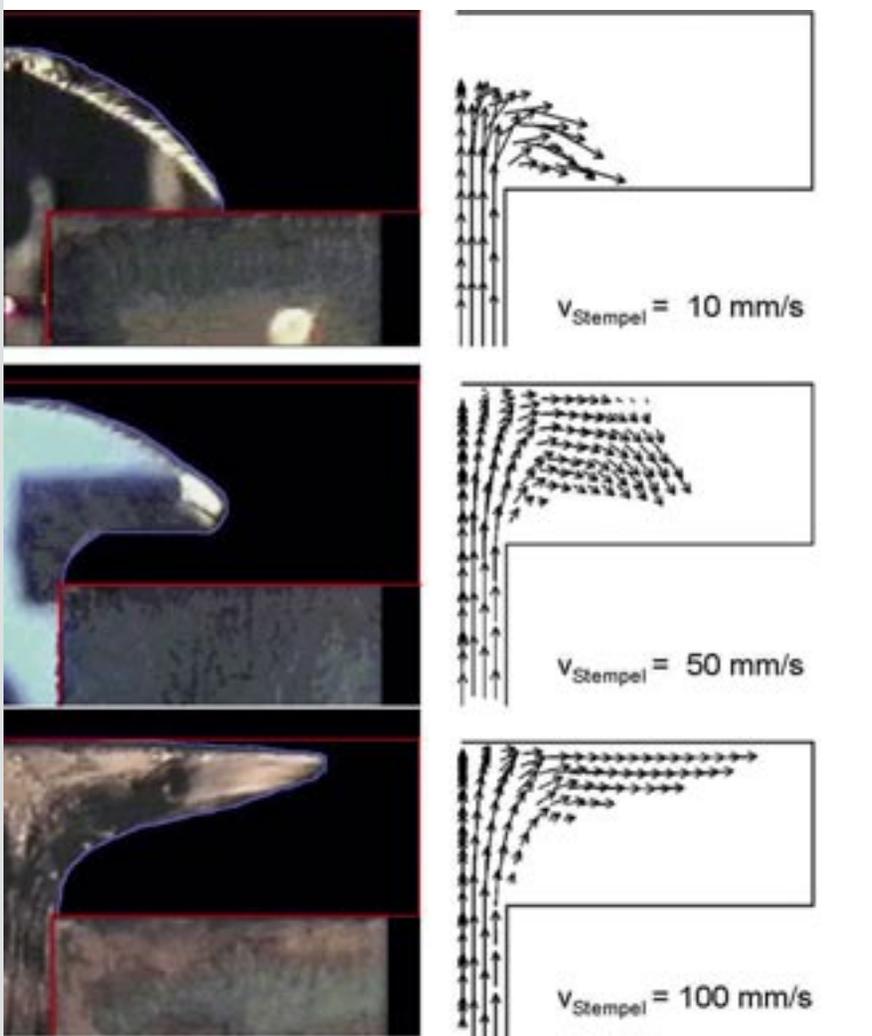
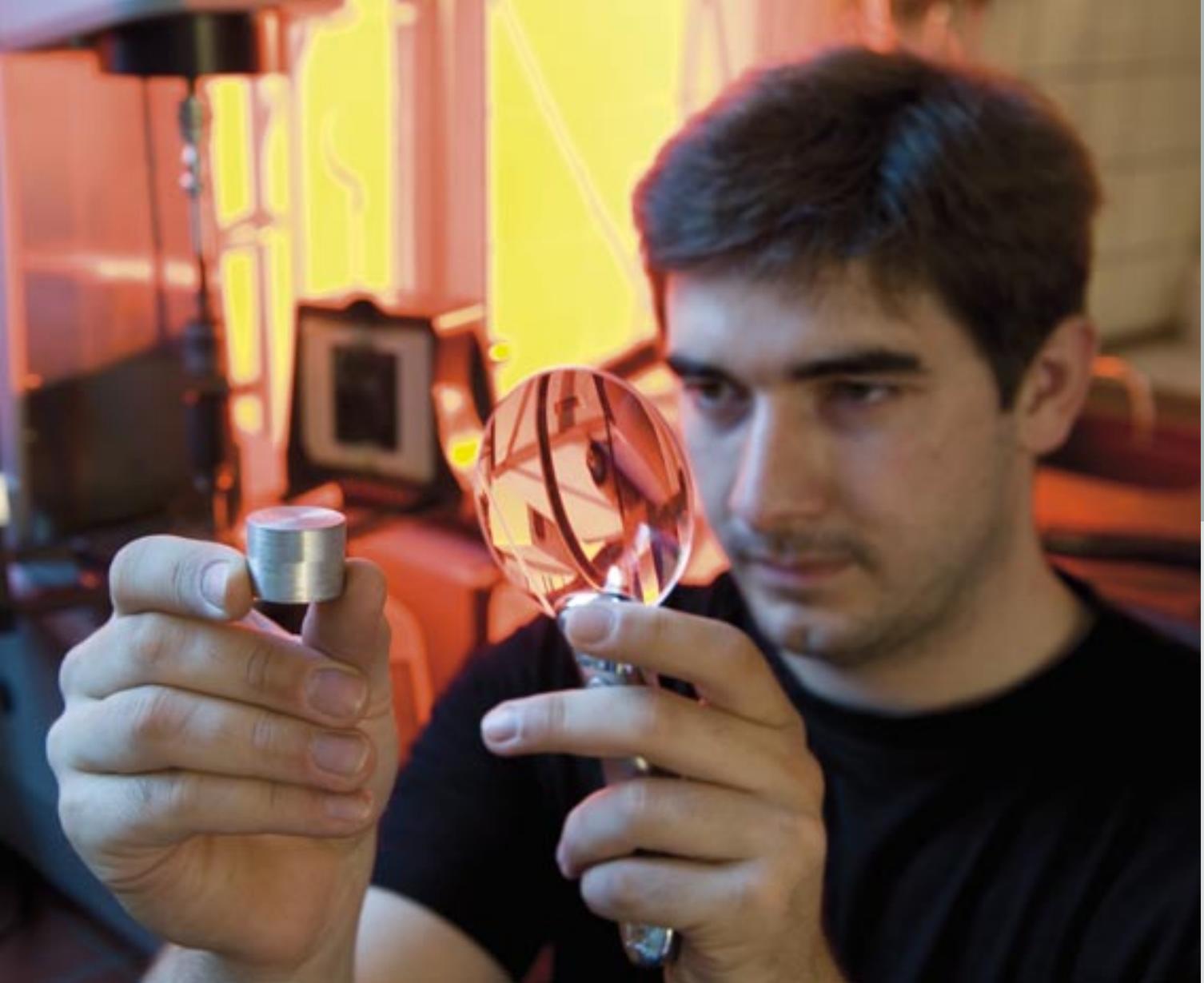
Dann wird die Verformungsgeschwindigkeit sprunghaft erhöht und wieder konstant gehalten. Das Metall reagiert dabei anfänglich mit einer unmittelbaren Erhöhung der Viskosität. Dieses Phänomen nennt man „Overshoot“. Danach fällt die Viskosität allmählich auf einen niedrigeren, zur neuen Verformungsgeschwindigkeit gehörenden, Wert. Dies entspricht dem thixotropen Verhalten des Materials. Bild 4 zeigt das Ergebnis einer Simulation der Formfüllung im Vergleich zum

Experiment. Der Moment, der hier beobachtet wurde, ist der Übergang zwischen einer senkrecht aufsteigenden Strömung und einer horizontal verlaufenden. Rechts ist die Simulation, links das Experiment dargestellt. Die gute Übereinstimmung zwischen beiden ist offensichtlich. Im linken Bildteil sind die Fließfronten durch blaue und die Formgrenzen mit roten Linien hervorgehoben.

Nun stellt sich die Frage: Was haben die Metalle mit Blut gemein? Blut ist zwar „ein besonderer Saft“, aber rheologisch gesehen nichts anderes als eine Suspension oder Emulsion. Blut besteht aus dem Plasma als Trägerflüssigkeit und zu etwa 45 Prozent aus den Blutkörperchen. Das heißt, viele Phänomene, die man bei den metallischen Suspensionen beobachtet, treten auch bei Strömungen des Blutes auf. Die Verfahrenstechniker interessiert dabei besonders die Schädigung, die im Blut auftritt, wenn es beispielsweise mit künstlichen Pumpen gefördert wird. Das menschliche Herz geht sehr

schonend mit dem Blut um. Künstliche Pumpen dagegen führen bei dauerndem Einsatz zu einer Schädigung der Blutkörperchen, wodurch das Blut seine Funktion einbüßt. In Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Hannover arbeitet die AVT daher an der Entwicklung eines „Schädigungsmodells“, das es erlauben wird, zusammen mit der Strömung in einer Blutpumpe auch deren Schädigungspotenzial zu berechnen.

**Autoren:**  
Dipl.-Phys. Nils Oliver Kuhlmann und Dipl.-Phys. Axel Moll sind Wissenschaftliche Mitarbeiter des Lehr- und Forschungsgebiets AVT-Mechanische Verfahrenstechnik. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Modigell leitet das Lehr- und Forschungsgebiet AVT-Mechanische Verfahrenstechnik.



*Bild 4:  
Füllung einer T-förmigen  
Gießform mit einer Thixole-  
gierung bei unterschiedlichen  
Füllgeschwindigkeiten.  
Vergleich der experimentell  
beobachteten Fließfront  
(links) und berechneten  
Geschwindigkeitsvektoren  
(rechts).*