

■ Jenseits bekannter Grenzen

Neue Experimente haben gezeigt, dass die Zugabe eines Polymers zu einer Flüssigkeit den Reibungswiderstand stärker reduziert als erwartet.

Der Reibungswiderstand entzieht einer sich bewegendenden Flüssigkeit Energie. Üblicherweise wird dieser Verlust größer, wenn die laminare Strömung zur Turbulenz übergeht. Daher führt das Einsetzen von Turbulenzen zu Problemen, wenn eine Flüssigkeit durch eine Leitung strömt – sei es Öl in einer riesigen Pipeline, Blut in der menschlichen Aorta oder Flüssigkeit in einem Wärmetauscher. Dem lässt sich durch Zugabe einer kleinen Konzentration von Polymeren zur Flüssigkeit entgegenwirken, da diese Turbulenzen unterdrücken und den Reibungswiderstand reduzieren. Jahrzehntelange Experimente haben jedoch gezeigt, dass sich auf diese Weise der Widerstand nur auf ein bestimmtes Maß senken lässt. Das Phänomen ist bekannt als „Maximum Drag Reduction“ (MDR)-Asymptote. Jenseits dieser Grenze ist die Zugabe eines Polymer wirkungslos. Ein Team um Björn Hof am Institut für Wissenschaft und Technik in Österreich hat nun aber einen Parameterbereich identifiziert, in dem sich der Widerstand über diesen Grenzwert hinaus reduzieren lässt [1]. Ihre Experimente mit Wasser und gängigen Polymeren liefern damit ein neues Bild der flüssigkeitsdynamischen Eigenschaften des MDR.

1946 entdeckte B. A. Toms zufällig die widerstandsmindernde Wirkung eines Polymer in einer Flüssigkeit, als er den mechanischen Abbau langkettiger Polymermoleküle in Wasser untersuchte, das durch ein Rohr fließt [2]. Er stellte fest, dass schon das Auflösen einer winzigen Menge Polymere in der Flüssigkeit den Reibungswiderstand um bis zu 70 Prozent reduzierte, obwohl das Polymer praktisch keinen Einfluss auf die Scherviskosität der Flüssigkeit hatte. Bis heute ist der genaue Mechanismus des Effekts unklar. Am naheliegendsten erscheint es, dass die Polymere mit der Strömung interagieren, sich strecken und

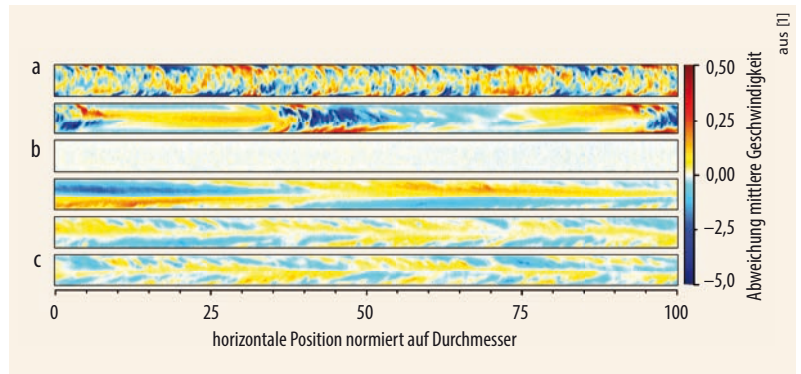


Abb. 1 Momentaufnahmen der Strömungsgeschwindigkeit zeigen, wie die Zugabe von Polymeren die Eigenschaften der Strömung verändern. Bei einer Reynolds-Zahl von 3150 liegt ohne Polymere Newtonsche Turbulenz vor (a). Mit

steigender Konzentration kommt es bei 30 ppm zu einer kompletten Relaminarisierung (b). Ein weiterer Anstieg der Konzentration auf bis zu 150 ppm verursacht eine elasto-inertielle Instabilität (c).

dabei den turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen Energie entziehen. Die Reaktion der Polymere reduziert den Impulstransport zur Wand und so den Widerstand [3].

Dass die Erhöhung der Polymerkonzentration den Widerstand nur bis zur MDR-Asymptote reduziert, ist seit den 1970er-Jahren bekannt [4]. Diese Grenze ist „universell“ für Newtonsche Flüssigkeiten in dem Sinne, dass sie im Allgemeinen nicht von der Art der Flüssigkeit oder des Polymerzusatzes abhängt [4]. Um die Grenze zu erklären, haben sich die Forscher hauptsächlich auf den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung konzentriert, der beim Erhöhen der Reynolds-Zahl (Re) auftritt.¹⁾ In Rohren ist das für eine Newtonsche Flüssigkeit wie Wasser meist bei $Re \sim 2000$ der Fall. An diesem „Grenzpunkt“ ist die Strömung instabil und enthält Bereiche mit kurzlebigen Turbulenzen. Die Zugabe des Polymer könnte diesen Grenzwert von Re auf einen höheren Wert setzen. Sobald der MDR erreicht ist, bleibt die Strömung im Grenzzustand „gefangen“ [3, 5]. Unklar ist aber, ob dieser MDR-Grenzzustand der Newtonschen Turbulenz (mit turbulenten Bereichen) oder einer noch unbekanntem Art von Turbulenz entspricht.

Bereits 2013 lieferte eine Arbeit von Mitarbeitern aus der Gruppe von Björn Hof ein besseres Verständnis des MDR-Zustands [6]. In ihren Experimenten untersuchten sie die Strömungsmuster von polymerhaltigem Wasser bei zunehmend höherer Reynolds-Zahl. Sie stellten fest, dass sich bei geringer Polymerkonzentration der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung erwartungsgemäß in Richtung höherer Reynolds-Zahlen verschiebt. Ist die Polymerkonzentration jedoch mäßig hoch, tritt der Übergang von laminarer zu ungeordneter Strömung bei Re -Werten auf, die unter denen des Übergangs in reinem Wasser liegen. Die Forscher kamen zu dem Schluss, dass eine elastische Instabilität diese unerwartet „frühe Turbulenz“ antreibt. Diese tritt auf, wenn die Strömung die Polymere ausreichend gedehnt hat. Unter diesen Bedingungen kann es zu einer neuen Art von Turbulenz kommen – der elasto-inertialen Turbulenz, bei der sich eine chaotische Strömung im gesamten Fluid statt in einzelnen Bereichen ausbreitet. Hof und Kollegen schlugen daher vor, die MDR-Dynamik mit elasto-inertialen Turbulenzen statt mit gedämpften Newtonschen Turbulenzen zu assoziieren.

1) Die Reynolds-Zahl Re ist eine dimensionslose Zahl, die das Verhältnis zwischen Trägheits- und Viskositätskräften ausdrückt.

Die neuen Experimente liefern nun schlüssigere Beweise für dieses Bild [1]. Die Forscher nutzten die so genannte Particle Imaging Velocimetry (PIV), um die Strömungsmuster von Wasser, das in einem Rohr fließt, für einen großen Bereich von Re -Werten und Polymerkonzentrationen zu bestimmen. Sie charakterisierten diese Muster als laminare Strömung, Newtonsche Turbulenz oder elasto-inertiale Turbulenz, also ausgedehnte Turbulenz mit niedriger Amplitude. Außerdem ermittelten sie den Widerstand in Form eines Reibungsfaktors, der auf dem Druckabfall entlang des Rohres basiert. Diesen Reibungsfaktor haben sie bei fester Reynolds-Zahl und steigenden Werten der Polymerkonzentration gemessen und so den MDR als denjenigen Punkt identifiziert, an dem der Reibungsfaktor auch bei steigender Konzentration abflacht.

Ihre Messergebnisse zeigen deutlich, dass die MDR-Grenze aus dem Zusammenspiel zweier Turbulenzzustände resultiert: Bei niedriger Polymerkonzentration dominiert Newtonsche Turbulenz, bei hoher Polymerkonzentration elastische Turbulenz. Insbesondere stellten die Forscher fest, dass die Zugabe der richtigen Menge an

Polymeren zu Wasser bei Reynolds-Zahlen zwischen 2000 und 3600 – wo üblicherweise Newtonsche Turbulenzen vorhanden sind – die Strömung komplett neu laminarisiert. In dieser intermediären, relaminarisierten Phase sinkt der Reibungsfaktor erstmals unter die MDR-Asymptote (Abb. 1). Die Zugabe weiterer Polymere induziert jedoch elastische Turbulenzen, die den Reibungsfaktor bis zum Erreichen des MDR ansteigen lassen.

Die Forscher testeten verschiedene Polymere und fanden heraus, dass die Widerstandsminderung unter MDR in leicht unterschiedlichen Fenstern der Reynolds-Zahl und der Konzentration auftritt. Für Polyacrylamid stellte sich die erhöhte Widerstandsminderung in Wasser mit Re bis 3600 ein. Diese Reynolds-Zahl ist mit bestimmten medizinischen Anwendungen kompatibel, bei denen man beispielsweise einen turbulenten Blutfluss in verengten Arterien (Stenose) vermeiden möchte [7, 8]. Wenn Substanzen, die den Widerstand senken, Turbulenzen vermeiden könnten, könnte das die Belastung des Herzens verringern oder eine Schädigung der Blutzellen durch übermäßige Scherung verhindern. Allerdings ist die Reynolds-Zahl

in vielen praktischen Situationen deutlich höher als 3600 – in Ölleitungen beispielsweise größer als 10^5 . So bleibt abzuwarten, ob sich dort Polymeradditive entwickeln lassen, die den Widerstand unterhalb MDR reduzieren können. Auf jeden Fall lohnt es sich, diesen Ansatz zu verfolgen, da der Unterschied im Reibungsfaktor zwischen turbulentem und laminarem Zustand in solchen Leitungen mehrere Größenordnungen beträgt. Die richtigen Additive zu finden, um die Strömung laminar zu machen, würde die Energiekosten erheblich senken.²⁾

Markus Holzner

- [1] G. H. Choueiri, J. M. Lopez und B. Hof, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 124501 (2018)
- [2] B. A. Toms, *Phys. Fluids* **20**, S3 (1977)
- [3] I. Procaccia, V. S. Lvov und R. Benzi, *Rev. Mod. Phys.* **80**, 225 (2008)
- [4] P. S. Virk, H. S. Mickley und K. A. Smith, *J. Appl. Mech.* **37**, 488 (1970)
- [5] L. Xi und M. D. Graham, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 028301 (2012)
- [6] D. Samanta, Y. Dubief, M. Holzner, C. Schafer, A. N. Morozov, C. Wagner und B. Hof, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **110**, 10557 (2013)
- [7] J. L. Unthank et al., *J. Surg. Res.* **53**, 625 (1992).
- [8] M. V. Kameneva et al., *Biorheology* **41**, 53 (2004)

2) Bei diesem Artikel handelt es sich um die bearbeitete Übersetzung von M. Holzner, Polymers reduce drag more than expected, <https://link.aps.org/doi/10.1103/Physics.11.29>

VORSICHT, GLATTEIS!

Obwohl allgemein bekannt ist, dass Eis eine rutschige Oberfläche besitzt, liegt eine vollständige Erklärung des Phänomens noch nicht vor.³⁾ Die aktuelle Forschung geht davon aus, dass ein dünner Wasserfilm durch die Reibungswärme während des Gleitens entsteht. Forscher der Uni Amsterdam und des MPI für Polymerforschung zeigten kürzlich mit spektroskopischen Messungen, dass die Glätte von Eis von der Bindung der Wassermoleküle an das darunterliegende Eis abhängt. Bei -100 °C dominieren drei Wasserstoffbrückenbindungen. Mit steigender Temperatur binden die Wassermoleküle nur noch mit zwei Brücken an das Eis und rollen wie Kugeln darüber. Die Zahl mobiler Moleküle wächst bis zum Schmelzpunkt an. Das Gleiten funktioniert aber bei -7 °C am besten, weil dann die Kufen weniger tief in das Eis eindringen.

B. Weber et al., *J. Phys. Chem. Lett.* (2018), DOI: 10.1021/acs.jpcllett.8b01188



Andrey Yurlov / Shutterstock

3) Vgl. *Physik Journal*, Januar 2018, S. 44