

■ Mysteriöser Aufstieg

Einem internationalen Team von Physikern ist es gelungen, den Mechanismus hinter dem Kapillareffekt von Granulaten zu entschlüsseln.

Prof. Dr. Devaraj van der Meer, Physics of Fluids group und Max Planck – University of Twente Center for Complex Fluid Dynamics, Universität Twente, P.O. Box 217, 7500 Enschede, Niederlande

Granulare Flüssigkeiten wie fließender Sand oder eine Schneelawine verhalten sich dem Anschein nach ähnlich den molekularen Flüssigkeiten Wasser oder Öl [1, 2]. Der Schein trügt aber! In vielen Fällen gibt es wichtige und manchmal weitreichende Unterschiede. Wäre eine Sanduhr mit Wasser statt Sand befüllt, wäre die Strömungsgeschwindigkeit nicht konstant. Stattdessen nähme sie aufgrund des fallenden hydrostatischen Drucks des Wassers stetig ab. Und obwohl auch im Sand ein ähnlicher statischer Druck herrscht, wird die Geschwindigkeit hier größtenteils von der Haftreibung der Sandkörner an der Wand in der Nähe der Verengung bestimmt.

Der obige Vorgang in der Sanduhr lässt sich als Konsequenz des so genannten Rayleigh-Janssen-Gesetzes betrachten [3]. Dieses sagt aus, dass in einem zylindrischen Behälter mit Durchmesser D das Gewicht der Körner, die sich in einer Höhe von deutlich mehr als D über einem gewissen Punkt P befinden, durch Reibung mit der Wand getragen wird. Grund für dieses Verhalten ist die Bildung von Kraftketten: Das sind Sandkörner, die rundbogenartige Strukturen

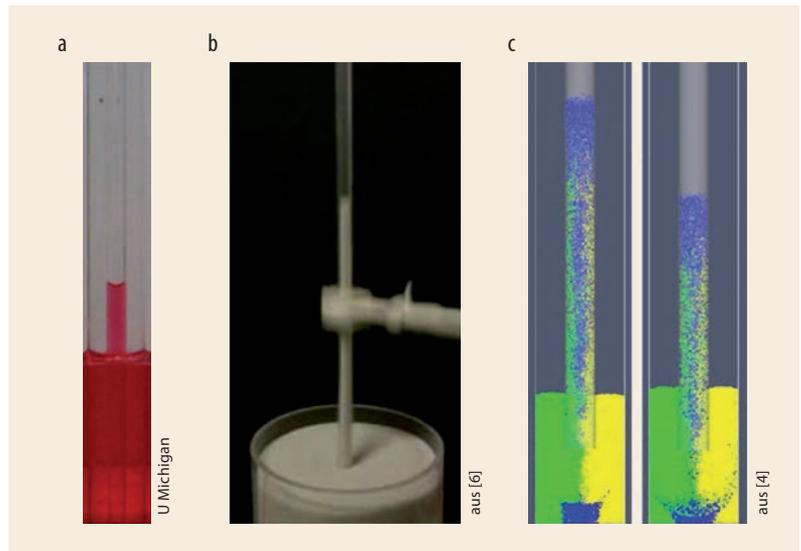


Abb. 1 Steckt eine Glasröhre in einem Gefäß mit Wasser, steigt dieses aufgrund des Kapillareffekts in der Röhre auf (a). Bei einem Gefäß, das mit Sand gefüllt ist,

tritt ein ähnlicher Effekt auf, wenn man die Röhre schüttelt (b). Dieser granulare Kapillareffekt lässt sich numerisch simulieren (c).

formen, die ähnlich einem römischen Gewölbe das Gewicht des darüber liegenden Granulats auf die Wand übertragen. In solch einem Behälter ist der Druck daher ab einer bestimmten Tiefe konstant und gleich dem Schweredruck des Materials, das sich unter diesen Strukturen befindet, nämlich einer Sandschicht der Dicke D . In der Sanduhr wird daher die Strömungsgeschwindigkeit von der Dynamik in einem kleinen Gebiet bestimmt, dessen Größe dem Durchmesser der Verengung entspricht.

Kürzlich haben Fengxian Fan von der University of Shanghai for Science and Technology, Eric J. R. Parteli vom Department Geowissenschaften der Universität zu Köln und Thorsten Pöschel von der Universität Erlangen-Nürnberg den bislang unverstandenen Kapillareffekt von Granulaten untersucht [4]. Auch in diesem Fall ähnelt sich das Verhalten granularer und molekularer Flüssigkeiten. Der molekulare Kapillareffekt ist mittels der Oberflächenspannung der Flüssigkeit zu verstehen: Innerhalb eines in Wasser getauchten Glasröhrchens steigt das Wasser ein Stück gegen die Gravitationskraft nach oben

(Abb. 1a). Grund dafür ist die Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Glas, die das Wasser so weit in das Röhrchen hineinzieht, bis das Gewicht des Wassers den kapillaren Sog ausgleicht.

Befindet sich statt Wasser ein granulares Medium wie Sand in dem Gefäß, ist ein ähnlicher Effekt zu beobachten, wenn man entweder das Granulat oder die Glasröhre schüttelt und das Granulat damit in Bewegung hält. Die Körner steigen in der Glasröhre auf und erreichen nach einer gewissen Zeit eine stabile Endhöhe (Abb. 1b). Es ist offensichtlich, dass die Ursache dieses granularen Kapillareffekts eine andere als bei Wasser sein muss. Die Anziehungskräfte zwischen den Körnern im flüssigen Granulat sind derart gering, dass die Oberflächenspannung (sofern überhaupt existent) viele Größenordnungen kleiner ist als in Wasser und der kapillare Sog unmessbar klein wäre.

Eine einfache und elegante Erklärung des granularen Kapillareffekts schien mithilfe des Rayleigh-Janssen-Gesetzes möglich [5, 6]: Innerhalb der Glasröhre mit Durchmesser D kann der Schweredruck

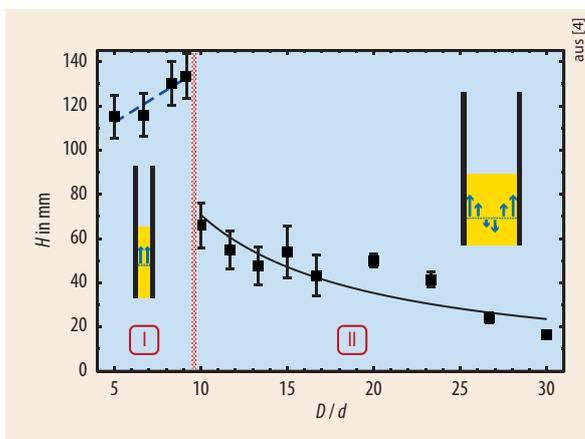


Abb. 2 Wenn die Gleichgewichtshöhe H gegen den Durchmesser der Röhre D aufgetragen wird, existieren zwei unterschiedliche Regimes. Diese lassen sich mittels einer Konvektionsströmung innerhalb der Röhre erklären, die nur bei großem D auftritt. Der Röhrendurchmesser D ist hier in Einheiten des Korndurchmessers d ausgedrückt.

demnach nie größer werden als der einer Schicht mit Dicke D . Weil der Schweredruck in dem Behälter nur von seinem eigenen, viel größeren Durchmesser eingeschränkt ist, ist er viel größer als der Schweredruck in der Glasröhre und drückt daher das Granulat in die Glasröhre hinein. Dieser Prozess dauert an, bis so viele Körner in die Röhre geflossen sind und das Niveau (und damit der Druck) in dem Behälter dermaßen gesunken ist, dass der Druck im Behälter und der Röhre im Gleichgewicht sind. Damit ist die stabile Endhöhe erreicht.

Konvektion statt Druckausgleich

Doch diese schöne Erklärung trifft leider nicht zu, wie die drei Physiker in ihrer aktuellen Arbeit zeigten. Fan, Parteli und Pöschel simulierten das gesamte System in allen Einzelheiten mittels eines numerischen Verfahrens (Abb. 1c). In diesem lösten sie die Bewegungsgleichungen der einzelnen granularen Teilchen inklusive ihrer gegenseitigen Wechselwirkung und der Wechselwirkung mit den Wänden. Dabei konnten sie zeigen, dass nicht die Reibung in der Glasröhre ausschlaggebend ist, sondern die Reibung mit der Seitenwand des äußeren Behälters. Wenn diese Seitenwand fehlt und das Granulat sich bis ins Unendliche erstreckt (numerisch ist das durch periodische Randbedingungen zu erreichen), gibt es keinen granularen Kapillareffekt. Das gleiche Ergebnis zeigt sich für einen Behälter mit reibungslosen Wänden. Nur wenn die Körner an der Behälterwand Reibung empfinden, entsteht die Kapillarwirkung.

Als nächstes liegt die Frage nahe, weshalb diese Reibung die granularen Teilchen in der Glasröhre hinauftreibt. Dieser Vorgang beruht auf einem gut erforschten Phänomen, das in einem vertikal geschüttelten granularen Medium auftritt: der Konvektion. Die Reibung treibt die Körner an der Behälterwand nach unten, sodass sich eine Konvektionsströmung einstellt, bei der die granuläre Materie in der Mitte nach oben getrieben wird. Der Ursprung des granularen Kapillar-

effekts hat also nichts mit Druckausgleich zu tun.

Als nächstes untersuchten die drei Forscher die erreichte Gleichgewichtshöhe H als Funktion des Durchmessers D der Glasröhre. Dabei fanden sie überraschenderweise zwei unterschiedliche, deutlich voneinander getrennte Regimes (Abb. 2). Auch dafür ist die Konvektion verantwortlich. Wenn weniger als etwa zehn Teilchendurchmesser d in den Durchmesser der Röhre passen, steigt das gesamte granuläre Material in der Glasröhre weit nach oben. Für größere Durchmesser bildet sich aber auch innerhalb der Glasröhre eine so genannte Konvektionsrolle. Dadurch gelangt ein Teil der Granulatteilchen in der Mitte der Röhre wieder nach unten, was zu einer deutlich niedrigeren Endhöhe führt.

Die Arbeit von Fan, Parteli und Pöschel ist nicht nur vom fundamentalen physikalischen Aspekt her wichtig, sondern wird sich auch in der industriellen Praxis als sehr nützlich erweisen. So kann der granuläre Kapillareffekt dazu dienen, granuläre Materie effizient aus einem Container heraus zu transportieren. Beispielsweise werden granuläre Lebensmittel wie Milchpulver in großen Behältern transportiert, die mittels einer Kippanlage in einen Trichter zu entleeren sind, um sie in Kleinpäckungen umzufüllen. Das wäre mithilfe des granularen Kapillareffekts mit weniger Aufwand und Platzbedarf möglich. Die aktuelle Arbeit liefert daher viele wertvolle Erkenntnisse, um dieses Verfahren optimieren zu können.

Devaraj van der Meer

- [1] H. M. Jaeger, S. R. Nagel und R. P. Behringer, *Rev. Mod. Phys.* **68**, 1259 (1996)
- [2] P.-G. de Gennes, *Rev. Mod. Phys.* **71**, S374 (1999)
- [3] B. Andreotti, Y. Forterre und O. Pouliquen, *Granular Media: Between Fluid and Solid*, Cambridge University Press, Cambridge (2013)
- [4] F. Fan, E. J. R. Parteli und T. Pöschel, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 218001 (2017)
- [5] W. Chen und R. Wei, *Phys. Lett. A* **244**, 389 (1998)
- [6] Ch. Liu, P. Wu und L. Wang, *Soft Matter* **9**, 4762 (2013)