

Granular und schwerelos

Wenn oben und unten fehlen, kommt bei der Scherung von Granulaten die Konvektion zum Erliegen.

Die Forschung an granularer Materie hat in den letzten Jahrzehnten unter Beweis gestellt, dass sich selbst in Dünen und Sandburgen spannende Probleme und faszinierende Physik verstecken können [1, 2]. Dabei entziehen sich Ansammlungen vieler Granulatteilchen bisher einer umfassenden Beschreibung, wie sie etwa bei Flüssigkeiten in den Navier-Stokes-Gleichungen besteht. Die komplexe Wechselwirkung zwischen den einzelnen Granulatteilchen mit Reibung, Haftung und Energieverlust beim Stoß erschwert eine Beschreibung im Rahmen der statistischen Physik, da sich Granulate meist fern vom Gleichgewicht befinden.

Schon 1895 hatte der Bremer Ingenieur H. A. Janssen durch seine „Versuche über Getreidedruck in Silozellen“ festgestellt, dass – anders als bei der Hydrostatik von Flüssigkeiten – bei Granulaten der Druck nicht mit der Tiefe z linear anwächst, sondern mit einer charakteristischen Längenskala z_0 einem Maximalwert zustrebt [3].¹⁾ Das nach ihm benannte Gesetz

$$P(z) = P_{\max} [1 - \exp(-z/z_0)], \quad (1)$$

hat er im zweiten Teil seiner Arbeit analog zur barometrischen Höhenformel hergeleitet, wobei allein die Reibung der Granulatteilchen mit der Wand einfließt. Das vermeintlich fehlende Gewicht des Granulats tragen also die Wände.

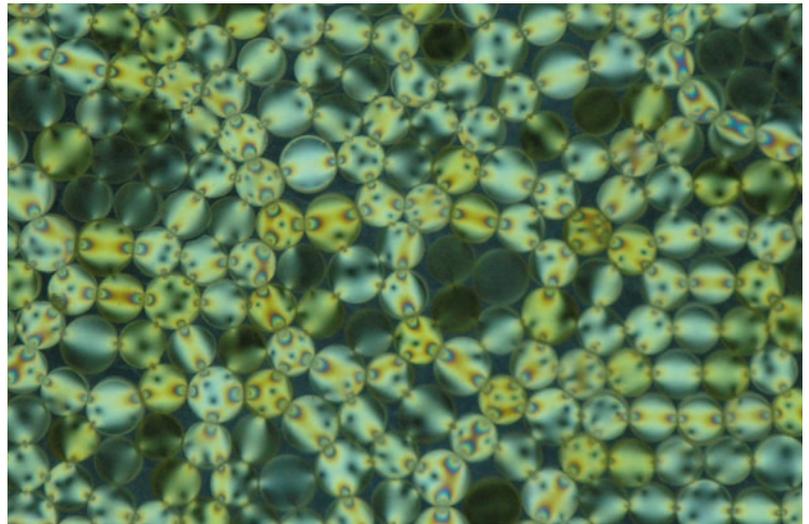


Abb. 1 Granulare Teilchen aus einem Material, das bei mechanischen Spannungen doppelbrechend ist, erlauben es, sowohl Kontaktzahlen als auch Kontaktkräfte sehr sensitiv zu bestimmen. Zwischen gekreuzten Polarisatoren er-

scheinen unbelastete Teilchen dunkel und leuchten von ihren Kontaktstellen ausgehend unter Belastung auf [4]. Ein analoges Experiment für dreidimensionale Packungen soll auf der Raumstation ISS fliegen.

Heutzutage versucht man, das Materialverhalten von Granulaten mit modernen Methoden der statistischen Physik auf Phasenübergänge oder kritische Phänomene zurückzuführen. Eine entscheidende Rolle spielen dabei Zahl und Stärke der Kontakte der Teilchen untereinander (Abb. 1). So treten bei der Zahl der Kontakte pro Teilchen Diskontinuitäten und kritische Exponenten auf, wenn das lose Granulat unter isotroper Kompression in eine feste Packung übergeht [4]. Im Gegensatz dazu weisen Computersimulationen der Scherung ohne Schwerkraft nur auf einen

eher kontinuierlichen Übergang hin [5]. Vergleichbare Experimente zur Scherung nahe am Übergang sind schwierig aufgrund der Sedimentation der Granulatschicht unter Gravitation. Für die Theorie besteht die Herausforderung darin, den Übergang unter Kompression und Scherung konsistent zu beschreiben.

Auch bei der Scherung von Granulaten sind die Kontakte der Teilchen untereinander und mit der Wand entscheidend. In einer typischen Scherzelle (Abb. 2a+b) ist so nach Gl. (1) der Druck des Granulats auf die Wand in tiefer-

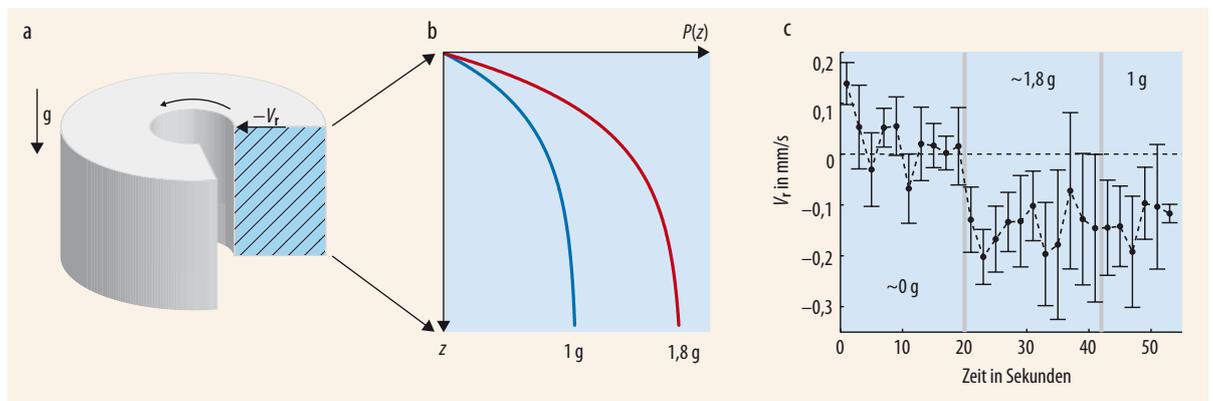


Abb. 2 In einer typischen Scherzelle (a) stellt sich entlang der Richtung der Gravitation eine inhomogene Druckverteilung ein. Folgt die Druckverteilung etwa Gl. (1), so ist diese bei 1,8 g stärker und verschwindet bei 0 g (b). Im Parabellflug

misst man für diese drei Fälle jeweils unterschiedliche radiale Geschwindigkeiten V_r unter Scherung (c) [7].

1) Die Originalveröffentlichung findet sich als PDF auf www.phy.duke.edu/~msperl/janssen/.

liegenden Schichten deutlich größer als an der Oberfläche. Dieser Druckgradient führt bei Scherung zu einem Gradienten der äußeren Scherspannung und so zu einer radialen Konvektionsströmung: Die Granularteilchen werden an der Oberfläche zur Innenwand der Scherzelle transportiert [6]. Diese Konvektion ließ sich im Experiment bereits nachweisen, ihre genaue Ursache und Bedeutung für die granulare Rheologie sind jedoch bisher unklar.

Ein Arbeitsgruppe von Wissenschaftlern aus Frankreich, England und den USA hat nun die Scherung von Granulaten während eines Parabelflugs untersucht [7]. Dabei bietet ein Parabelflug nicht unbedingt, was man sich gemeinhin unter Schwerelosigkeit vorstellt: Bei einer Restbeschleunigung von bis zu 0,05 g bewegt sich ein freies Teilchen in wenigen Sekunden immerhin um einige Meter, auch wenn diese Beschleunigungen isotrop sind. Entscheidend ist allerdings, dass der Unterschied

zwischen oben und unten während des Parabelflugs aufgehoben ist: Der Druckgradient verschwindet und die Konvektion kommt zum Erliegen (Abb. 2c). Damit haben die Experimente bestätigt, dass für die im Labor beobachtete Konvektion wohl die diskutierte ungewöhnliche Druckverteilung einer Granulatspackung verantwortlich ist, denn die während einer Flugphase auftretende erhöhte Schwerkraft bei 1,8 g verstärkt die Konvektion noch.

Die Bedingungen auf einem Parabelflug (vgl. [8]) erfordern es, das Experiment statt mit einer freien Oberfläche in einem geschlossenen Container zu betreiben. Damit kann der Druck auf die Packung aufgrund der Restbeschleunigung nicht unter fünf Prozent des Schweredruckes fallen. Weitere Fortschritte zur Aufklärung von Kräften und Druckgradienten bei granularer Scherung versprechen daher Forschungsplattformen mit besseren Bedingungen der Schwerelosigkeit. Solche Experimente sind in Vorbereitung für die internationale

Raumstation ISS, wo Methoden der granularen Spannungsoptik dreidimensionale Einblicke ins Innere von Packungen erlauben und die Analyse von Kräften ohne weitere Modellannahmen möglich ist. So soll die Erforschung von granularer Materie in Schwerelosigkeit nicht nur Staub aufwirbeln, sondern auch langfristig Spuren im grundlegenden Verständnis von Granulaten hinterlassen.

Matthias Sperl

Dr. Matthias Sperl,
Institut für Material-
physik im Weltraum,
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raum-
fahrt (DLR), 51170
Köln

- [1] H. J. Herrmann, *Physik Journal*, August/September 2005, S. 57
- [2] R. Seemann, M. Brinkmann und S. Herminghaus, *Physik Journal*, November 2009, S. 31
- [3] H. A. Janssen, *Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure* **39**, 1045 (1895)
- [4] T. S. Majmudar, M. Sperl, S. Luding und R. P. Behringer, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 058001 (2007)
- [5] C. Heussinger und J.-L. Barrat, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 218303 (2009)
- [6] R. Khosropour, J. Zirinsky, H. K. Pak und R. P. Behringer, *Phys. Rev. E* **56**, 4467 (1997)
- [7] N. Murdoch et al., *Phys. Rev. Lett.* **110**, 018307 (2013)
- [8] S. Jorda, *Physik Journal*, April 2008, S. 22