

Langkorn- oder Kurzkornreis?

Lawinenstatistik in Reishaufen hängt von der Kornform ab

Diese Frage stellen sich nicht nur Köche, sondern auch manche Physiker, wenn auch mit verschiedenem Hintergrund. Die Physik granularer Materie wurde in den letzten Jahren von zahlreichen Wissenschaftlern als Forschungsobjekt wiederentdeckt. Grund dafür ist neben der auf den ersten Blick einfachen Problemstellung aus der klassischen Mechanik die faszinierende Komplexität dieser Vielteilchensysteme. In Abhängigkeit von den Randbedingungen kann man in granularen Systemen verschiedene Aggregatzustände vorfinden. Granulare Materialien verhalten sich in Grenzfällen wie Flüssigkeiten oder Festkörper, unterliegen aber sonst der komplexen Dynamik von Systemen fern des thermodynamischen Gleichgewichts.

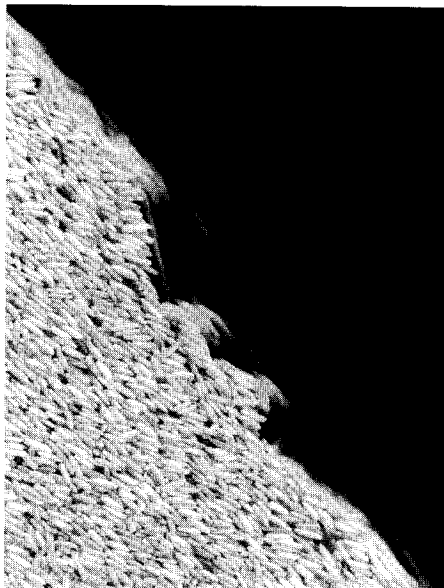
Der letzte Schritt in einer langen Reihe von Arbeiten zum besseren Verständnis der Lawindynamik in einem Reishaufen (oder allgemeineren Anhäufungen von Granulat) sind die kürzlich in *Nature* veröffentlichten Experimente von Frette et al. [1], in denen die Eigenschaften von Lang- und Kurzkornreis in der quasi-zweidimensionalen Geometrie, also zwischen zwei durchsichtigen Platten im Abstand von ca. 80% der Kornlänge, untersucht werden. Durch stetige, aber langsame Zugabe einzelner Körner bauen Frette und Mitarbeiter mit Geduld und Ausdauer Reishaufen unterschiedlicher Größen L (= Basislänge des Haufens). Der Böschungswinkel des Haufens wächst bis zu einem kritischen Winkel von rund 50° , der sowohl von der Geometrie als auch von der Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Körner abhängt. Am kritischen Winkel kann jedes weitere Korn zu einer Lawine führen, die möglicherweise die gesamte Oberfläche des Reishaufens erfasst. Hauptgegenstand der Untersuchungen von Frette et al. ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lawinengröße E , die als die potentielle Energie definiert ist, die bei einer Lawine verloren geht. Das interessante Resultat dieser Experimente ist, daß die Wahrscheinlichkeitsverteilung für große Lawinen bei länglichen Körnern (Länge: Breite $\approx 4:1$) einem Potenzgesetz gehorcht,

$$f(x) \propto x^{-\alpha}; \quad \alpha \approx 2.04,$$

während kürzere Körner (Länge: Breite $\approx 2:1$) eine exponentielle Verteilung mit einer Potenz im Argument,

$$f(x) \propto \exp(-(x/x^*)^\gamma); \quad x^* \approx 0.45; \quad \gamma \approx 0.43,$$

zur Folge haben („stretched exponential“). Dabei ist x die mit der Systemgröße skalierte Lawinengröße $x = E/L$. Bemerkenswert ist dabei der überraschende Übergang von einem Potenzgesetz zu einer gestreckten exponentiellen Verteilungsfunktion im selben Experiment, einfach durch Änderung der Teilchenform.



Lawine in einem Haufen aus Langkornreis. (Foto: A. Malthe-Sørenssen)

Ein Modell für Potenzgesetze in der Lawinenstatistik wurde bereits 1987 von Bak, Tang und Wiesenfeld [2] vorgeschlagen. Dieses Konzept der sog. selbstorganisierten Kritikalität (SOK) wurde u. a. am Beispiel eines vereinfachten Sandhaufenmodells eingeführt. Einfach ausgedrückt sagt SOK: Es gibt Zustände, die sich von selbst einstellen, bei denen jede Störung eine Kettenreaktion zur Folge haben kann, die das gesamte System erfasst. Genauer gesagt, folgt bei solchen „kritischen“ Zuständen die Lawinenstatistik einem Potenzgesetz. Im Gegensatz zu einer Exponentialverteilung können also auch sehr große Lawinen mit deutlich von Null verschiedener Wahrscheinlichkeit vorkommen.

Die Idee der SOK wurde als eine Möglichkeit gesehen, Konzepte wie Selbstähnlichkeit im Raum, also Fraktale, oder in der Zeit, also z. B. $1/f$ -Rauschen, und auch viele andere skalenfreie Phänomene, wie z. B. die Verteilung von Erdbebenstärken, zu vereinheitlichen. Im Falle von Sandhaufen haben sich solche in die SOK gesetzten Hoffnungen bislang nicht erfüllt. Ausführliche numerische Untersuchungen von Sandhaufenmodellen [3, 4] deuten zwar darauf hin, daß verschiedene Modelle in eine Klasse fallen können, also denselben Skalengesetzen gehorchen; es wurden aber schon mehrere Verhaltensklassen gefunden. Andere Experimente an langsam getriebenen Systemen zeichnen sich durch nahezu periodische Lawinen aus [5], was mit einem Phasenübergang erster Ordnung verglichen wurde [6], oder weisen eine logarithmisch langsame Relaxation auf [5]. Solche Ergebnisse führten zu der weitver-

breiteten Meinung, SOK sei kaum relevant für Sandhaufen.

Die neuen Experimente weisen jedoch auf ein kompliziertes Zusammenspiel verschiedenster Effekte hin, das weit über vereinfachte numerische Modelle, z. B. von Bak, Tang und Wiesenfeld [2], hinausgeht. Der offensichtlich wichtige Parameter ist die Kornform; Langkornreis kann z. B. besser Stapel bilden als Kurzkornreis, was eine andere Struktur des Haufens zur Folge hat. Dies ist zumindest eine mögliche Ursache für eine Lawinenstatistik, wie sie typisch für SOK ist. Die Abhängigkeit des Verhaltens der Reishaufen von anderen materialabhängigen Eigenschaften, wie Energieverlusten oder Reibung und Rotation der Körner, sind immer noch nicht vollständig verstanden.

Selbstorganisierte Kritikalität ist also nicht eine universelle Eigenschaft von Haufen granularer Materie, sondern wird nur in Einzelfällen beobachtet. Die Fragen, was genau zu SOK führt oder was SOK verhindert, sind weiter unbeantwortet. Von einer einfachen Klassifizierung granularer Systeme, sofern sie überhaupt möglich ist, ist man also noch weit entfernt. Möglicherweise jedoch wird weitere Forschung zeigen, daß SOK in granularen Medien, ähnlich wie fraktale Strukturen in Perkolationsclustern, Flußverläufen, etc. nur innerhalb problemabhängiger Längenskalen die Physik zutreffend beschreibt. Wovon solche Längenskalen neben der Kornform oder der Oberflächenbeschaffenheit des Materials noch abhängen, erfordert weitere Forschung.

Derartige noch ungelöste Fragen sind Ursachen für das große Interesse an granularen Materialien im allgemeinen und an Reishaufen im besonderen. Als allgemeinere Einführung in die Physik der granularen Materie seien z. B. die Übersichtsartikel [7, 8] empfohlen.

S. Lüding, Universität Stuttgart

- [1] V. Frette et al., *Nature* **379**, 49 (1996).
- [2] P. Bak, C. Tang und K. Wiesenfeld, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 381 (1987); *Phys. Rev. A* **38**, 368 (1988).
- [3] L. P. Kadanoff et al., *Phys. Rev. A* **39**, 6524 (1989).
- [4] H. Puhl, *Physica A* **182**, 295 (1992).
- [5] H. M. Jaeger, C.-h. Liu und S. R. Nagel, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 40 (1989).
- [6] S. R. Nagel, *Rev. Mod. Phys.* **64**, 321 (1992).
- [7] H. M. Jaeger und S. R. Nagel, *Science* **255**, 1523 (1992).
- [8] H. J. Herrmann, *Physikalische Blätter* **51**, 1083 (1995).