

ein Quantum sinkt, und manchmal kommt es schnell zu einem solchen Quantensprung. Im Mittel ergibt sich über viele Realisierungen dieses stufenweisen Zerfalls jedoch der altbekannte exponentielle Zerfall der Energie des Feldes.

Noch interessantere Zustände des elektrischen Feldes bestehen aus einer Superposition von zwei unterschiedlichen Photonenzahlen. In diesem Fall finden sich im Mikrowellenresonator z. B. die elektrischen Felder der Fock-Zustände von null und acht Photonen quantenmechanisch überlagert. Dieser Superpositionszustand kann dann in einen Fock-Zustand mit

sieben Photonen zerfallen. Das wäre ohne die Quantenmechanik unmöglich, da die mittlere Energie des ursprünglichen Überlagerungszustands nur dem Mittel aus acht und null Photonen entspricht, also vier. Solche exotischen und bisher unbeobachteten Superpositionszustände des Photonenfeldes, die bekannten Schrödinger-Katzen, werden in der Gruppe um Haroche bereits anvisiert, denn hier lässt sich der Übergangsbereich zwischen klassischer und quantenmechanischer Weltbeschreibung exemplarisch untersuchen. Man darf auf weitere Experimente gespannt sein.

Mögliche Anwendungen der Pariser Experimente bestehen in der Verarbeitung, dem Schreiben und dem Auslesen von Quanteninformation als Vorstudie zu quantenmechanischen Rechenprozessen. Aber auch wenn diese Anwendungen noch in weiter Zukunft liegen mögen, eines zumindest ist ganz sicher: Die Gründerväter der Quantenphysik hätten ihre wahre Freude an den Pariser QND-Experimenten gehabt.

Ferdinand Schmidt-Kaler

Prof. Dr. Ferdinand Schmidt-Kaler, Quanteninformationsverarbeitung, Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 11, 89069 Ulm

[1] Ch. Guerlin et al., *Nature* **448**, 889 (2007)

[2] S. Gleyzes et al., *Nature* **446**, 297 (2007)

■ Waschbrettspisten im Labor

Rippelmuster, die auf unbefestigten Straßen für ein holpriges Vorankommen sorgen, sind schon seit langem bekannt. Jetzt erst untersuchen Physiker intensiver ihre Entstehung.

Wohl jeder, der schon einmal auf unbefestigten Straßen unterwegs war, hat zu seinem Leidwesen mit ihnen Bekanntschaft gemacht: den regelmäßigen Rippeln, die an ein Waschbrett erinnern und durch das Befahren entstehen. Dieses altbekannte Phänomen behindert den Transport weltweit, besonders stark in Entwicklungsländern. Daher untersuchen insbesondere Ingenieurwissenschaftler schon sehr lange diese Musterbildung [1].

Ausgehend von einer zunächst flachen Oberfläche wachsen aufgrund einer Instabilität die immer vorhandenen kleinsten Unebenheiten so stark an, dass sich letztlich das Waschbrettmuster ausbildet. Die Wellenlänge beträgt meist zwischen 30 cm und 1 m und die Amplitude selten mehr als 5 cm. Während andere Instabilitäten, z. B. an der Grenzfläche zwischen zwei Flüssigkeiten, wie die Rayleigh-Taylor- oder die Saffman-Taylor-Instabilität, vergleichsweise sehr gut verstanden sind und ausführlich in der statistischen Physik untersucht wurden, hat die theoretische Physik bislang erst wenig zum Verständnis der Entstehung von Waschbrettspisten beigetragen [2].



Fahrzeuge sorgen auf unbefestigten Straßen mit der Zeit für waschbrettartige

Muster, die besonders in Entwicklungsländern den Verkehr behindern.

Grundsätzlich ist die Rippelbildung bei granularen Oberflächen ein weit verbreitetes Phänomen. So können z. B. Wind oder Wasserströmung ein Granulat wie Sand horizontal bewegen und damit Rippelmarken im Wattenmeer oder Dünen verursachen. Dagegen sind in dem hier betrachteten Fall die abrollenden Räder für den horizontalen Transport des Materials verantwortlich, da sie aufgrund ihres Gewichtes etwas in den unbefestigten Boden einsinken können und damit Granulat zur Seite drängen. In einer kürzlich erschienenen Arbeit haben

nun Physiker versucht, diese Instabilität in einem möglichst einfachen System besser zu verstehen [3]. Um die wesentlichen Parameter bei der Musterbildung ausfindig zu machen, untersuchten sie das System sowohl in einem einfachen Experiment als auch in Partikel-basierten Simulationen sowie einem theoretischen Modell.

In dem Experiment rollte ein Gummirad über den Rand eines rotierenden Drehtellers (Durchmesser: 1 m), der mit Sand gefüllt war. Bei der verwendeten Rotationsgeschwindigkeiten bewegte sich das

Dr. Dirk Kadau, Institut für Baustoffe, Rechnergestützte Physik der Werkstoffe, ETH Zürich, Hoenggerberg, CH-8093 Zürich

Rad mit etwa 2 m/s. In dem Experiment lassen sich sowohl die Position des Rades als auch die Höhe des granularen Bettes messen. Durch die endlichen Ausmaße des Drehellers ergeben sich periodische Randbedingungen.

Für die zum ersten Mal durchgeführten Partikel-basierten Simulationen verwendeten die Autoren „soft-particle molecular dynamics“, eine Diskrete-Elemente-Methode, in zwei Dimensionen. Hierbei werden die einzelnen Körner als elastisch verformbare Scheiben betrachtet, mit Reibung an den Kontaktpunkten. Die kohäsionslosen, runden Körner waren dabei von leicht unterschiedlicher Größe. Das Rad wurde vereinfacht als eine große Scheibe simuliert, deren horizontale Geschwindigkeit fixiert ist.

Zunächst lieferte die Simulation die hervorstechende Erkenntnis, dass sich die Instabilität auch in zwei Dimensionen ausbildet. Die Möglichkeit, in der Simulation ein zweidimensionales System untersuchen zu können, ist dabei ein entscheidender Vorteil gegenüber dem Experiment. Überraschend ist auch, dass sich die Profile der Rippelmuster im Experiment und in der Simulation verblüffend ähneln, zumal zusätzlich die betrachteten Größenskalen stark voneinander abweichen. In den Simulationen lässt sich außerdem die interne

Rippelstruktur untersuchen. Dabei trat weder Segregation noch Verdichtung des Materials auf. Einige frühere Theorien hatten diese als wichtige Faktoren für das Ausbilden der Instabilität identifiziert.

Die Experimente zeigten und die Simulationen bestätigten, dass Wellenlänge und Amplitude im Wesentlichen weder von Größe und Form der Körner abhängen, noch von der Größe des Rades. Dagegen ist die Masse m des Rades (dividiert durch Radbreite b) ein entscheidender Parameter: Mit zunehmender Masse nahm auch die Amplitude der Rippel zu, während die Wellenlänge abnahm. Außerdem hängt die Rippelbildung entscheidend von der Dichte ρ des granularen Materials und der Geschwindigkeit v ab. Zusammen mit der Erdbeschleunigung g lässt sich so eine dimensionslose Größe bilden, die das Verhältnis von Trägheits- zu Gravitationskräften beschreibt und die Entstehung des Waschbrettmusters bestimmt: $Fr = (v^2/g)\sqrt{\rho/m}$. Auch die Wellenlänge und die Amplitude der Rippel hängen von dieser sog. Froude-Zahl ab.

Bisher gibt es kaum Arbeiten, die die Rippelbildung im Rahmen einer Stabilitätsanalyse untersuchen. Both, Hong und Kurtze stellten eine lineare Stabilitätsanalyse vor, bei der die Verdichtung des Bodenmaterials eine wichtige Rolle spielt [2].

Dies ist bei den neuen Simulationen allerdings nicht der Fall. Dagegen zeigen sowohl Experiment als auch Simulation ein Hüpfen des Rades, das z. B. durch anfänglich kleinste Unebenheiten ausgelöst werden kann. Die Autoren diskutieren, wie sich die Instabilität im Rahmen einer Stabilitätsanalyse beschreiben lässt. Bei kleinem Fr (kleine Geschwindigkeiten) überwiegt die Dissipation, durch die das Hüpfen des Rades verhindert wird. Bei großem Fr kann es zum Hüpfen des Rades kommen und damit zu einer Phasenverschiebung zwischen dem horizontalen Fluss des Granulats und der, diesen Fluss treibenden, Normalkraft auf die Oberfläche durch die Masse des Rades. So können sich leichte Unebenheiten verstärken, wodurch das typische Waschbrettmuster entsteht. Die Autoren argumentieren, dass eine lineare Stabilitätsanalyse nicht möglich ist, da die Beziehung für die Kraft des Rades auf die Oberfläche stark nichtlinear ist.

Zusammenfassend gelang es zu zeigen, dass die Instabilität nicht nur in drei, sondern auch in zwei Dimensionen auftritt. Ebenfalls wurde ein grundlegender Mechanismus für das Ausbilden des Waschbrettmusters gefunden. Andere in realen Systemen auftretende Effekte wie eine Rückwärtsdrift der Rippel wurden jedoch weder beobachtet noch erklärt. Daher bleibt diese Instabilität offenbar auch weiterhin eine Herausforderung an die statistische Physik, und die Waschbrettbildung auf unbefestigten Straßen auch in Zukunft unvermeidlich.

Dirk Kadau

KURZGEFASST

■ Antimaterie und Materie im Verbund

Bereits 1946 spekulierte John Wheeler über die Existenz des Positronium-Moleküls (Dipositronium, Ps_2), das aus insgesamt zwei Elektronen und zwei Antielektronen (Positronen) besteht. Allerdings konnten Physiker von der University of California in Riverside erst jetzt Ps_2 herstellen. Die Forscher bestrahlten dafür einen kleinen Punkt auf einer porösen Siliziumdioxidprobe mit rund 20 Millionen Positronen, die sie zuvor in einer speziellen Falle gesammelt hatten. Die Siliziumdioxid-Oberfläche absorbiert die überschüssige Energie der beiden Positronium-Atome, sodass sich diese Moleküle verbinden konnten, wenn auch nur für einen kurzen Augenblick.

D. B. Cassidy und A. P. Mills Jr, Nature **449**, 195 (2007)

■ Ferromagnetisch und supraleitend

Ein holländisch-deutsches Forscherteam hat im Metall UCoGe sowohl ferromagnetische Ordnung bei einer Curie-Temperatur von 3 Kelvin als auch Supraleitung bei einer Sprungtemperatur von 0,8 Kelvin beobachtet. Nach den gängigen Vorstellungen sollten sich Ferromagnetismus und Supraleitung jedoch ausschließen. Die Forscher vermuten daher, dass es sich bei UCoGe um einen „unkonventionellen“ Supraleiter handelt, bei dem die Supraleitung durch magnetische Wechselwirkungen und nicht durch Gitterschwingungen (Phononen) vermittelt wird.

N. T. Huy et al., Phys. Rev. Lett. **99**, 067006 (2007)

- [1] W. Heath und R. Robinson, in: Highway Design and Maintenance in Developing Countries, **P193**, 11, PTRC Education and Research Services Ltd., London (1980)
- [2] J. A. Both, D. Hong und D. A. Kurtze, Physica A **301**, 545 (2001)
- [3] N. Taberlet, S. W. Morris und J. N. McElwaine, Phys. Rev. Lett. **99**, 068003 (2007)
- [4] D. C. Mays und B. A. Faybishenko, Complexity **5**, 51 (2000)