

Der Paranus-Effekt

Girl 1, Girl 2, ... Girl n , Sravanti Uppaluri und Sonia Utermann

Max Planck Institute für Dynamik und Selbstorganisation

(Dated: 5. Mai 2010)

Wir schreiben unsere Ergebnisse hier zusammen, als ob wir sie in einem wissenschaftlichen Journal veröffentlichen wollen. Wir untersuchen die Trennung nach Größe von vertikal geschüttelten Kugeln. Wir nehmen dazu einen zylindrischen Behälter, den wir mit einer Mischung aus Glas- und Stahlkugeln füllen. Wir schütteln die Probe und messen die Verteilung der Stahlkugeln mit einem Röntgengerät. Wir beweisen, dass (a) je größer die Stahlkugeln im Vergleich zu den Glaskugeln sind, desto stärker steigen sie auf, (b) die Frequenz und Stärke des Schüttelns die Geschwindigkeit des Steigens beeinflusst und (c) das Material, aus dem der Behälter gemacht ist, auch für den Effekt entscheidend ist.

PACS numbers:

I. EINLEITUNG

Wenn du eine neue Packung Müsli öffnest, hast du jemals gemerkt, dass die Nüsse, Rosinen und andere leckere Dinge ganz oben und unten nur Haferflocken sind? Dieser Effekt wird der "Paranus-Effekt" (Englisch: *the Brazil-nut effect*) genannt.¹ Viele Wissenschaftler und Ingenieure² haben sich mit diesem Effekt auseinandergesetzt, denn die unerwünschte Trennung von Körnern ist ein aktuelles Problem in Bereichen wie z.B. Betonproduktion, Pharma (Produktion von Medikamenten) und Lebensmittelproduktion. Stell dir vor: Du willst ein Medikament herstellen, das durch Mischung von zwei verschiedenen Pulvern - dem Wirkstoff und dem Trägermittel - produziert wird. Du mischst die zwei Pulver in deiner Fabrik und verarbeitest die Mischung zu Tabletten, doch ohne dein Wissen haben sich die zwei Pulver getrennt. So hast du viele Tabletten, die alle gleich aussehen, doch die Hälfte davon ist wirkungslos und die andere Hälfte enthält ein Überdosis! Noch ein Beispiel: Du mischt Beton aus Sand, Kies und Calciumcarbonat, um eine Brücke zu bauen. Wieder haben sich die Zutaten ohne dein Wissen nach Größe getrennt... nun, den Rest kannst du dir schon vorstellen.

Wir können den Beton- und Pharmaproduzenten nicht sagen, wie sie ihre spezifischen Problemen lösen können ohne erst das allgemeine Problem zu verstehen. Deshalb nehmen wir Physikerinnen heute keinen Müsli oder Aspirin sondern einfache Kugeln verschiedener Größen. Wir nehmen auch keinen Betonmischer oder Förderband, sondern einen Schüttler, der immer gleich lang und heftig schüttelt. Das alles soll bewirken, dass unsere Ergebnisse "wiederholbar" sind, d.h. dass wir oder andere Wissenschaftlerinnen das Experiment jederzeit wiederholen können um die Ergebnisse zu testen. Es hilft uns auch, auf den Kern der Sache zu kommen: welche Aussage findest du stärker: "in Müsli sind die Paranüsse meistens oben" oder "in einer Mischung aus kleinen und großen Körnern, können wir genau sagen, unter welchen Umständen die großen oben sind". Die zweite Aussage mag vielleicht auf dem ersten Blick ein wenig trocken klingen; sie ist jedoch viel genauer und allgemeiner und deshalb

wissenschaftlicher.

II. METHODE

Wir nehmen vier Proben, die verschiedene Mischungen von Glas- und Stahlkugeln enthalten. Die Glaskugeln sind transparent für Röntgenlicht, die Stahlkugeln aber nicht. Die Stahlkugeln repräsentieren die Paranüsse, die Glaskugeln die Haferflocken. Alle Proben enthalten 25 cm³ Glaskugeln, mit einem durchschnittlichen Durchmesser von 2 mm. Die Proben sind wie folgt zusammengestellt: Probe A enthält zusätzlich 50 Stahlkugeln von Durchmesser 2 mm; Probe B 35 Stahlkugeln, die 3 mm groß sind. Proben C und D haben beide 20 Stahlkugeln von 5 mm Durchmesser, aber der Behälter von Probe D ist mit Schmirgelpapier ausgekleidet um mehr Reibung zu verursachen. Anfangs mischen wir die Proben, so dass die Stahlkugeln gleichmäßig verteilt sind.

A. Schütteln

Wir montieren die Proben auf einem Schüttler, der einem sehr starken Lautsprecher ähnelt. Wir schütteln alle vier Proben mit einer von zwei Methoden: 10 Hz (Schüttlungen pro Sekunde) bei 14 V für 60 Sekunden (langsam und heftig); und 100 Hz bei 3 V für 60 Sekunden (schnell und sanft). Dies soll eine wiederholbare Simulation der Schüttlung, die das Müsli in einem LKW abbekommt, darstellen (Abb. 1).

B. Röntgenbilder

Röntgenlicht erlaubt es uns, durch die Probe zu sehen. Wenn du unglücklich genug gewesen bist, dein Arm oder Bein gebrochen zu haben, wirst du dich hiermit gut auskennen. Eine Röntgenquelle ist eine Art Glühbirne, die Elektronen erstmal beschleunigt und dann abbremst. Das Röntgenlicht, das heraus kommt, wird von Metall (und Knochen!) sehr stark absorbiert und scheint durch

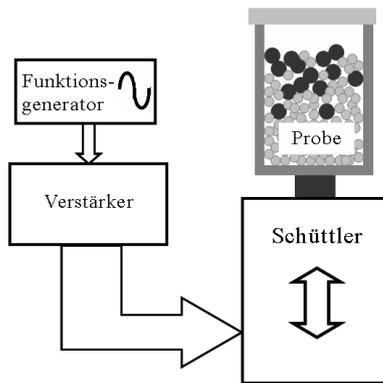


Abbildung 1: Unser experimenteller Aufbau.

Glas (und Haut) sehr leicht hindurch. Die Probe (oder dein Arm) wirft ein Schattenbild auf die Kamera, wo die stark absorbierende Stoffe als Schwarz erscheinen. Da Röntgenlicht eine viel kürzere Wellenlänge als sichtbares Licht hat, braucht man hierfür eine Röntgenkamera. Diesen Vorgang siehst du in Abbildung 2. Abbildung 3 zeigt ein typisches Röntgenbild unseres Experiments.

Die Anzahl von Stahlkugeln in der oberen Hälfte der Probe dividiert durch die Gesamtanzahl der Stahlkugeln ergibt eine Zahl zwischen 0 und 1. Eine Zahl größer als 0.5 bedeutet, dass die Stahlkugeln netto steigen (der Paranus-Effekt), weniger als 0.5, dass sie netto sinken und genau 0.5, dass sie gemischt bleiben.

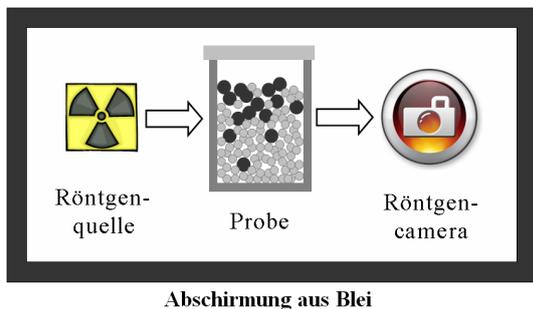


Abbildung 2: Wie ein Röntgenbild entsteht.

Röntgenstrahlung ist gefährlich für Lebewesen: in großen Mengen kann sie Krebs verursachen. Deshalb steht unser ganzes Experiment in einem Schrank aus Blei, dessen Tür nur dann aufgeht, wenn die Röntgenquelle ausgeschaltet ist.

III. ERGEBNISSE

In dem Versuch, wo wir langsam und heftig schütteln, sehen wir, dass je größer die Stahlkugel sind, desto mehr von ihnen nach oben wandern. Das ist der Paranus-

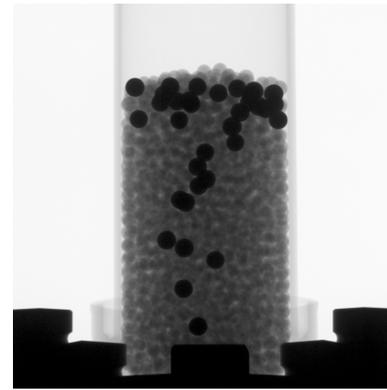


Abbildung 3: Ein typisches Röntgenbild einer unseren Proben.

Effekt. Die Ergebnisse sind als blaue Quadraten in Abbildung 4 zu sehen. Woran liegt der Paranus-Effekt hier? Liegt es daran, dass *große* Kugeln besser als kleine steigen können, oder, dass *schwere* Kugeln besser sind im Steigen? Unser Experiment kann da leider keine richtige Aussage machen, da Stahl dichter ist als Glas! Was für einen anschließendes Experiment würdest du machen, um zwischen diesen zwei möglichen Ursachen zu unterscheiden?

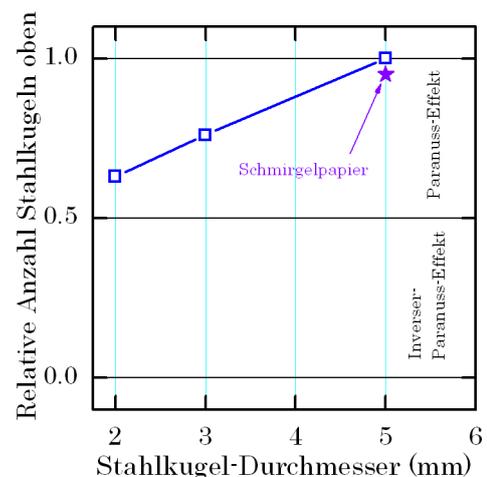


Abbildung 4: Der Paranus-Effekt in einer Mischung aus Glas- und Stahlkugeln, die mit 10 Hz bei 14 V für eine Minute geschüttelt wurden. Die Anzahl von Stahlkugeln in der oberen Hälfte der Probe dividiert durch die Gesamtanzahl der Stahlkugeln ergibt eine Zahl zwischen 0 und 1. Eine Zahl größer als 0.5 bedeutet, dass die Stahlkugeln netto steigen (der Paranus-Effekt), weniger als 0.5, dass sie netto sinken und genau 0.5, dass sie gemischt bleiben. Der Stern ist die Probe mit mehr Reibung.

In dem Versuch, wo wir schnell und sanft schütteln, sehen wir den Paranus-Effekt, aber nur für die drei

Proben mit weniger Reibung. Die Schmirgelpapier-Probe bleibt gemischt. Die Ergebnisse sind als rote Kreise in Abbildung 5 zu sehen. Was lernen wir über den Paranus-Effekt hier? Wir sehen, dass Reibung und Schüttelmethode einen Einfluss auf das Steigen der Kugeln haben.

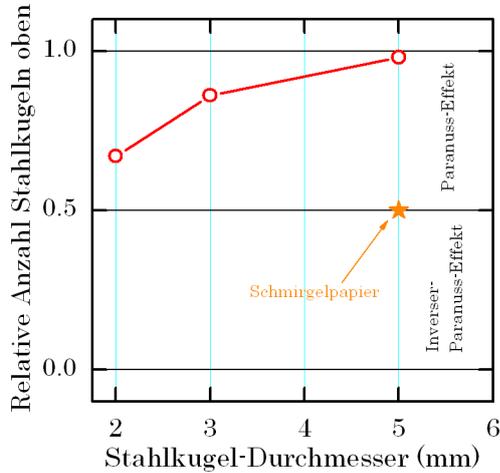


Abbildung 5: Der Paranus-Effekt in einer Mischung aus Glas- und Stahlkugeln, die mit 10 Hz bei 14 V für eine Minute geschüttelt wurden. Die Anzahl von Stahlkugeln in der oberen Hälfte der Probe dividiert durch die Gesamtanzahl der Stahlkugeln ergibt eine Zahl zwischen 0 und 1. Eine Zahl größer als 0.5 bedeutet, dass die Stahlkugeln netto steigen (der Paranus-Effekt), weniger als 0.5, dass sie netto sinken und genau 0.5, dass sie gemischt bleiben. Der Stern ist die Probe mit mehr Reibung.

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse von beiden Versuchen zusammen, zum besseren Vergleich.

IV. ZUSAMMENFASSUNG

Wir haben bewiesen, dass (a) je größer die Stahlkugeln im Vergleich zu den Glaskugeln, desto stärker steigen sie auf, (b) die Frequenz und Stärke des Schüttelns die Geschwindigkeit des Steigens beeinflusst und (c) das Material, aus dem der Behälter gemacht ist, auch für den Effekt entscheidend ist.

Das war es für die reine Wissenschaft. Aber wir Wissenschaftlerinnen mögen es, unsere Ergebnisse anzuwen-

den. Kehren wir uns also zurück zu der Anfangsfrage: warum sind die Nüsse im Müsli oben? Das haben wir nicht eindeutig beantworten können, aber das ist Okay so, denn Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen sind immer noch dabei, dieses Thema zu erforschen.³ Aber wir haben gesehen, unter welchen Bedingungen große (oder schwere) Müslizutaten in der Verpackung steigen werden. Wie könnten wir das vermeiden oder reduzieren, was meinst du? Das Müsli können wir nicht ändern

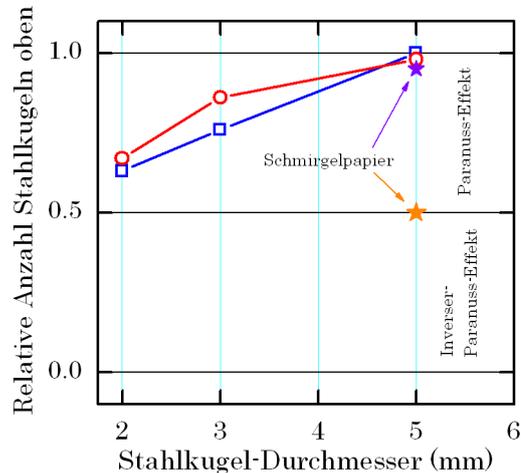


Abbildung 6: Der Paranus-Effekt in einer Mischung aus Glas- und Stahlkugeln, die mit 10 Hz bei 14 V für eine Minute geschüttelt wurden. Die Anzahl von Stahlkugeln in der oberen Hälfte der Probe dividiert durch die Gesamtanzahl der Stahlkugeln ergibt eine Zahl zwischen 0 und 1. Eine Zahl größer als 0.5 bedeutet, dass die Stahlkugeln netto steigen (der Paranus-Effekt), weniger als 0.5, dass sie netto sinken und genau 0.5, dass sie gemischt bleiben. Blaue Quadraten sind von dem langsamen, heftigen Schütteln, rote Kreise vom schnellen, sanften Schütteln. Die Sterne sind die Proben mit mehr Reibung.

(gemahlene Paranüsse schmecken nicht) und wir können den LKWs nicht vorschreiben, wie sie auf der Autobahn ihrem Fracht schütteln. Hier sind zwei Vorschläge: Wir könnten die Müsliverpackung innen rau machen; das könnte den Effekt vermindern. Oder wir könnten die Müslipackungen beim Transport flach legen; das würde die Paranüsse alle auf eine Seite bringen anstatt oben drauf. Hast du weitere Vorschläge?

¹ A. Rosato, K. J. Strandberg, F. Prinz and R. H. Swenson, Phys. Rev. Lett 58 (10), (1987)

² J. B. Knight, H. M. Jaeger and S. R. Nagel, Phys. Rev. Lett 70 (24), (1993) und Verweise darin

³ M. Schröter, S. Ulrich, J. Kreft, J. B. Swift and H. L. Swinney, Phys. Rev. E 74, 011307 (2006)