

Physik beim Frühstück

An Müsli, Kaffee und Eieruhren
das Verhalten von Granulaten untersuchen

Von Volkhard Nordmeier und Hans Joachim Schlichting

KLASSENSTUFE:	8–10
SCHULFORM:	Haupt-/Realschule, Gymnasium
ZEITUMFANG:	1–2 Stunden
THEMEN:	Mechanik: Selbstorganisation, Strukturbildung, Physik granularer Materie
VORKENNTNISSE:	Mechanik: Gewichtskraft, Druck
METHODEN:	Schüler- und Demonstrations- experimente
WEITERES MATERIAL:	Versuchskartei auf S. 99–100
LITERATURTIPPS ZUM THEMA:	[1]–[4]; s. a. Kasten 4 auf S. 22 zur „Physik der Küche“

In der Küche sind bekanntermaßen vielfältige physikalische Phänomene zu beobachten. Bereits bei der Zubereitung des Frühstücks – z. B. beim Öffnen eines frischen Päckchens Kaffee, beim Hantieren mit einer Eieruhr oder einem Trichter – begegnet man spannender Physik. In diesem Beitrag wollen wir diese Alltagsphysik aus der Perspektive der elementarsten Bestandteile der Küche betrachten, den Granulaten. Man findet sie überall, z. B. als Kaffee, Kakao, Zucker, Salz, Mehl oder Reis.

Erstaunliche Phänomene bei Granulaten in der Küche

Im Folgenden werden verschiedene „Küchenphänomene“ mit Granulaten vorgestellt. Experimente zu diesen Phänomenen zeigen die jeweils besonderen Aspekte des statischen oder dynamischen Verhaltens granularer Materie und lassen gleichzeitig die Regelmechanismen erkennen, die zu den beschriebenen Phänomenen führen (s. die Erklärungen zu den Phänomenen in **Kasten 1**; s. a. [2]). Alle Experimente lassen sich mit einfachen Mitteln durchführen.

Müsli und andere Granulatmischungen

Vermutlich jedem Müsli-Fan wird schon einmal Folgendes aufgefallen sein: Die größeren Teile wie Nüsse liegen in einer Müslimischung immer oben (s. **Abb. 1**). Da dies ein so häufig anzutreffendes Phänomen ist, spricht man sogar vom „Müsli-Effekt“ [1]. Auch Milchreis- oder Apfelpfannkuchenfreunde kennen einen ähnlichen Effekt: Zimt-Zucker-Mischungen weisen in der Nähe des Bodensatzes einen deutlichen Überschuss an Zimt auf.

Besonders eindrucksvoll lässt sich dieser Effekt mit Zucker und Mohn demonstrieren: Dazu wird ein Reagenzglas bis zur Hälfte zu gleichen Teilen und gut gemischt mit Zucker und Mohn gefüllt. Nach dem Schließen des Glases mit einem Stopfen dreht man es in die Horizontale und schüttelt es einige Male hin und her (sog. „kinetisches Sieben“). Nach kurzer Zeit bilden sich zwei Schichten aus.

Vom vakuumverpackten Kaffee zur Kaffeedose

Vakuumverpackter Kaffee ist außerordentlich hart; die geöffnete Verpackung

Foto: Nicole Neumann



Abb. 1: Der „Müsli-Effekt“ – die großen Teile sind immer oben

dagegen kann leicht mit zwei Fingern verformt werden (siehe dazu auch den Versuch in **Kasten 2**). Füllt man den Kaffee in eine Dose um, so lässt sich ein weiteres Phänomen beobachten: Durch mehr oder minder heftiges Rütteln oder Klopfen lässt sich immer noch etwas Platz im Gefäß schaffen, bis das Pulver schließlich sehr „verdichtet“ ist (s. dazu auch die Versuche auf S. 99–100).

Früher sprach man in diesem Zusammenhang von einem „gerüttelt-Maß“. Gemeint war damit, dass die gleiche Menge an Mehl oder Zucker unterschiedliche Volumina annehmen kann. Der Händler, der seinen Kunden ein „gerüttelt Maß“ an Mehl verkaufte, galt als ehrlicher und fairer als derjenige, der das Mehl nur locker schüttete.

Über Eieruhren und Staus im Trichter

Die Zeit zum Kochen eines Frühstückseis (s. dazu auch den Beitrag auf S. 8–11) wird auch heute noch oft mit einer Sanduhr gemessen, ebenso wie die optimale Zeitdauer für das Zähneputzen. Schon früh hat man sich für die Konstruktion von Sanduhren die besonderen „Fließeigenschaften“ von Sand zunutze gemacht. Denn obwohl Sand aus Körnchen

Phänomene der Granulatphysik

Mischungen von Granulaten

Zur Deutung des „Müsli-Effekts“ bzw. der Phänomene bei der Mischung von Granulaten mit unterschiedlicher Korngröße gibt es unterschiedliche Ansätze. Die einfachste Erklärung beruht darauf, dass durch Rütteln und Schütteln (z. B. beim Transport der Müsli-Packung) die kleineren Teilchen nach und nach durch die Lücken zwischen den großen fallen und so unter die größeren Teile geraten. Auf diese Weise werden die großen Teilchen langsam „angehoben“.

Ein anderer Erklärungsansatz geht davon aus, dass beim Schütteln eine Konvektionsströmung angetrieben wird, die auch bei größeren Gefäßen zu beobachten ist. Bei kleineren Gefäßen werden jedoch die größeren Teilchen an der Abwärtsströmung gehindert und bleiben oben, wenn sie oben angelangt sind.

Volumen und „Kompressibilität“ von Granulaten

Pulver oder Granulate können unterschiedlich dicht gepackt sein, wie die Phänomene beim Kaffee in unterschiedlichen Verpackungsformen zeigen. Granulate sind also in gewissen Grenzen sogar kompressibel: Sie können bei gleicher Masse unterschiedliche Volumina einnehmen.

Sind Granulate sehr dicht gepackt (in der Idealvorstellung z. B. in Form einer „dichtesten Kugelpackung“), so kann eine Verformung nur gelingen, wenn gleichzeitig auch das Volumen zunimmt (s. Versuch in **Kasten 2**). Ist der Kaffee luftdicht in einer unelastischen Plastikhülle verpackt, kann sich das Volumen nicht vergrößern, und eine Verformung wird verhindert. Dieses Phänomen wird auch als „Dilatanz“ bezeichnet und lässt sich nicht nur im Modell (s. **Abb. 2**), sondern auch mit Versuchen auf einfache Weise demonstrieren bzw. erfahrbar machen (s. Versuche im **Kasten 2** sowie auf S. 99–100).

„Kraftbrücken“ in Granulaten

Hier lässt sich eine Querverbindung zur Bogenbildung aus dem Bau herstellen: Will man beim Bau Fenster oder Türen mit Steinen „überbrücken“, ordnet man die Steine auf einem Bogen an. Wenn ein solcher Bogen belastet und damit tendenziell „gerade“ gebogen wird, dann müssen die Steine auf einer kürzeren Strecke

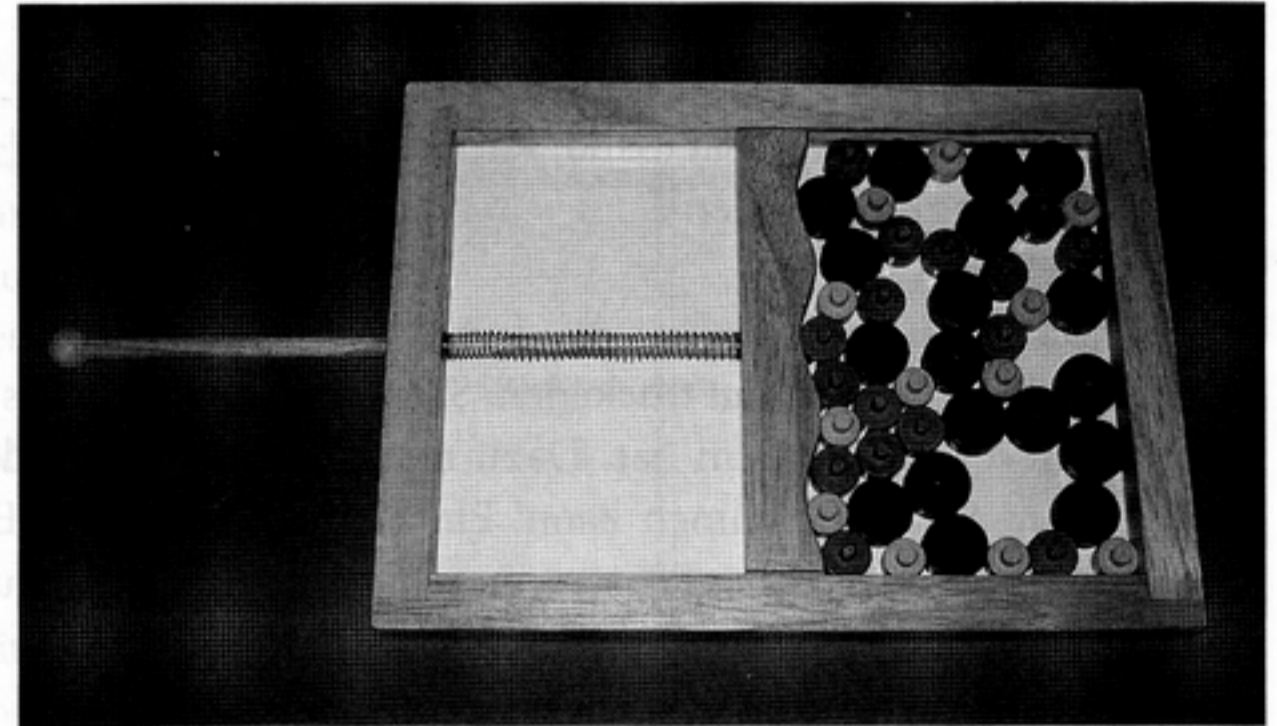


Abb. 3: „Kraftbrücken“ beim Scheibenmikado-Spiel

Platz finden, was zu einer Kraft auf die seitlich benachbarten Steine und damit letztlich auf das seitliche Mauerwerk führt. Ähnlich entstehen aus Granulateilchen durch Zufall solche Bögen oder Brücken, die dann die Kraft der auflastenden Teilchen zur Seite und damit letztlich auf die Gefäßwände „umlenken“. Die unter der Brücke liegenden Teilchen „spüren“ dann von den so abgeschirmten oberen Teilchen nichts mehr.

Wenn auf diese Weise die gesamte Last auf kleine Flächenelemente der Gefäßwände umgelenkt wird, dann kann der lokale Druck so groß werden, dass es im Extremfall zu einer Explosion des Gefäßes kommt, wie man von Getreidesilos weiß.

Ein einfaches Modell für diese Brückenbildung ist das „Scheibenmikado“ (s. **Abb. 3**), bei dem verschieden große Spielsteine durch Federkraft zusammengedrückt werden. Weil dadurch für den Spieler nicht sichtbare Brücken gebildet werden, können – sofern kein Stein aus einer solchen Brücke entfernt wird – nach und nach Spielsteine entnommen werden, ohne dass sich die durch die Feder gedrückten Steine bewegen. Stellt man das Spielbrett senkrecht auf und denkt sich die Federkraft durch die Schwerkraft zahlreicher darüber liegender Steine ersetzt, so hat man genau die Konstellation, die bei den Granulaten für die „Ableitung“ von Kräften auf die Seitenwände führt.

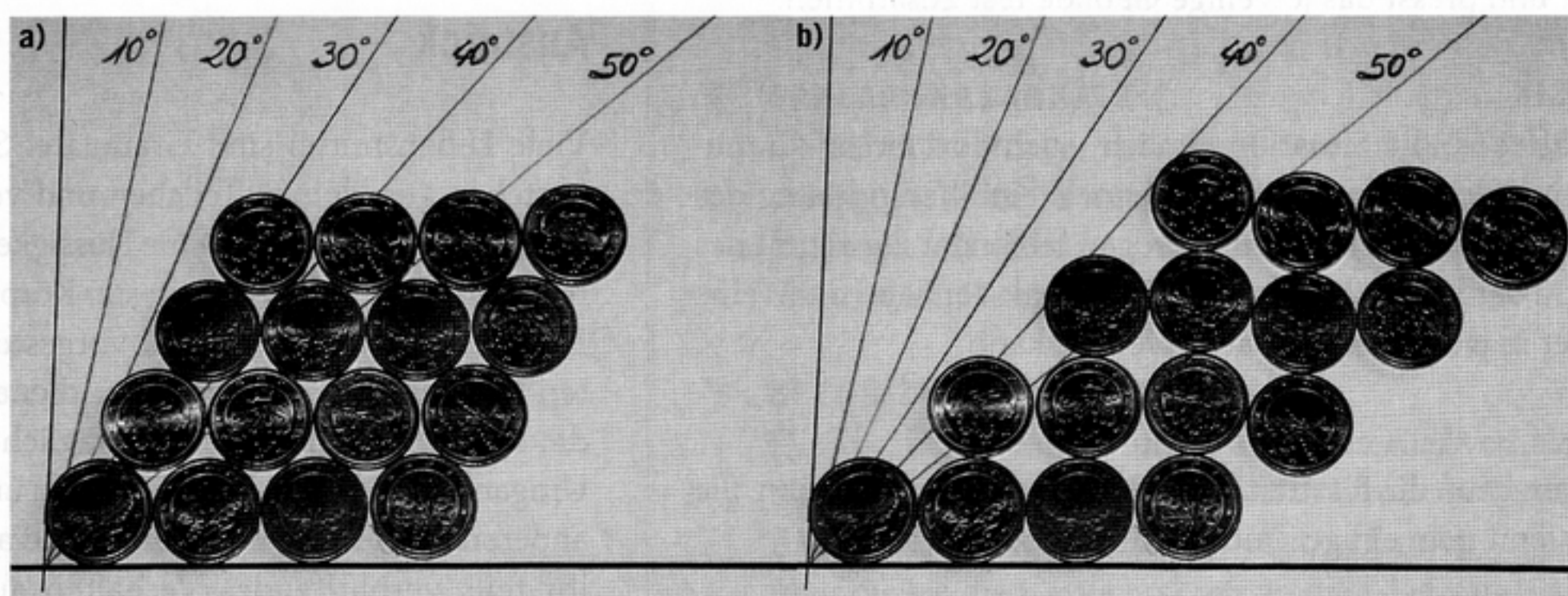


Abb. 2: Sind Granulate sehr dicht gepackt, geht eine Verformung bzw. Scherung immer mit einer Volumenvergrößerung einher. Dies lässt sich auf einfache Weise mit Münzen zeigen, die zunächst in Form einer „dichtesten Kugelpackung“ zusammengelegt (a) und dann z. B. per seitlich angelegtem Lineal langsam „geschert“ werden (b): Der Lücken zwischen den Münzen werden größer, der Platzbedarf steigt

Wenn Sand sich wie Knete verhält

▼ MATERIAL

- Luftballon
- feinkörniges Granulat (Sand, Kaffee, Mehl o. Ä.)
- Trichter zum Befüllen

▼ VORBEREITUNG

Der Luftballon wird mit trockenem Sand gefüllt, so dass er schließlich einen Durchmesser von etwa 10 cm hat. Dazu muss er mehrfach gedehnt werden, damit er weiteren Sand aufnehmen kann. Ein Trichter hilft beim Einfüllen. Anschließend wird der Luftballon möglichst so verschlossen, dass keine Luft mehr über dem Sand im Ballon ist.

▼ DURCHFÜHRUNG

Zunächst formt man den gefüllten Ballon zu einer Kugel, wenn er nicht schon von selbst diese Form angenommen hat. In dieser Form fühlt er sich weich an, wie man es von dem trockenen Sand erwartet.

Nun wird der Ballon in eine anderer Form gebracht, indem man ihn beispielsweise zu einer Scheibe plattdrückt. Man erwartet vielleicht, dass dies aufgrund der Beweglichkeit des Sandes gar nicht möglich ist. Doch merkwürdigerweise fühlt sich der Ballon wie Knetgummi an, sobald er die Kugelform verlässt, und er verbleibt sogar in dieser Form. Man kann auf diese Weise beliebige Formen des Ballons gestalten, wie etwa ein rechteckiges „Brett“ (s. Abb. 4).

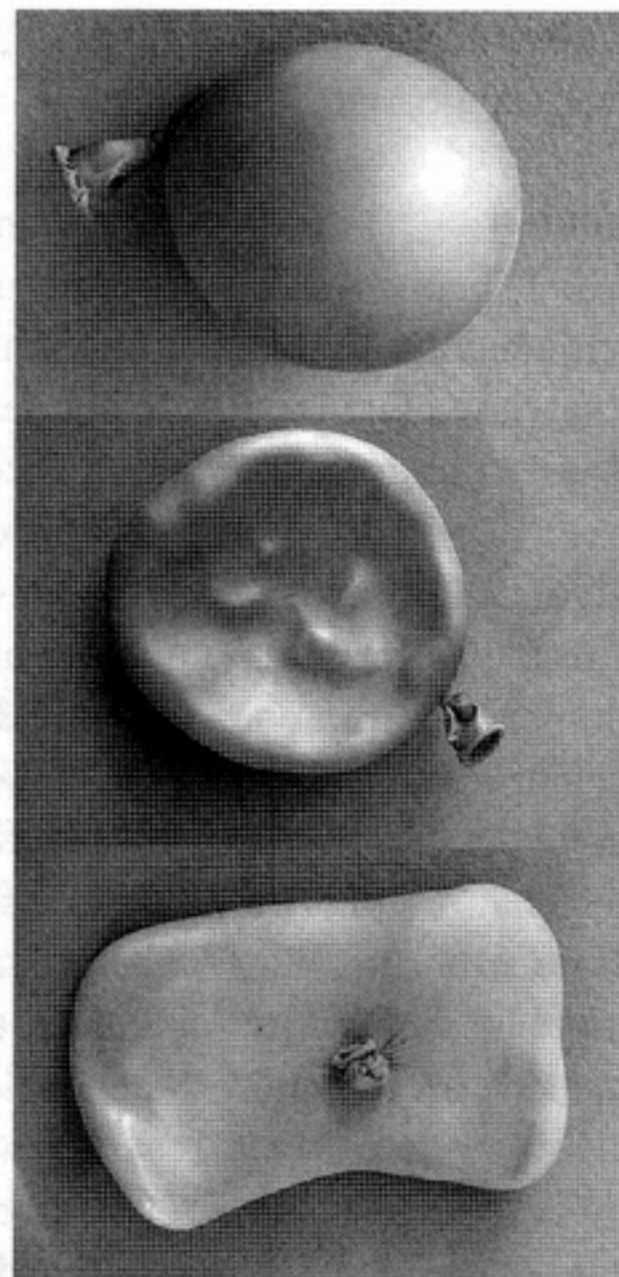


Abb. 4: Ein mit trockenem Sand gefüllter Luftballon lässt sich wie Knetgummi in verschiedene Formen bringen

▼ ERKLÄRUNGSANSATZ

In der Kugelform nimmt der Sand das kleinste mögliche Volumen ein. Wenn man die Kugel verformt, vergrößert man daher das Volumen. Da nun der Inhalt luftdicht von der Umgebung getrennt ist, kann das nur dadurch gelingen, dass die zwischen den Sandkörnern befindliche Luft verdünnt wird, also ein Unterdruck entsteht. Der äußere Luftdruck überwiegt und presst das jeweilige Gebilde fest zusammen.

▼ BEZUG ZUR ALLTAGSPHYSIK

Beim vakuumverpackten Kaffee ist die Situation ähnlich, auch dort ist ein Granulat luftdicht verpackt. Weil mit der Verformung des Beutels eine Veränderung des Volumens verbunden ist, widersetzt sich der Beutel wegen fehlender Elastizität des Materials der Verformung. Da der Luftballon elastisch ist, behält der Sand darin eine gewisse Plastizität, so dass er in jede Form gebracht werden kann.

▼ HINWEIS

Nach mehreren Verformungen kann die Plastizität des Ballons etwas abnehmen. Sie stellt sich aber wieder ein, wenn man einige Zeit (ca. 10 Minuten) wartet.

besteht, kann er dennoch fließen wie Wasser. Allerdings würden Sanduhren mit Wasser nicht in gleicher Weise funktionieren, denn der Druck im Wasser nimmt mit der Füllhöhe zu, und bei geringer Füllhöhe würde aufgrund des zu klein gewordenen Drucks der Wasserstrom durch Oberflächenkräfte zum Stillstand kommen. Das ist beim Sand nicht so: Hier bleibt der Druck ab einer bestimmten Füllhöhe konstant. So erklärt sich das für die Zeitmessung notwendige gleichmäßige Rieseln des Granulats in einer „Eieruhr“.

Dieselbe Physik, die für das gleichmäßige Rieseln von Granulaten sorgt, ist übrigens auch für Staus im „Granulatfluss“ verantwortlich: Wer schon einmal mit einem kleinen Trichter Salz in den Salzstreuer oder Spülmaschinensalz per Trichter eingefüllt hat, kennt diesen Effekt, den man ebenso bei anderen, auch größeren Granulaten beobachten kann (s. die Erklärungen in **Kasten 1** sowie die Versuche in den **Kästen 3–4**).

Granulate im Unterricht

Selbstorganisationsphänomene sind komplex, und ihre Erklärungen häufig anspruchsvoll. An den hier vorgestellten Beispielen zur Physik granularer Materie zeigt sich aber, dass es möglich ist, wesentliche Ideen und Regelmechanismen der Selbstorganisation und Strukturbildung – und damit Themen der modernen Physik – auch Schülerinnen und Schülern in der Sekundarstufe I zugänglich zu machen. Weitere Anregungen rund um die Themen „Chaos und Struktur“ finden sich in [3].

Ausblick

Viele Lebensmittel sind Granulate. Sie bestehen aus kleinen Teilchen und verhalten sich teilweise wie eine Flüssigkeit, teilweise aber auch wie ein fester Körper. Die hier und auf S. 99–100 vorgestellten Experimente können dazu dienen, die Aufmerksamkeit beim alltäglichen Umgang mit solchen Lebensmitteln und anderen Granulaten zu schärfen und auf ihr teils verblüffendes Verhalten aufmerksam zu machen.

Wenn Sand sich wie Knete verhält

▼ MATERIAL

- Luftballon
- feinkörniges Granulat (Sand, Kaffee, Mehl o. Ä.)
- Trichter zum Befüllen

▼ VORBEREITUNG

Der Luftballon wird mit trockenem Sand gefüllt, so dass er schließlich einen Durchmesser von etwa 10 cm hat. Dazu muss er mehrfach gedehnt werden, damit er weiteren Sand aufnehmen kann. Ein Trichter hilft beim Einfüllen. Anschließend wird der Luftballon möglichst so verschlossen, dass keine Luft mehr über dem Sand im Ballon ist.

▼ DURCHFÜHRUNG

Zunächst formt man den gefüllten Ballon zu einer Kugel, wenn er nicht schon von selbst diese Form angenommen hat. In dieser Form fühlt er sich weich an, wie man es von dem trockenen Sand erwartet.

Nun wird der Ballon in eine anderer Form gebracht, indem man ihn beispielsweise zu einer Scheibe plattdrückt. Man erwartet vielleicht, dass dies aufgrund der Beweglichkeit des Sandes gar nicht möglich ist. Doch merkwürdigerweise fühlt sich der Ballon wie Knetgummi an, sobald er die Kugelform verlässt, und er verbleibt sogar in dieser Form. Man kann auf diese Weise beliebige Formen des Ballons gestalten, wie etwa ein rechteckiges „Brett“ (s. Abb. 4).

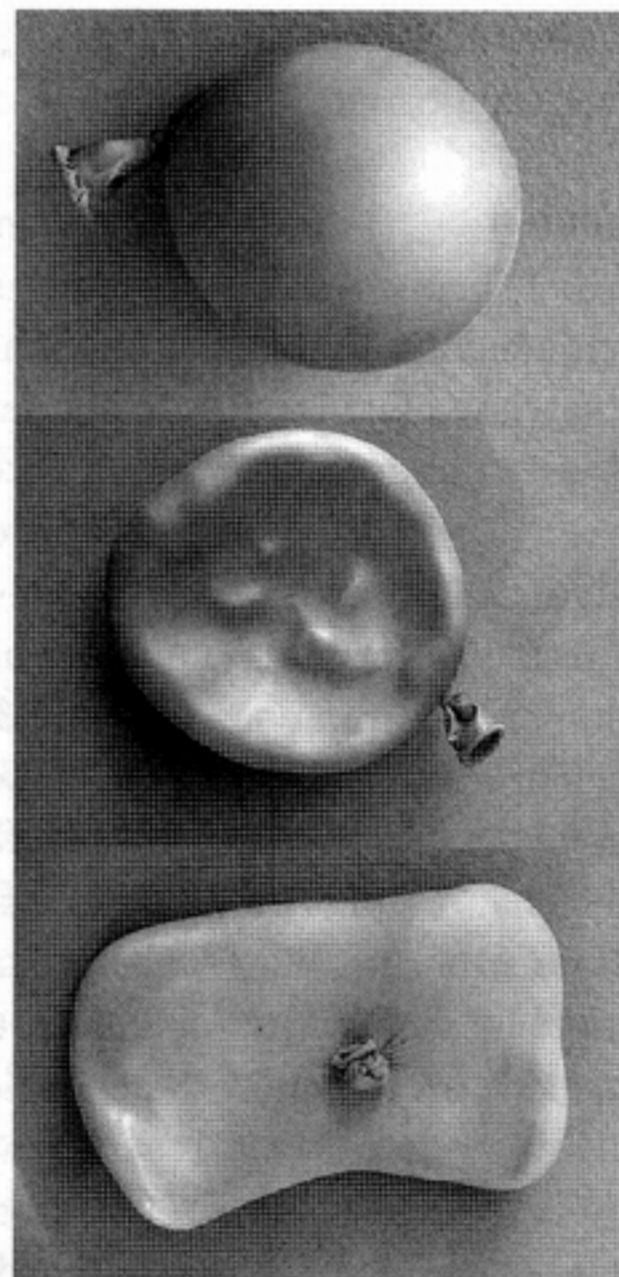


Abb. 4: Ein mit trockenem Sand gefüllter Luftballon lässt sich wie Knetgummi in verschiedene Formen bringen

▼ ERKLÄRUNGSANSATZ

In der Kugelform nimmt der Sand das kleinste mögliche Volumen ein. Wenn man die Kugel verformt, vergrößert man daher das Volumen. Da nun der Inhalt luftdicht von der Umgebung getrennt ist, kann das nur dadurch gelingen, dass die zwischen den Sandkörnern befindliche Luft verdünnt wird, also ein Unterdruck entsteht. Der äußere Luftdruck überwiegt und presst das jeweilige Gebilde fest zusammen.

▼ BEZUG ZUR ALLTAGSPHYSIK

Beim vakuumverpackten Kaffee ist die Situation ähnlich, auch dort ist ein Granulat luftdicht verpackt. Weil mit der Verformung des Beutels eine Veränderung des Volumens verbunden ist, widersetzt sich der Beutel wegen fehlender Elastizität des Materials der Verformung. Da der Luftballon elastisch ist, behält der Sand darin eine gewisse Plastizität, so dass er in jede Form gebracht werden kann.

▼ HINWEIS

Nach mehreren Verformungen kann die Plastizität des Ballons etwas abnehmen. Sie stellt sich aber wieder ein, wenn man einige Zeit (ca. 10 Minuten) wartet.

besteht, kann er dennoch fließen wie Wasser. Allerdings würden Sanduhren mit Wasser nicht in gleicher Weise funktionieren, denn der Druck im Wasser nimmt mit der Füllhöhe zu, und bei geringer Füllhöhe würde aufgrund des zu klein gewordenen Drucks der Wasserstrom durch Oberflächenkräfte zum Stillstand kommen. Das ist beim Sand nicht so: Hier bleibt der Druck ab einer bestimmten Füllhöhe konstant. So erklärt sich das für die Zeitmessung notwendige gleichmäßige Rieseln des Granulats in einer „Eieruhr“.

Dieselbe Physik, die für das gleichmäßige Rieseln von Granulaten sorgt, ist übrigens auch für Staus im „Granulatfluss“ verantwortlich: Wer schon einmal mit einem kleinen Trichter Salz in den Salzstreuer oder Spülmaschinensalz per Trichter eingefüllt hat, kennt diesen Effekt, den man ebenso bei anderen, auch größeren Granulaten beobachten kann (s. die Erklärungen in **Kasten 1** sowie die Versuche in den **Kästen 3–4**).

Granulate im Unterricht

Selbstorganisationsphänomene sind komplex, und ihre Erklärungen häufig anspruchsvoll. An den hier vorgestellten Beispielen zur Physik granularer Materie zeigt sich aber, dass es möglich ist, wesentliche Ideen und Regelmechanismen der Selbstorganisation und Strukturbildung – und damit Themen der modernen Physik – auch Schülerinnen und Schülern in der Sekundarstufe I zugänglich zu machen. Weitere Anregungen rund um die Themen „Chaos und Struktur“ finden sich in [3].

Ausblick

Viele Lebensmittel sind Granulate. Sie bestehen aus kleinen Teilchen und verhalten sich teilweise wie eine Flüssigkeit, teilweise aber auch wie ein fester Körper. Die hier und auf S. 99–100 vorgestellten Experimente können dazu dienen, die Aufmerksamkeit beim alltäglichen Umgang mit solchen Lebensmitteln und anderen Granulaten zu schärfen und auf ihr teils verblüffendes Verhalten aufmerksam zu machen.

Stau im Rohr

▼ MATERIAL

- durchsichtiger Glas- oder Kunststofftrichter, Strohhalm o. Ä.
- Sand, Erbsen oder anderes Granulat
- Stativmaterial

▼ DURCHFÜHRUNG

Mit einem längeren Glasrohr bzw. einem durchsichtigen Trinkhalm, etwas Sand und einem Glastrichter aus dem Chemiebedarf lässt sich ein eindrucksvoller Versuch durchführen: Man befüllt das Glasrohr mit trockenem Sand. Dieser fließt durch das Rohr bzw. den Trinkhalm ab. Insbesondere bei kleinen Rohrdurchmessern kommt es dann oft plötzlich zu einem Stau (s. **Abb. 7**).

Wenn man den Stau mithilfe eines dünnen Stabes zu beseitigen versucht, indem man von oben auf die Sandsäule drückt, passiert Erstaunliches: Der Stau verstärkt sich. Mit einem leichten Klopfen gegen das Rohr kann man den Granulatstrom wieder in Gang setzen – bis es wiederum zu einem Stau kommt.

▼ ERKLÄRUNGSANSATZ

Wie beim „Sanduhren-Effekt“ (s. **Kasten 1** und Versuch in **Kasten 3**) ist auch hier aufgrund von „Kraftbrücken“ (s. dazu **Kasten 1**) im Granulat der Druck unabhängig von der Füllhöhe des Röhrchens. Durch eine zufällige Konstellation im Rohr bilden sich auch „Kraftbrücken“ aus, die den gesamten Querschnitt überspannen (s. **Abb. 8**) und so für einen „Stau“ sorgen.

▼ BEZUG ZUR ALLTAGSPHYSIK

Schüttet man beispielsweise Salz oder Teeblätter mithilfe eines Trichters in ein Gefäß mit einer engen Öffnung, so kann der Fluss leicht ins Stocken geraten. Druck von oben macht die Sache dann eher noch schlimmer. Leichte seitliche Schläge können Abhilfe schaffen.

▼ HINWEIS

Als Freihandexperiment gelingt dieses Experiment auch mit einem gewöhnlichen Haushaltstrichter und etwas größeren Granulaten wie z. B. Erbsen oder Haferflocken (s. **Abb. 9**).

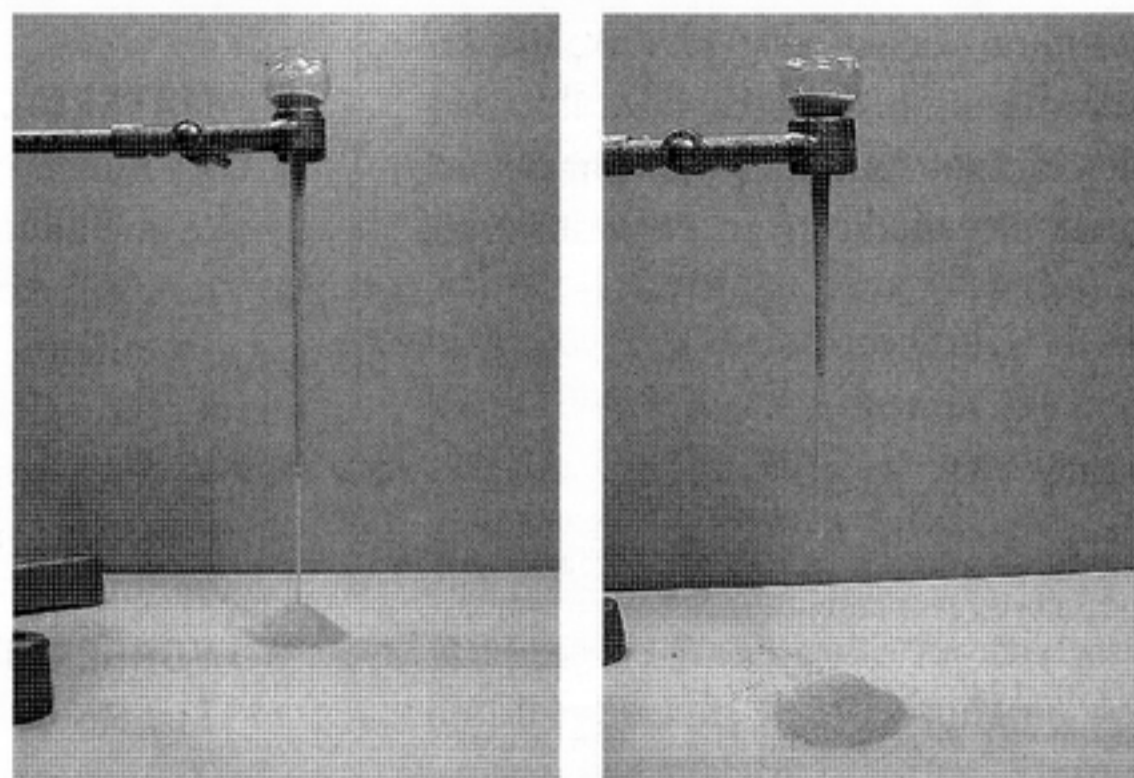


Abb. 7: Ein Stau aus dem Nichts im Rohr

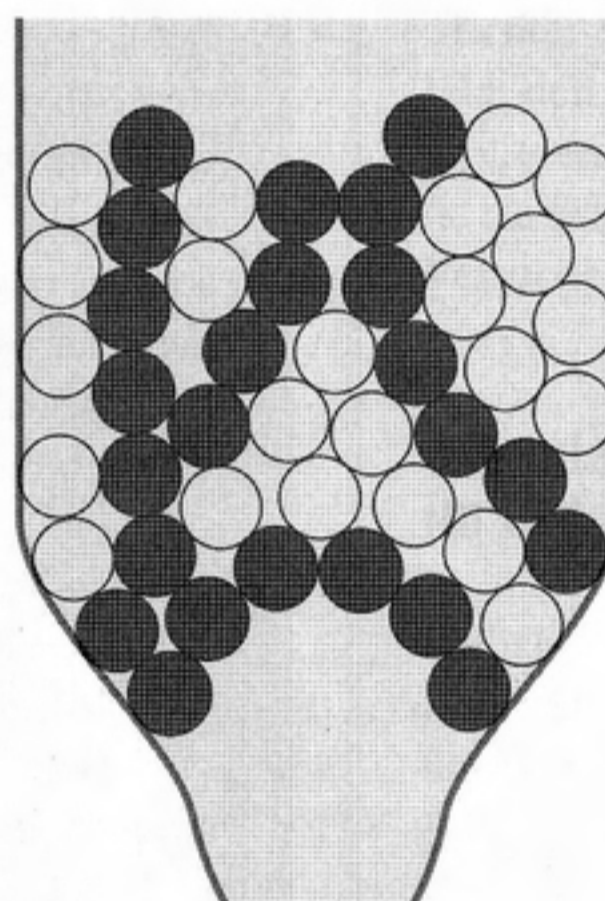


Abb. 8: Kraftbrücken“ können das Fließen von Granulaten verhindern (verschiedene mögliche „Kraftbrücken“ sind in der Zeichnung dunkel markiert)

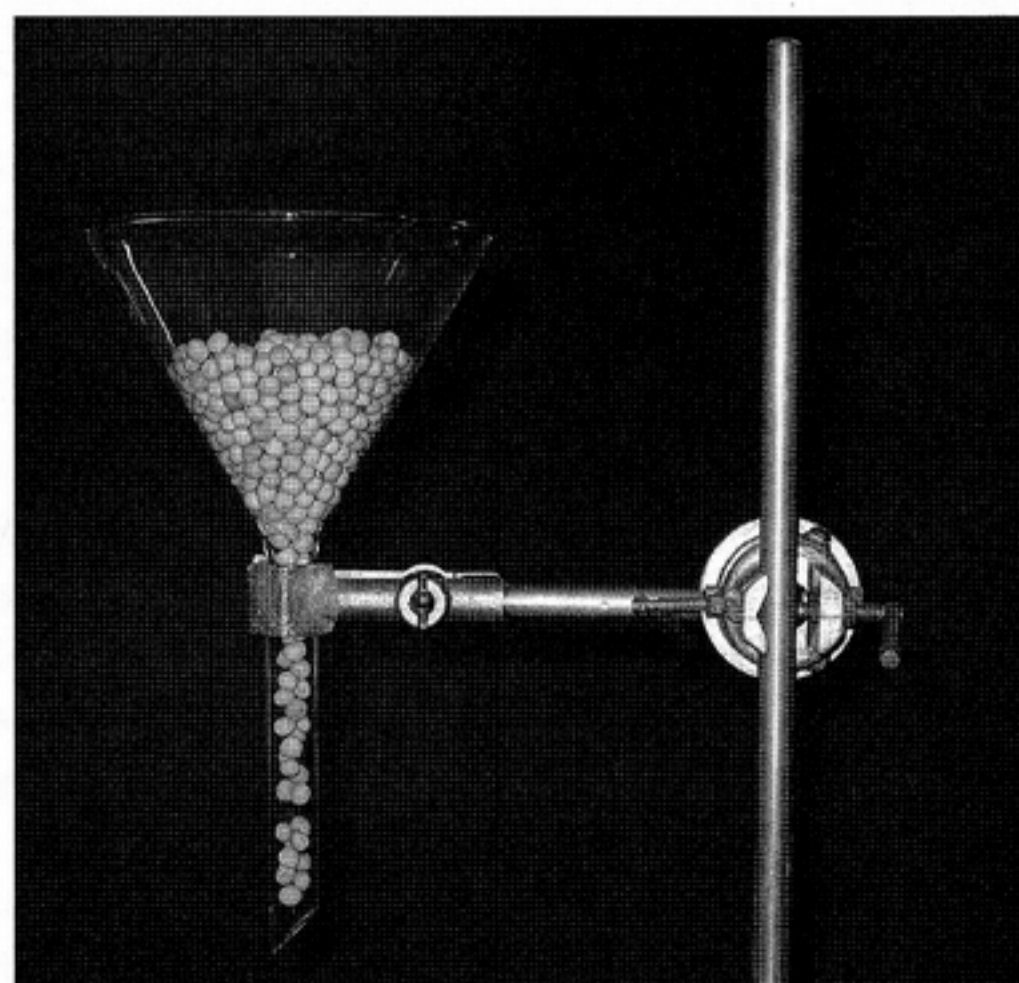


Abb. 9: „Staus“ in Trichtern lassen sich auch mit größeren Granulaten demonstrieren