

# Experiment 08: Aggregatzustände

einfach vorhanden (1x)

Stand: 27.07.2016 // v14

## Phänomen

Feine, pulvrige Granulate zeigen ein erstaunliches Verhalten: Sie können schwingen und es können Luftblasen darin aufsteigen – wie in Flüssigkeiten. Dafür rieseln sie nur sehr schwer im Vergleich zu grobkörnigere Granulate.

## Einleitung (für Schüler\_innen)

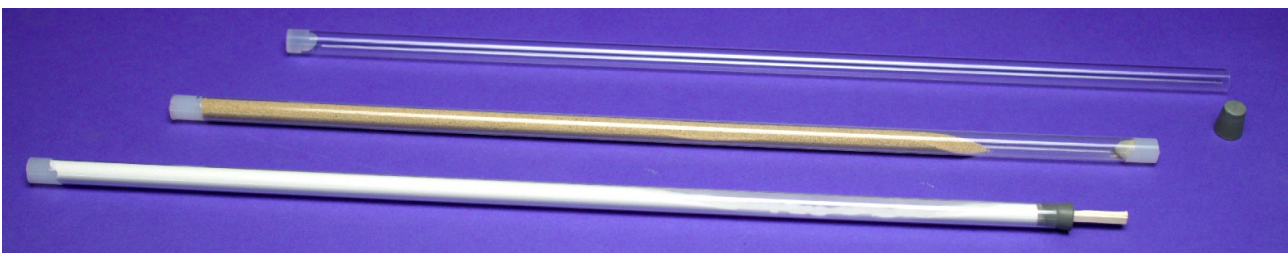
Normalerweise ist es sehr einfach festzustellen, ob ein Stoff gasförmig, flüssig oder fest ist. Allerdings gibt es bei der genaueren Untersuchung von feinen Pulvern Überraschungen.

## Material

- Acrylglasrohr, offen (befüllbar mit Wasser)
- Acrylglasrohr, gefüllt mit Sand (Quarzsand, Korngröße 0,1–0,4 mm)
- Acrylglasrohr, gefüllt mit feinem Glasgranulat (Glaskugeln, Korngröße  $< 50 \mu\text{m}$ ) und mit durchbohrtem Stopfen

## Zusätzlich benötigtes Material

- optional: Lineal oder Zollstock, mind. 50 cm



## Vorbereitung

Das offene Rohr wird zu ca. 80 % mit Wasser gefüllt (idealerweise destilliertes Wasser, um auf Dauer Kalkablagerungen zu verhindern) und mit dem Stopfen verschlossen.

## Durchführung

1. **Rieselfähigkeit:** Die drei Rohre werden jeweils umgedreht und auf dem Tisch abgestützt, damit sie vor Störungen (Vibration, Wackeln) geschützt sind. Nach dem Aufrichten wird beobachtet, wie die drei Stoffe sich nach unten bewegen.

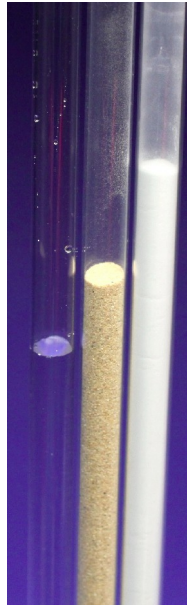
- Wasser: fließt einfach hinunter
- Sand: rieselt herunter
- Glasgranulat: rieselt langsam und stockend herab



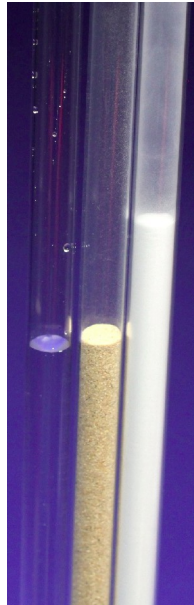
## Experiment 08: Aggregatzustände

2. **Verdichtung:** Nachdem alle drei Stoffe hinunter geriebelt bzw. geflossen sind, kann untersucht werden, inwieweit sie sich verdichten lassen. Mit einem Filzstift kann die ursprüngliche Füllhöhe auf dem Acrylrohr markiert werden. Danach kann durch leichtes Klopfen versucht werden, den Inhalt des Rohrs zu verdichten.

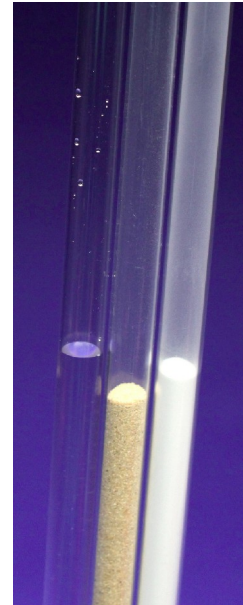
- Wasser: lässt sich gar nicht verdichten
- Sand: reagiert sofort und sackt bei kleinsten Vibrationen zusammen
- Glasgranulat: sackt langsam herab (von alleine, ca. 1 min)



unverdichtet



leicht verdichtet

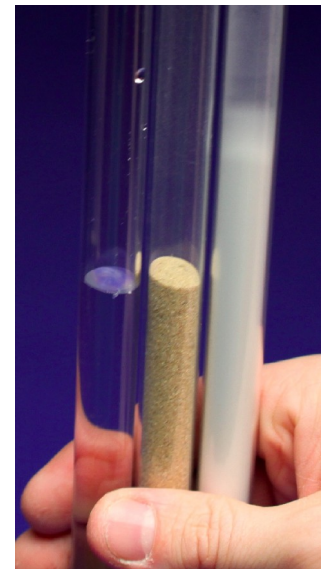


stark verdichtet

3. **Schwingfähigkeit:** Für diesen Teil des Experiments müssen die Granulate in den Rohren erneut hinunter rieseln, damit sie locker liegen (wie beim ersten Teil *Rieselfähigkeit*). Allerdings muss beim Glasgranulat-Rohr der durchbohrte Stopfen oben sein. Danach wird beim Glasgranulat-Rohr der Metalldübel aus dem durchbohrten Stopfen entfernt. Der Effekt ist auch bei geschlossenem Stopfen zu beobachten, aber schwächer, da die im Rohr eingeschlossene Luftsäule bzw. der innere Druck die Schwingung dämpft. Bei Sand und Wasser ist der Effekt nicht zu beobachten, auch nicht bei geöffnetem Rohr.

Die Rohre werden geschüttelt oder leicht auf den Tisch geklopft und es wird beobachtet, wie sich die Inhalte verhalten.

- Wasser: schwingt nicht nach
- Sand: schwingt nicht nach
- Glasgranulat: schwingt nach, wie eine Feder



Das Schwingen des Glasgranulats im Rohr kann besonders deutlich  *gespürt*  werden, wenn das Glasgranulat-Rohr in der Hand leicht geschüttelt wird. Dieser Effekt nimmt mit zunehmender Verdichtung ab.

Ebenso kann beim Schütteln beobachtet werden, wie sich im Glasgranulat-Rohr oben Pulverfontänen bilden.

## Experiment 08: Aggregatzustände

4. **Luftblasen:** Wird das Glasgranulat-Rohr schräg gehalten, können beim Herabrieseln Luftblasen beobachtet werden, die im Granulat aufsteigen – ähnlich wie in einer Flüssigkeit.

### Mögliche Arbeitsaufträge

- a) **Untersuchung** – Wie stark lassen sich die verschiedenen Füllungen (Wasser, Sand und Glasperlen) verdichten? Dazu soll verglichen werden, wie hoch das Material steht, wenn es:
- locker gepackt ist, d. h. direkt nach dem Rieseln, ohne dass es abgesackt ist und
  - wie hoch das Material steht, wenn es verdichtet wurde, d. h. wenn es festgerüttelt wurde.

Daraus kann dann der prozentuale Unterschied errechnet werden, der der möglichen Verdichtung entspricht (zu beachten: der Inhalt füllt nicht das gesamte Rohr, sondern geht nur bis zum Anfang des Stopfens). Welche Füllung hat die größte Verdichtung?

Zum einfacheren Messen kann jeweils die unverdichtete und verdichtete Füllhöhe mit einem abwischbaren Stift (z. B. Filzstift) am Rohr markiert werden.

Berechnungen:  $Verdichtung = \frac{Höhendifferenz}{Starthöhe}$ ;  $Höhendifferenz = Starthöhe - Endhöhe$

- b) **Hypothesenbildung** – Warum verhalten sich die unterschiedlichen Materialien so?

### Hinweise

**Weiteres Glasgranulat** ist in der Nachfüllflasche vorhanden.

**Nachschwingen beim Glasgranulat funktioniert nicht / Glasgranulat hat sich festgesetzt** – Um ein Nachschwingen zu ermöglichen, ist es wichtig, dass das Glasgranulat aufgelockert ist und viele Lufteinschlüsse hat. Dies wird erreicht, indem das Granulat herunter rieselt. Wenn das Glasgranulat bereits stark verdichtet bzw. festgesetzt ist, kann dies sehr schwierig sein. Eine mögliche Lösung dafür ist es, das Rohr mit dem Glasgranulat schräg zu halten und mit leichten Vibrationen das Granulat zu lockern. Dies muss wiederholt werden bis das Granulat von alleine rieselt (normalerweise nach 2–3 Wiederholungen erreicht). Dann kann ein Nachschwingen beobachtet werden.

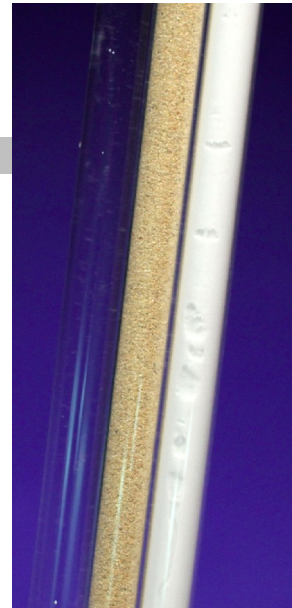
### Zusammenhang mit

→ *Experiment 04: Granularer Greifer*

### Fachlicher Hintergrund

Die **Rieselfähigkeit** ist ideal bei großen, trockenen Granulaten. Je größer ein Granulat ist, desto besser kann es rieseln. Ebenso wirkt der Feuchtigkeitsgehalt darauf ein. Je trockener ein Granulat ist, desto besser kann es rieseln. Ab einer bestimmten Größenordnung (weniger als ca. 100 µm) sind die Pulver so fein, dass sie nicht mehr ungehindert von der Luft durchströmt werden können und folglich schlechter rieseln. Zusätzlich wirken bei feineren Pulvern molekulare Bindungskräfte (van-der-Waals-Kräfte), sowie elektrostatische Kräfte, die auch dazu führen, dass die Pulver stärker aneinander haften.

Eine **Verdichtung** ist bei Wasser nicht möglich, da es in guter Näherung inkompressibel ist. Der Sand lässt sich schneller als das Glaspulver verdichten, da die Luft leichter aus den Zwischenräumen entweichen kann. Weitergehend lässt sich das Glaspulver stärker verdichten, da es durch die schlechte Luftdurchlässigkeit, beim Aufschütteln ein größeres Volumen einnehmen kann.



## Experiment 08: Aggregatzustände

Die **Schwingfähigkeit** für das Glaspulver liegt darin begründet, dass sich im locker liegenden Glaspulvergranulat Luft einschließen zwischen den einzelnen Glasperlen befinden (Luftzwischenräume). Diese sind komprimierbar und für die Schwingfähigkeit verantwortlich. Daher nimmt die Schwingfähigkeit auch mit zunehmender Verdichtung ab. Der Sand schwingt nicht, weil die Luft nahezu ungehindert den Sand durchströmen kann. Das Glaspulver ist so fein, dass es das Durchströmen der Luft behindert.

Die **Luftblasen** im Glasgranulat-Rohr entstehen, weil das Glaspulver luftdicht ist (s. o.) und die Luft nicht zwischen den einzelnen Glasperlen ungehindert nach oben entweichen kann. Zusätzlich entwickeln Granulate bzw. Pulver unterhalb einer bestimmten Korngröße (weniger als ca. 100 µm) Eigenschaften, die denen von Flüssigkeiten ähnlich sind. Feine Granulate / Pulver zeigen ein Verhalten, das mit der Oberflächenspannung vergleichbar ist. Es bilden sich Blasen darin und wenn das feine Granulat durch einen dünnen Trichter rieselt, dann bilden sich sogar Tropfen. Das ist auch die Erklärung, wie die Fontänen beim Schütteln entstehen können.

### Beispielmesswerte

	Starthöhe* (in mm)	Endhöhe* (in mm)	Höhendifferenz (in mm)	Verdichtung (prozentual, gerundet)
Wasser	427	427	0	0 %
	427	427	0	0 %
	427	427	0	0 %
Mittelwert				0 %

Sand	427	393	34	8,0 %
	428	389	39	9,1 %
	426	394	32	7,5 %
Mittelwert				8,2 %

Glasgranulat	442	372	70	15,8 %
	437	372	65	14,9 %
	452	367	85	18,8 %
Mittelwert				16,5 %

\* abzgl. der Höhe des Stopfens (hier jeweils 39 mm) – Muss beachtet werden, wenn von der Tischplatte aus gemessen wird.

Das Messen der Verdichtung des Glasgranulats ist aus zwei Gründen schwierig:

- sofort nach dem Herabrieseln beginnt es von selbst abzusacken und sich zu verdichten,
- es ist schwierig den Punkt zu bestimmen, an dem das Glasgranulat vollständig verdichtet ist.

Zur Lösung: a) Es sollte möglichst schnell die Starthöhe ermittelt werden und b) der Zustand maximaler Verdichtung ist erreicht, wenn das Granulat nicht mehr nachschwingt.

## Experiment 08: Aggregatzustände

### Alltagsbezug / Anwendungen / Kontexte

**Phasenübergang erster und zweiter Ordnung** – Zur vertiefenden Behandlung können beim Thema Aggregatzustände oder in der Thermodynamik auch die Phasenübergänge erster und zweiter Ordnung behandelt werden. Phasenübergänge erster Ordnung zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine latente Wärme beim Übergang benötigen, die aber nicht zu einer Erhöhung (bzw. Verringerung) der Temperatur führt. Von der Beobachtung her ändert sich der Aggregatzustand dann schlagartig. Anders beim Phasenübergang zweiter bzw. höherer Ordnung, wo der Übergang kontinuierlich stattfindet (wie z. B. bei Glas).

**Jamming** – Eine mögliche Betrachtungsweise ist, dass beim *Experiment 04: Granularer Greifer*, das Granulat unter der Veränderung von Druck auch seinen Aggregatzustand ändert von formbar (vergleichbar mit flüssig) zu fest.

**Volumen- vs. Masseangaben** – Feine Puder sind in vielen Industriezweigen von Bedeutung (z. B. als Pigmente für Farben oder in der Kosmetikindustrie, Bestandteile von Tabletten). Der Umgang und der Transport davon wird maßgeblich durch seine besonderen Eigenschaften bestimmt. Bei solch feinen Pudern können Volumina nicht als Verkaufsmaß genutzt werden, weil die Dichte stark schwankt, abhängig davon, wie sehr das Pulver geschüttelt bzw. verdichtet wurde. Deswegen werden feine Puder grundsätzlich in g (bzw. kg) angegeben.

### Rahmenlehrplanbezug

**Aggregatzustände** – Dieser Versuch und die weiterführenden Materialien zeigen, dass manche Eigenschaften von fest und flüssig verschwinden. Damit können Eigenschaften bestimmter Aggregatzustände direkt kontrastiert werden und es kann z. B. offen diskutiert werden, unter welchen Aggregatzustand Granulate fallen müssten.

### Lagerungshinweise / Instandhaltung

Damit Algenbildung und Trübung im Wasserrohr verhindert wird, sollte das Wasserrohr nach dem Experimentieren entweder entleert und offen gelagert werden oder dem Wasser ein Zusatzstoff hinzugesetzt werden (z. B. chlorhaltige Reinigungsmittel / Antischimmelmittel, Poolreinigungsmittel etc.).

### Weiteres Material auf: [www.niliphex.de](http://www.niliphex.de)

Video *Phasenübergang bei durch Vibration angeregten Granulaten – Sixty Symbols (2011): Granular Dynamics* (engl., Dauer 9:51)  
[https://www.youtube.com/watch?v=HKvc5yDhy\\_4](https://www.youtube.com/watch?v=HKvc5yDhy_4)  
(letzter Zugriff: 11.05.2016); ShortLink: <https://v.gd/bkC6Yx>



Webseite *Granulares Leidenfrostphänomen – van der Weele, K. (2005): Granular Leidenfrost effect* (engl., 1/2 Seite)  
[http://www.math.upatras.gr/~weele/weelerecentresearch\\_Leidenfrost.htm](http://www.math.upatras.gr/~weele/weelerecentresearch_Leidenfrost.htm)  
(letzter Zugriff: 11.05.2016); ShortLink: <https://v.gd/PQVjjV>



Video *Komprimiertes feines Puder ergibt einen Festkörper – Grains de Bâtisseurs (2013): chap 7 / exp n°12 "le comprimé de poudre"* (frz., Dauer 0:54)  
<https://www.youtube.com/watch?v=ezvCSYG9sGM>  
(letzter Zugriff: 11.05.2016); ShortLink: <https://v.gd/umbcVR>



Video *Sand fließt wie eine Flüssigkeit – Grains de Bâtisseurs (2013): chap 1 / exp n°1 "le tas et le poids"* (frz., Dauer 1:00)  
<https://www.youtube.com/watch?v=JTI35lhoU28>  
(letzter Zugriff: 11.05.2016); ShortLink: <https://v.gd/2PiTiY>



## Experiment 08: Aggregatzustände

Video *Sand hat kein Oberflächenspannung – Grains de Bâtisseurs (2013): chap 1 / exp n°2 "les salières"* (frz., Dauer 0:35)

<https://www.youtube.com/watch?v=Qv8yrZLGRcE>

(letzter Zugriff: 11.05.2016); ShortLink: <https://v.gd/b5l1Sm>



Text *Sand im freien Fall bildet Tropfen – Scharf, R. (2009): Rieselnder Sand bildet 'Tropfen'*. (dt., 2 Seiten)

<http://www.pro-physik.de/details/news/prophy11942news/news.html>

(letzter Zugriff: 30.05.16). ShortLink: <https://v.gd/YGIxwnj>



Video *Lockereres und festes Granulat verhalten sich unterschiedlich – Grains de Bâtisseurs (2013): chap 1 / exp n°5 "le tube de poudre qui rebondit"* (frz., Dauer 0:48)

[https://www.youtube.com/watch?v=HDJaFr81K\\_Y](https://www.youtube.com/watch?v=HDJaFr81K_Y)

(letzter Zugriff: 30.05.2016); ShortLink: <https://v.gd/00Hvkl>



Video *Schwingendes Granulat im Rohr – Jérôme Combes (2010): Jérôme et le sable #1* (frz., Dauer 4:48)

<http://www.universcience.tv/video-jerome-et-le-sable-1-1652.html>

(letzter Zugriff: 30.05.2016); ShortLink: <https://v.gd/RAjYjd>



Text und Videos *Herausspritzen von Tropfen in granularem Material – Royer, J. R. (2006): BakingSodaJets*. (engl., 2 Seiten)

<http://jfi.uchicago.edu/~jaeger/group/granular2/jets.html>

(letzter Zugriff: 30.05.2016); ShortLink: <https://v.gd/0WgPd0>



Video *Aufsteigen von Luftblasen in feinem Granulat – Grains de Bâtisseurs (2013): chap 1 / exp n°4 "le tube de poudre"* (frz., Dauer 1:04)

<https://www.youtube.com/watch?v=og8F6pA9Ldc>

(letzter Zugriff: 30.05.2016); ShortLink: <https://v.gd/byEjEL>



Video *Fließendes Pulver sieht aus wie Wasser – Grains de Bâtisseurs (2013): chap 1 / exp n°3 "les goutelettes de poudre"* (frz., Dauer 0:46)

<https://www.youtube.com/watch?v=AluhWsBMnrA>

(letzter Zugriff: 30.05.2016); ShortLink: <https://v.gd/UL2HxR>



Video *Vergleich geschütteltes Wasser und Sand – Sandtke, M.; van der Meer, D.; Versluis, M.; Lohse, D. (2003): Faraday, Jets, and Sand*. (engl., Dauer 3:00)

<https://www.youtube.com/watch?v=v9T4hHs4yMw>

(letzter Zugriff: 30.05.2016); ShortLink: <https://v.gd/xH5gGh>



Fachwissenschaftlicher Text *Wie verdichtet sich granulare Materie? – Linz, S. J. (2001): Kompaktionsdynamik granularer Materie: Warum sind Corn-Flakes Tüten nie ganz voll?. In: Physik Journal, 57 (10), S. 51–55*. (dt., 5 Seiten)

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/phbl.20010571018/abstract>

(letzter Zugriff: 11.07.2016); ShortLink: <https://v.gd/D4TxzK>



GEFÖRDERT VON

**GESAMTMETALL**  
Die Arbeitgeberverbände der Metall- und Elektro-Industrie

think  
**INO**  
Die Initiative für  
Ingenieurwachstums

**sdw**  
Stiftung der Deutschen Wirtschaft  
Wir stiften Chancen!

Entwickelt von Joachim S. Haupt und der

Didaktik der Physik  
AG Nordmeier

Freie Universität  Berlin

Lizenz der Inhalte von NiliPhEx:



– CC0 1.0 – gemeinfrei / bedingungslos



[www.niliphex.de](http://www.niliphex.de)

Komplette, editierbare Dokumentation und weitere Materialien

6 / 6