

# Experiment 12: Rayleigh-Bénard-Konvektion – Wabenmuster

mehrfach vorhanden (15x)  
Stand: 27.07.2016 // v14s

## Einleitung (für Schüler\_innen)

Wird eine Flüssigkeit erwärmt (z. B. Öl in einer Bratpfanne) ist bekannt, dass dabei Strömungen entstehen, die die Flüssigkeit durchmischen. Allerdings können diese Strömungen auch besondere Formen annehmen, wie dieses Experiment zeigt.

## Material pro Schülergruppe

- rheoskopische Flüssigkeit  $\approx 20$  ml  
(Silikonöl mit einer Viskosität von 50 cSt, versetzt mit Kupferpigment)
- Messpipette (3 ml)
- quadratische Dose (golden)
- runde Dose (silbern)
- Probenbehälter
- kleines Brett

## Zusätzlich benötigtes Material

- Wasserkocher (lediglich einer für alle Gruppen benötigt)
- optional: Lineal



## Vorbereitung

Vor dem Versuch muss die Flasche mit der rheoskopischen Flüssigkeit gut geschüttelt werden, bis kein Bodensatz mehr vorhanden ist (ca. eine halbe Minute).

In die kleine runde Dose (silbern) werden ungefähr 6 ml dieser Flüssigkeit gegeben. Falls die rheoskopische Flüssigkeit bereits in der runden Dose ist (von vorherigen Versuchen), kann sie mit der Pipette vermischt werden (rühren und aufsaugen), sodass die Kupferpigmente gut im Silikonöl verteilt sind.

## Durchführung

Die quadratische Dose (golden) wird zu ca.  $\frac{3}{4}$  mit kochend heißem Wasser gefüllt und mit dem Deckel verschlossen. Falls die Dose transportiert werden soll, kann sie auf eines der Bretter gestellt werden.

## Experiment 12: Rayleigh-Bénard-Konvektion – Wabenmuster

Die offene(!) runde Dose (gefüllt mit der rheoskopischen Flüssigkeit) wird auf den heißen Deckel der quadratischen Dose gestellt. Nach kurzer Zeit bilden sich zellartige Strukturen bzw. ein Wabenmuster. Mithilfe der Messpipette und des Probenbehälters kann die Menge an rheoskopischer Flüssigkeit verändert werden, um den Effekt zu untersuchen.

Wenn der Effekt der Zellbildung nachlässt, sollte das Wasser in der quadratischen Dose gegen neues kochend heißes Wasser ausgetauscht werden.



### Mögliche Arbeitsaufträge

- Beobachten:** Wie verändert sich die Größe der Zellen, wenn die Menge der rheoskopischen Flüssigkeit verändert wird?
- Untersuchen:** Die Zellgröße soll in Abhängigkeit von der Flüssigkeitsmenge gemessen werden. Hierfür wird zuerst die runde Dose entleert und dann schrittweise mit der Messpipette rheoskopische Flüssigkeit hinzugefügt.

Um die Zellen zu messen, gibt es mehrere Methoden:

Erstens: Mittels eines angehaltenen Lineals deren Breite gemessen werden. Da die Zellen aber unterschiedlich groß sind, kann auch der folgende Ansatz gewählt werden: Mit einem Lineal wird die Länge mehrerer benachbarter Zellen gemessen und danach durch die Anzahl der Zellen geteilt, um einen Mittelwert zu bestimmen.

Zweitens: Mit Hilfe einer Kameraaufnahme und einem Pixellineal (bzw. Bildschirmlineal) kann die Größe der Zellen vermessen werden, indem ein Foto von der gesamten Dose gemacht wird. Der Dosendurchmesser (61 mm) wird hierbei als Eichwert genommen und so können die Zellen mit Hilfe eines Bildschirmlineals vermessen werden (z. B. [PixelRuler](#), [Meazure](#) oder [PixelStick](#)) oder auch mit einem Lineal auf dem Bildschirm gemessen werden.

## Experiment 12: Rayleigh-Bénard-Konvektion – Wabenmuster

Versuchsnr.	1	2	3	4	5
Flüssigkeitsmenge (ml)					
Zellengröße (mm)					
errechnete Schichtdicke (mm) [Aufgabe c]					
errechnete Proportion (Zellgröße / Schichtdicke) [Aufgabe d]					

- c) **Berechnung Schichtdicke:** Aus der Flüssigkeitsmenge und der bekannten Form der runden Dose lassen sich die zugehörigen Dicken der Flüssigkeitsschicht errechnen und dann in der oberen Tabelle eintragen.

Der Innendurchmesser  $d$  der Dose beträgt 61 mm.

$V$  : Volumen der Flüssigkeit;  $1 \text{ ml} = 1 \text{ cm}^3 = 1000 \text{ mm}^3$

$A$  : Grundfläche der Dose

$h$  : Schichtdicke (= Höhe der Flüssigkeitsschicht)

$$V = A \cdot h = \left(\pi \cdot r^2\right) \cdot h = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h \quad h = \frac{4V}{\pi \cdot d^2}$$

- d) **Bestimmung der Proportion:** Um das Größenverhältnis der Zellen zu bestimmen, kann die Zellgröße durch die Schichtdicke dividiert werden. Variiert dieses Verhältnis bei den verschiedenen Zellgrößen oder bleibt es gleich?
- e) **Stabilität der Wabenmuster:** Was passiert mit dem Wabenmuster, wenn mit der Pipette die Zellen verrührt werden? Was passiert mit dem Wabenmuster, wenn die obere Dose verschlossen wird? Was passiert mit dem Wabenmuster, wenn die runde Dose von der heißen Dose heruntergenommen wird?
- f) **Zellen im zeitlichen Verlauf:** Was passiert, wenn die Zellen länger beobachtet werden? Was passiert mit den größten Zellen? Was passiert mit den kleinsten Zellen?
- g) **Konvektion:** Offensichtlich gibt es Bewegung in der Flüssigkeit, wenn sich ein Wabenmuster ausbildet. Wo steigt die rheoskopische Flüssigkeit auf und wo sinkt sie ab (Unterscheidung nach dem Inneren einer Zelle und dem Rand einer Zelle)?

### Hinweise

**Reinigen der Scheibe (runde Dose)** – Mit einem Taschentuch / Küchentuch lässt sich die rheoskopische Flüssigkeit gut aufwischen. Sie ist ungiftig und mit Seife abwaschbar. Es darf kein Wasser, Seife oder sonstige Verunreinigung in die rheoskopische Flüssigkeit gelangen, da ansonsten die Pigmente ausfallen bzw. ausflocken können und dann der rheoskopische Effekt nicht mehr funktioniert.

**Reinigungsaufwand vermeiden** – Es muss natürlich beim Einsatz bedacht werden, dass ein erhöhter Reinigungsaufwand vonnöten sein kann, wenn experimentiert wird. Sowohl Aufwand als auch Materialverbrauch können verringert werden, indem die rheoskopische Flüssigkeit in den runden Dosen verbleibt. Dazu müssen die Dosen waagrecht gelagert werden (Stapeln ist möglich).

## Experiment 12: Rayleigh-Bénard-Konvektion – Wabenmuster

**Umgang mit heißer Dose** – Die Dose, die als Wärmespeicher dient, ist durch das kochende Wasser sehr heiß. Möglichkeiten damit umzugehen sind a) Arbeitshandschuhe bzw. Tücher nutzen, um die Dose zu transportieren, b) die Dose (verschlossen) auf einem der Brettchen transportieren oder c) das heiße Wasser am Platz einfüllen, sodass die Dose nicht mehr bewegt werden muss. Zum Wegräumen kann einfach gewartet werden, bis diese abgekühlt ist.

### Zusammenhang mit

→ Experiment 11: Strukturbildung auf schwingender Platte

### Alltagsbezug / Anwendungen / Kontexte

**Wolken / Wetter** – *Rayleigh-Bénard-Konvektionszellen* finden sich genauso in der Atmosphäre wieder. Dies lässt sich beobachten, wenn sich z. B. Wolkenstrukturen, wie die rechts dargestellten, ausbilden. Links ist ein Beispiel für Konvektionsrollen und rechts für Konvektionszellen.



### Erdmantelkonvektion –

Auf ein ähnliches Konvektionsverhalten lässt sich durch indirekte Messungen auch im Erdmantel schließen, allerdings mit wesentlich geringeren Geschwindigkeiten.

**Granulation der Sonnenoberfläche** – Die Oberfläche der Sonne erscheint ebenso strukturiert wie auch die rheoskopische Flüssigkeit unter Hitze. Dies lässt sich ebenso mit einer thermodynamischen Argumentation erklären. Es bilden sich Konvektionszellen, bei denen in der Mitte warmes Material aufsteigt, dort an der Sonnenoberfläche abkühlt und dann an den Rändern der Konvektionszelle wieder absinkt.

**Basaltsäulen und Spannungsrisse** – Vergleichbare Muster treten in der Natur bei Basaltsäulen und Spannungsrisse bei z. B. trocknendem Schlamm auf. Diese können in einfachen Versuchen nachgestellt werden. Dazu wird eine Mischung aus (Mais-)Stärke und Wasser hergestellt. Diese wird dann in ein Gefäß zur Trocknung gegeben, was je nach Schichtdicke, Wassergehalt, Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit wenige Stunden bis mehrere Tage dauern kann. Weiterführende Informationen dazu finden sich hier: [http://www.physics.utoronto.ca/~nonlin/papers\\_mud.html](http://www.physics.utoronto.ca/~nonlin/papers_mud.html)

**Film- und Strukturbildung in der Nanophysik** – Eine mögliche Anwendung der *Rayleigh-Bénard-Konvektion* ist, Oberflächen mit einer gewünschten Struktur zu beschichten, indem dieser Prozess der Selbstorganisation genutzt wird.

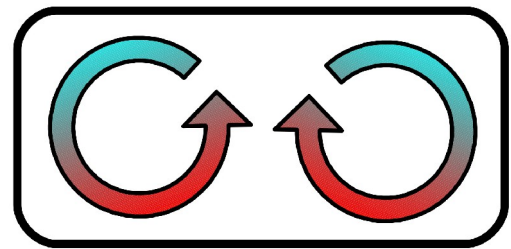
**Heißes Öl in einer Pfanne** – Das Ausbilden von *Rayleigh-Bénard-Konvektionszellen* lässt sich bei guter Beobachtung auch am heimischen Herd nachvollziehen. Wenn Speiseöl in eine Pfanne gegeben und diese erhitzt wird, kann beobachtet werden, wie sich die Oberfläche entsprechend der Strömung in den Konvektionszellen verbeult. Dazu muss die Reflexion einer Lampe im Öl beobachtet werden, dann lassen sich die gleichen wabenartigen Strukturen entdecken. Dies ist in Skorupka (2011) dargestellt.

### Fachlicher Hintergrund

Durch den Kontakt mit der heißen quadratischen Dose wird die Wärme von der heißen Unterseite der runden Dose durch die Flüssigkeit nach oben geleitet. Dabei können drei verschiedene Zustände auftreten:

- A:** Die Wärme wird durch die Flüssigkeit hindurch geleitet, ohne Flüssigkeitsbewegung. Dies ist möglich bei geringen Temperaturunterschieden und geschieht auch zu Beginn des Experiments oder wenn die Dose z. B. mit dem durchsichtigen Deckel abgedeckt wird (siehe Aufgabe e).
- B:** Die Wärme wird durch Konvektion transportiert. Dabei bildet sich die im Experiment zu beobachtende Wabenstruktur aus. Dieser Prozess wird auch *Rayleigh-Bénard-Konvektion* genannt. Er lässt sich bei einem moderaten Temperaturunterschied beobachten.
- C:** Die Wärme wird durch turbulente Strömungen transportiert. Es lassen sich keine Muster mehr ausmachen und die Strömungen in der Flüssigkeit verhalten sich chaotisch. Dies ist möglich bei hohen Temperaturunterschieden und lässt sich in diesem Experiment nicht beobachten. Es wird davon abgeraten, dies mit diesem Experimentierset zu versuchen, da Silikonöl bei zu starker Erhitzung ( $> 200\text{ °C}$ ) gesundheitsschädliche Dämpfe entwickelt.

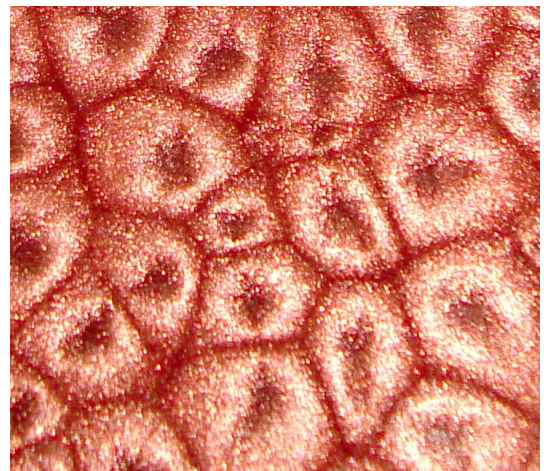
Zur genaueren Erklärung der *Rayleigh-Bénard-Konvektion*: Zu Beginn startet die Konvektion an einem zufälligen Ort, an dem eine kleine Strömung von unten nach oben entsteht. Die Flüssigkeit folgt dieser Strömung und es bildet sich eine Art 'Aufwärtstunnel', in dem warmes Silikonöl nach oben steigt (in der rheoskopischen Flüssigkeit durch die dunklen Punkte im Zentrum zu sehen). Oben angekommen, strömt es in alle Richtungen



und kühlt ab, bis es wieder absinkt. Dieser Prozess ist einerseits durch die Abkühlung und andererseits durch den Sog der Nachströmung vom 'Aufwärtstunnel' bedingt. Nach dem Absinken wird die Flüssigkeit am Boden der Dose entlang wieder zurück zum 'Aufwärtstunnel' gezogen. Es bildet sich ein stabiler Kreislauf aus auf- und absteigender Flüssigkeit.

Die Zellgröße ist dabei abhängig von der Schichtdicke der Flüssigkeit und ihrer Viskosität. Je viskoser (dickflüssiger) die Flüssigkeit ist, desto größer werden die Konvektionszellen. Je größer die Schichtdicke der Flüssigkeit ist, desto größer werden die Konvektionszellen. Theoretisch lässt sich dies damit erklären, dass die Modelle mit denen dieses Verhalten beschrieben werden kann, Vierteilchensysteme beschreiben (Strömungsphysik bzw. Fluidmechanik) und aus der Kontinuumsmechanik entspringen. Da die zugrunde liegenden Teilchen (Flüssigkeitsmoleküle) wesentlich kleiner sind als die beobachteten Strukturen, handelt es sich um ein Strömungsphänomen und dies ist in der Größe skalierbar.

Das Silikonöl wird durch das Kupferpigment rheoskopisch. Es handelt sich dabei um flache, kleine Pigmentplättchen ( $5\text{--}25\text{ }\mu\text{m}$ ) aus dem Mineral Muskovit, die mit dem Farbstoff Hämatit eingefärbt wurden. Diese richten sich entlang der Strömung



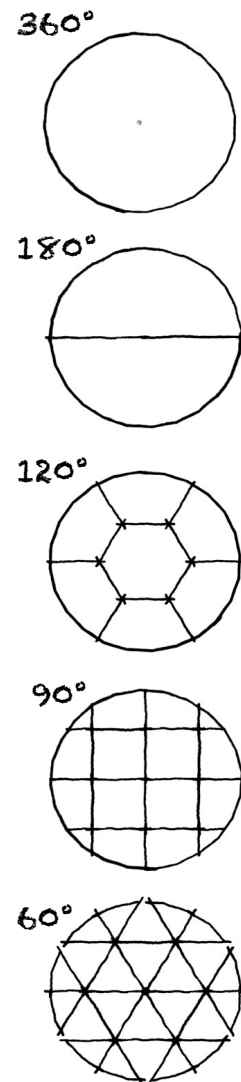
## Experiment 12: Rayleigh-Bénard-Konvektion – Wabenmuster

aus, sodass sie einen möglichst kleinen Strömungswiderstand haben. Im 'Aufwärtstunnel' stehen sie senkrecht und reflektieren kaum Licht. Er erscheint dunkel. Dann folgen die Kupferpigmentplättchen der Strömung und richten sich waagrecht aus. Dabei wird ein Großteil des Lichts reflektiert – es erscheint hell. Am Rand zieht die Strömung die Kupferpigmente wieder nach unten und sie richten sich wieder senkrecht aus – es erscheint erneut dunkel. So entsteht das Bild der Konvektionszellen in diesem Experiment.

Wie kann die Form der Strukturen erklärt werden? Durch die vorgegebene Größenproportion einer Konvektionszelle ist vorgegeben, dass es mehrere Zellen geben muss, bei flachen Flüssigkeitsschichten. Da diese unabhängig voneinander entstehen, ist ein idealer Zustand zum Transport von Wärmeenergie, dass möglichst die gesamte Fläche mit Konvektionszellen belegt ist. Ähnlich wie bei Seifenblasenschaum ist in der Fläche der ideale Winkel zwischen Grenzflächen  $120^\circ$  (vgl. Sullivan, 2016). Dies kann auch einfach erklärt werden:

Schritt 1: Die sich bildende Struktur muss die gesamte Fläche auslegen (parkettieren). Dabei ist davon auszugehen, dass die einzelnen Elemente die gleiche Größe besitzen, wegen des Proportionsarguments (siehe Arbeitsauftrag d).

Schritt 2: Aufgrund der dünnen Flüssigkeitsschicht gilt: Je kleiner der Winkel zwischen den Konvektionszellen, desto instabiler ist die einzelne Konvektionszelle. Folglich ist ein möglichst großer Winkel stabiler (und damit eher anzutreffen). Dies gilt für alle Innenwinkel einer Form. Der größte Winkel wäre  $360^\circ$  und damit eine vollflächige Konvektionszelle (ohne Nachbarzellen). Das ist wegen der vorgegebenen Proportion nicht möglich. Auch der nächstkleinere mögliche Winkel von  $180^\circ$  wäre für eine flächige Parkettierung aus den selben Gründen ungeeignet, weil damit exakt zwei Zellen entstehen würden. Der nächstkleinere Winkel, der eine vollständige Parkettierung erlaubt, ist  $120^\circ$ . Es kommt eine sechseckige Parkettierung zustande, die auch im Experiment vorzufinden ist. Parkettierungen mit viereckigen oder dreieckigen Strukturen sind wieder instabiler, wegen des kleineren Innenwinkels.



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

Text *Geometrie von Seifenblasen* – Sullivan, J. M. (2016): *Blasencluster und Polyeder*. In: Aigner, M.; Behrends, E. (Hrsg.): *Alles Mathematik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 365–375. (dt., 10 Seiten)

[http://math.jacobs-university.de/archive/summerschool/handouts2015/John\\_Sullivan/blasen.pdf](http://math.jacobs-university.de/archive/summerschool/handouts2015/John_Sullivan/blasen.pdf)

(letzter Zugriff: 16.06.2016); ShortLink: <https://v.gd/qfllQW>

Video *Experiment Rayleigh-Bénard-Zellen mit Öl, Bratpfanne und Wärmebildaufnahme* – Skorupka, S. (2011): *Experiment der Woche: Folge 12 - Was haben Benard-Zellen mit Kochen zu tun?* (dt., Dauer 3:09)

[http://www.uni-hannover.de/de/service/specials/experiment/archiv/Direktdownload: http://stream.mml.uni-hannover.de/Video-Files/ELSA/Pressestelle/EdW/WasBenardZellenmitKochen.mp4](http://www.uni-hannover.de/de/service/specials/experiment/archiv/Direktdownload:http://stream.mml.uni-hannover.de/Video-Files/ELSA/Pressestelle/EdW/WasBenardZellenmitKochen.mp4)

(letzter Zugriff: 29.01.2013); ShortLink: <https://v.gd/qduRzM>



## Experiment 12: Rayleigh-Bénard-Konvektion – Wabenmuster

Webseite Erklärung der Rayleigh-Bénard-Konvektion für Rollen und Zellenstruktur – The Experimental Nonlinear Physics Group, Dept. of Physics, University of Toronto (2012): Rayleigh-Bénard and Bénard-Marangoni convection. (engl., 1 Seite)

<http://www.physics.utoronto.ca/~nonlin/thermal.html>

(letzter Zugriff: 17.06.16); ShortLink: <https://v.gd/LywBey>



Wissenschaftlicher Artikel Rayleigh-Bénard-Konvektion in Gasen und möglichen Strukturen – Morris, S. W.; Bodenschatz, E.; De Bruyn, J. R. (1994): Experiments with Patterns in Convection Gases. In: Physics in Canada, 50 (1), S. 9–14. (engl., 5 Seiten)

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.52.8221&rep=rep1&type=pdf>

(letzter Zugriff: 17.06.16); ShortLink: <https://v.gd/W3oLZe>



Artikel Untersuchungen zur Rissbildung in der Natur – Goehring, L.; Morris, S. W. (2014): Cracking mud, freezing dirt, and breaking rocks. In: Physics Today, 67 (11), S. 39–44. (engl., 5 Seiten)

<http://scitation.aip.org/content/aip/magazine/physicstoday/article/67/11/10.1063/PT.3.2584>

(letzter Zugriff: 17.06.2016); ShortLink: <https://v.gd/Cp5e9T>



Masterarbeit Rissbildung – Ebling, U. (2013): Ein Zugang zur nichtlinearen Physik am Beispiel der Strukturbildungsvorgänge bei Trockenrissen. Masterarbeit, Freie Universität Berlin. (dt., 56 Seiten)

=> Zu finden auf [www.niliphex.de](http://www.niliphex.de)

Artikel Verknüpfung von Strukturbildung und Chaosphysik – Nordmeier, V.; Schlichting, H. J. (2003): Chaos für die Schule! – Nichtlinearität und Strukturbildung. In: Physik in unserer Zeit, 34 (1), S. 32–39. (dt., 8 Seiten)

[https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich\\_physik/didaktik\\_physik/publikationen/chaosschule.pdf](https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/chaosschule.pdf)

(letzter Zugriff: 17.06.2016); ShortLink: <https://v.gd/MQPmz7>



Video Strukturen in Romanesco und die Fibonacci-Folge – Morris, S. (2009): Phyllotaxis in a broccoflower. (engl., Dauer 0:55)

<https://www.flickr.com/photos/nonlin/3796611236/>

(letzter Zugriff: 17.06.2016); ShortLink: <https://v.gd/wT7nwp>



Bachelorarbeit Rayleigh-Bénard-Konvektion – Ahmadi, M. (2016): Experimentelle Untersuchungen zur Schichtdicke und Viskosität bei der Rayleigh-Bénard-Konvektion. Bachelorarbeit, Freie Universität Berlin. (dt., 46 Seiten)

=> Zu finden auf [www.niliphex.de](http://www.niliphex.de)

GEFÖRDERT VON

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

think  
**INO**  
Die Initiative für  
Ingenieurnachwuchs

**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

7 / 7