

## Konvektionszellen

Mit der Veröffentlichung von Experimenten im WASSERZEICHEN möchten wir Sie zum Selbermachen, zum eigenen Beobachten anregen und auf form- und gestaltbildende Phänomene aufmerksam machen, die auch wesentlicher Bestandteil unserer alltäglichen Welt sind, ohne dass wir sie bemerken. Es geht uns dabei weniger um physikalische Beschreibungen, die man in der Fachliteratur nachlesen kann, sondern mehr um das persönliche Erleben.



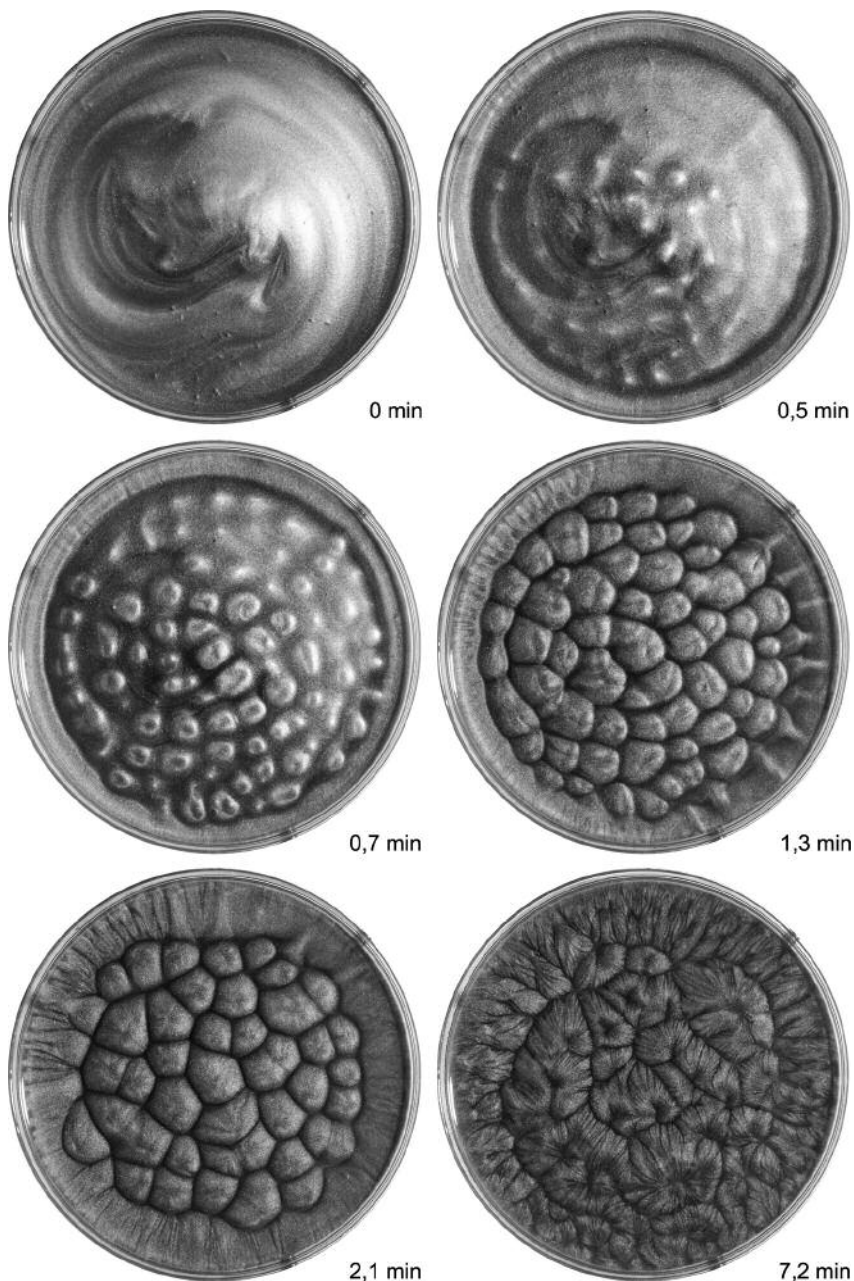
Im letzten WASSERZEICHEN ging es um „Viscous fingering“, wobei aus einer instabilen Bedingung in einem Strömungsvorgang differenzierte und geordnete Strömungsformen hervorgehen. – Gleiches tritt beim Experiment mit Konvektionszellen auf.

Im Experiment wird eine Wärmeschichtung in einer Flüssigkeit erzeugt, unten wärmer und oben kälter, die dann in differenzierter Weise in Bewegung kommt und Konvektionszellen bildet. Solche Schichtungen findet man häufig auch in der Atmosphäre. Dort genügen schon Temperaturdifferenzen von 1 °C, damit Konvektionszellen entstehen, erkennbar an den Wolkenbildungen. Dass warme Luft, Wasser und andere Flüssigkeiten in einer kalten Umgebung aufsteigen oder, wenn sie kalt sind, in warmer Umgebung absinken, ist ja eine allgemein bekannte Tatsache. Wenn sich nun eine gleichmäßig warme Schicht unter einer gleichmäßig kalten Schicht befindet, entsteht für unsere Vorstellung ein Problem: Wie kann die warme Schicht die kalte durchdringen, um nach oben zu kommen? Sie kann ja nicht überall gleichzeitig aufsteigen und die kalte nicht überall gleichzeitig absinken. Die Schichten müssten eigentlich da bleiben, wo sie sind. Wie die Natur diese instabile Schichtung ohne Probleme auflöst, zeigt das Experiment. – Es entstehen ganz spontan Strömungen, die sich ordnen und wie viele Strömungsformen eine gewisse Schönheit zeigen. Dieses Phänomen wird nach seinem Entdecker „Bénard-Effekt“ genannt. Henry Bénard beschrieb diesen Versuch als erster im Jahr 1900 in seiner Dissertation.

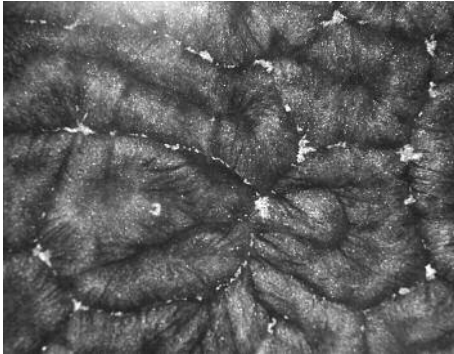
## Das Experiment

Das Experiment besteht darin, eine möglichst gleichmäßige Warm-Kalt-Schichtung in einer geeignet angefärbten Flüssigkeitsschicht entstehen zu lassen. Dazu benötigt man eine möglichst gleichmäßige Wärmequelle, die den flachen Boden eines Gefäßes und eine gefärbte Flüssigkeit darin anwärmt. Bei Bénard wurde die Schichtung kontinuierlich aufrechterhalten, indem die Flüssigkeit in einem geschlossenen Behälter war und unten geheizt und oben gekühlt wurde. Wir heizen nur und die Flüssigkeitsoberfläche ist an der Luft, so dass der Vorgang mit dem Temperaturverlauf eine Entwicklung durchmacht, die mit zunehmendem Temperaturausgleich abklingt. Die verwendete Gold- oder Silberaquarellfarbe enthält feine flache Partikel, die sich in einer Scherströmung ausrichten und das Licht unterschiedlich spiegeln; so werden auch ganz feine Strömungsbewegungen sichtbar - und diese wollen wir beobachten.

Nach dem Aufstellen des Gefäßes auf die Wärmequelle sieht man erst einmal nur die gleichmäßig verteilte Farbe und muss einen Moment warten (Abb. 1: 0 min). Dann plötzlich bemerkt man, dass an vielen Stellen ganz überraschend kleine helle Flecken auftauchen, die zu wachsen beginnen. Die Verteilung der Flecken ist noch recht ungleichmäßig und kann sich an unregelmäßigen Bereichen häufen, die z. B. durch vorheriges Umrühren entstanden sind (Abb. 1: 0,5 min). Relativ bald werden die Flecken so groß, dass sie in den Einflussbereich ihrer Nachbarn kommen. In diesem Moment erhält das Bild eine gewisse Ordnung, die Abstände und die Größen der Flecken werden ähnlicher (Abb. 1: 0,7 min). Am Gefäßrand entsteht ein heller Ring, der mit der Zeit breiter wird. Die Flecken sehen aus wie plastische, eng gedrängte Aufwölbungen in der Flüssigkeitsschicht. Hier nach 1,3 min verlieren sie ihre Rundheit und werden nach 2,1 min polygonal. In diesem Stadium tauchen feine, strahlenartig angeordnete Linien auf, die von jedem Fleckenzentrum ausgehen. Bei genauerer Betrachtung kann man auch sehen, dass die Farbpartikel sich entlang der Linien vom Zentrum der Flecken nach außen bewegen. Hat man vorher etwas Lycopodium-Sporen in die Flüssigkeit gemischt, sammeln sich diese an den Grenzen der Konvektionszellen an, dort, wo die Flüssigkeit wieder absinkt (Abb. 2). Während die Grenzen der Flecken immer mehr verschwinden, werden die Strahlenbündel der Linien immer dominanter. Indem die Zahl der Flecken stetig abnimmt, werden sie durch Vereinigung größer und lösen sich schließlich ganz auf (bei 0,7 min ca. 70 Zellen, bei 7,2 min ca. 20 Zellen).



**Abb. 1:** Verschiedene Stadien der Bildung von Konvektionszellen mit Zuckersirup und Goldaquarellfarbe, erwärmt in einem Wasserbad von ca. 60 °C.



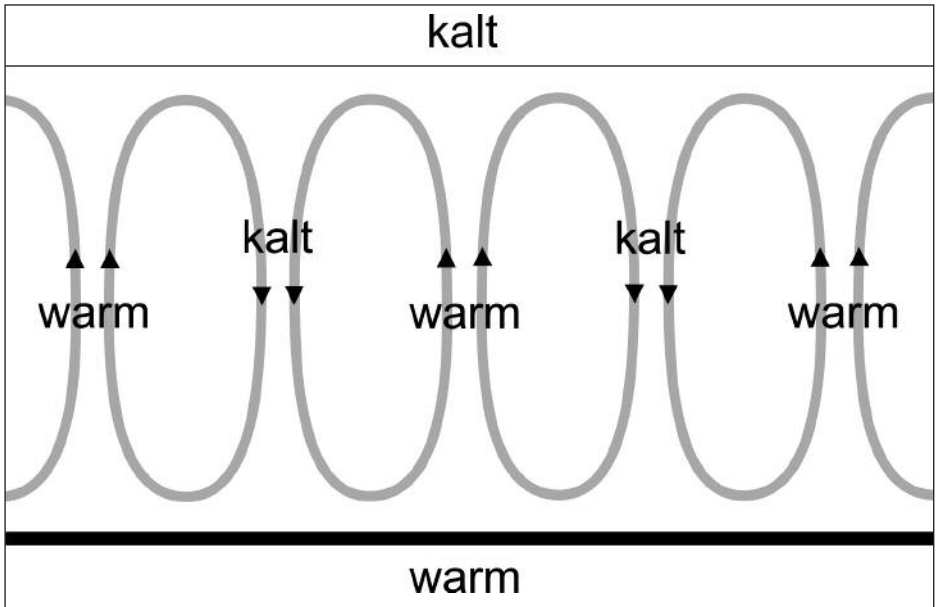
*Abb. 2: Kleine helle Partikel (Lycopodium-Sporen) sammeln sich an den Grenzen der Strömungszellen an. Erwärmung auf Kochplatte.*

### **Erläuterungen**

Wenn das Gefäß mit der Farbe in Raumtemperatur von unten erwärmt wird, beginnt sofort ein starker Temperatúraustausch. Der Gefäßboden heizt die farbige Flüssigkeit auf, die wärmere Flüssigkeit dehnt sich aus, ihre Dichte wird geringer und sie wird leichter, sie erhält Auftrieb. Die Bereiche nahe am Gefäßboden werden zuerst warm, die anderen bleiben noch kalt und so entsteht eine Temperaturschichtung. Am Gefäßrand wird die Flüssigkeit von unten bis oben erwärmt und steigt dort sofort auf. Weiter innen liegt eine Schicht warmer Flüssigkeit unter einer kalten und drängt nach oben bzw. die kalte drängt nach unten, was als Ganzes nicht geht: Sie blockieren sich gegenseitig. Da jede kleinste Unregelmäßigkeit in der Schichtung ein sich selbst verstärkendes Aufsteigen bzw. Absinken auslöst, hat man es hier mit einer instabilen Bedingung zu tun. Jede kleinste Aufwölbung der warmen Schicht hat mehr Auftrieb als ihre Umgebung, so dass die warme Flüssigkeit hier beginnt aufzusteigen. Mit jedem weiteren Aufsteigen nehmen an dieser aufsteigenden Stelle die warme Flüssigkeit und damit auch der Auftrieb zu, ein sich selbst verstärkender Vorgang beginnt. Das gleiche gilt entsprechend für die kalte Schicht. Da die Schichtung niemals perfekt gleichmäßig ist, beginnt der Aufstieg an vielen Stellen (Abb. 1: 0,5 min). Erreicht die Strömung die Oberfläche, breitet sie sich nach allen Seiten aus, kühlt etwas ab und beginnt an den Rändern der Flecken wieder abzusinken. Kleine Kreisläufe entstehen, die an Geschwindigkeit zunehmen, wie sich an den strahligen Linienbüscheln zeigt. Ihre Größe wächst, bis sie an die Nachbarkreisläufe stoßen; dabei werden die Strömungszellen polygonal.

Man nennt sie Konvektionszellen, weil die Flüssigkeit die Wärme transportiert und die Wärmeunterschiede den Strom aufrechterhalten. Im Zentrum der Zellen steigt die warme Flüssigkeit auf und kühlt an der Oberfläche ab, an den

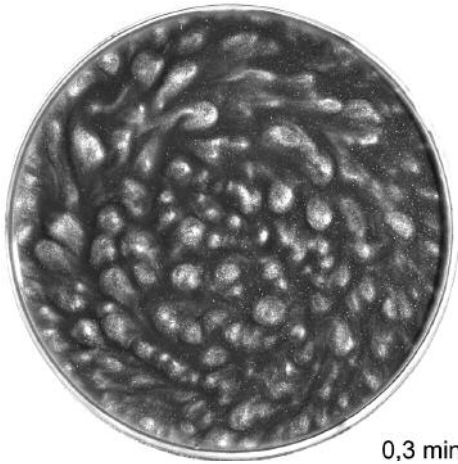
Rändern sinkt die kalte Flüssigkeit ab und wird am Boden wieder aufgeheizt (Abb. 3).



**Abb. 3:** Schematischer Schnitt durch Konvektionszellen

Da die Flüssigkeit oben an die Luft grenzt, kommt es noch zu einem zweiten Prozess, der die Strömung zusätzlich antreibt. Die warme Flüssigkeit hat eine geringere Oberflächenspannung als die kalte. Das bewirkt an der Flüssigkeitsoberfläche eine Ausgleichsströmung vom warmen Bereich im Aufstiegszentrum zum kalten Rand der Strömungszellen. Man nennt dieses Phänomen nach seinem Entdecker Marangoni den Marangoni-Effekt. Bei unserem Experiment handelt es sich also um den Bénard-Marangoni-Effekt.

Bei instabilen Prozessen spielen die Bedingungen, unter denen sie ablaufen, für die konkrete Ausgestaltung eine wichtige Rolle. So wirken sich hier die Zähigkeit der Flüssigkeit sowie die Dicke der Flüssigkeitsschicht und die Temperaturdifferenz ganz wesentlich aus. Im Beispiel von Abb. 1 wurde als zähe Flüssigkeit Zuckersirup genommen. Mit Glycerin entstehen ähnliche Bilder und mit Wasser geht es auch, aber die Strömungszellen werden sehr klein, nicht so schön (Abb. 4) und die Farbe sinkt schnell zu Boden. Die Größe der Strömungszellen passt sich der Flüssigkeitsschichtdicke an. In dicker Schicht werden sie größer und umgekehrt.



*Abb. 4: Beginnende Konvektionszellen mit Wasser und Goldaquarellfarbe. Erwärmung im Wasserbad*

### **Material und Bedingungen**

Die aufgeführten Materialien sind Beispiele, es kann auch anders gemacht werden.

- **Kochplatte** oder **Brennstelle** auf Gasherd (Abb. 5) zum Erwärmen des Gefäßbodens auf wenige Grad über Raumtemperatur oder bis zu 60 °C. Das Gefäß sollte darauf einigermaßen waagrecht stehen können.
- **Gefäß** mit ebenem Boden für die gefärbte Flüssigkeit: Kochtopf (Durchmesser z. B. 16 cm) mit dickem Boden, der die Wärme gut verteilt.
- **Goldaquarellfarbe** oder Silberaquarellfarbe, aus dem Schreibwarenhandel
- **Flüssigkeit:** für eine Schichtdicke von ca. 1 cm benötigt man für einen Topf mit 16 cm Durchmesser 150 ml Wasser, in dem man 150 g Zucker löst. Es geht auch mit Glycerin oder Öl. Wasser allein ist nicht zu empfehlen.
- **Messgefäß** zum Abmessen von Wasser und Zucker
- **Pinsel, Löffel oder Messerspitze** zum Lösen und Umrühren der Goldaquarellfarbe.

### **Optional**

Man kann das Gefäß auch in ein warmes Wasserbad stellen, um die Temperatur genau einzustellen und um eine sehr gleichmäßige Erwärmung zu erhalten.

- **Wasserbad (Abb. 6):** Petrischale, Durchmesser ca. 24 cm mit Wasser gefüllt. Es kann auch eine Bratpfanne sein.
- **Gefäß:** Petrischale, Durchmesser ca. 14 cm
- Drei nicht rostende **Abstandshalter**, die zwischen Gefäß und Wasserbad



**Abb. 5:**  
Versuchsaufbau  
auf dem Gasherd



einen gleichmäßigen Abstand halten. Dicke ca. 6 mm oder mehr. Es wurden kurze Edelstahlstangen verwendet, es dürfen z. B. auch Messingmuttern sein.

- **Thermometer** oder Finger zum Abschätzen der Temperatur.

**Abb. 6:** Versuchsaufbau mit Wasserbad  
in Petrischale auf Kochplatte

### Versuchsdurchführung

- **Waagrecht stellen:** Mit etwas Wasser im Gefäß überprüfen, ob es einigermaßen waagrecht steht, und gegebenenfalls etwas unterlegen, das Hitze verträgt (z. B. Messerklinge).
- **farbige Flüssigkeit:** Zunächst wird das Wasser in das Gefäß gegeben und der Zucker darin gelöst. Dann wird mit ein paar Tropfen Wasser und einem Pinsel oder festen Gegenstand durch Reiben die Farbe gelöst und in die Zuckerlösung getropft, und zwar so oft, bis sie kräftig gefärbt erscheint und kaum noch durchsichtig ist.
- **Erwärmen mit Gasflamme:** Die kleinste Kochstelle am Gasherd wird angezündet und auf die kleinste Stufe gestellt. Ein Abstandshalter kann die Wärmezufuhr noch verringern.



- **Erwärmen mit Kochplatte:** Man bringt die Platte auf die gewünschte Temperatur und schaltet ab.
- **Erwärmen mit Wasserbad:** Das Bad wird auf die gewünschte Temperatur gebracht.
- **Aufstellen des Gefäßes:** Beim Aufstellen sollte möglichst wenig Strömung in der Flüssigkeit entstehen, weil sich diese auf das Ergebnis auswirkt. Man stellt das Gefäß in die Nähe der Wärmequelle, rührt die Farbe nochmals auf und wartet einen Moment, bis sich die Strömungen beruhigt haben, dann stellt man das Gefäß ganz vorsichtig auf die Wärmequelle. Wenn man es ganz beruhigt haben will, stellt man bei einem Wasserbad das Gefäß erst auf und gibt dann das warme Wasser in das Bad.
- **Beobachtung:** Sie beginnt sofort nach dem Aufstellen des Gefäßes. Im ersten Moment denkt man, es passiert nichts, aber dann kommt der Effekt ganz plötzlich und unerwartet.
- **Parameter:** Es reichen wenige Grad Temperaturdifferenz, um die Strömung in Gang zu bringen, aber es wird schöner, wenn die Differenz größer ist. Bei zu großer Wärmezufuhr geht es zu schnell und wird turbulent. Eine Flüssigkeitsschichtdicke von 1 cm führt zu schönen Ergebnissen, es geht aber auch mit mehr oder weniger. Die Gefäßgröße ist nicht begrenzt, nur wird es bei größeren Gefäßen immer schwieriger, sie gleichmäßig zu erwärmen. Mit Tinte oder ähnlichen Farbstoffen sieht man fast nichts.

### ***Konvektionszellen in der Natur***

Mit Konvektionszellen überwindet die Natur gewissermaßen eine Blockade im Wärmeaustausch, der durch eine instabile Schichtung entsteht – unten warm und oben kalt. So kann der Wärmetransport in flüssigen oder gasförmigen Medien viel schneller sein als durch Wärmeleitung. Konvektionszellen entstehen in der Sonne, in der Lufthülle der Erde, aber auch unter dem Mantel der Erde, wo sie die Wärme aus dem Zentrum in deren Peripherie bringen. Ansichtig werden solche Vorgänge in den Wolken, wenn sich warme Luftmassen unter kälterer Luft befinden, die dann beginnen aufzusteigen und z. B. walzenförmige Wolkenstrukturen bilden (siehe Abb. Seite 18). Im Kochtopf in der Küche geschieht auch etwas ähnliches, die erwärmte Flüssigkeit von unten steigt auf und verdrängt die kalte, die absinkt, nur geht es dabei wohl sehr selten so geordnet zu wie in unserem Experiment.

*Andreas Wilkens*