



Modul 7

Konvektion in Erdmantel, Ozean und Atmosphäre

Begleittext für Lehrkräfte

Holger Gudjons, Rolf Carstensen und Sylke Hlawatsch

Dieser Text steht zusammen mit den Texten der 10 weiteren Module des Projektes „Forschungsdialog: System Erde“ auf der CD-ROM „System Erde“ als Hypertext bzw. die Materialien als pdf-Dateien, Videos, Interaktionen, Animationen usw. über ein komfortables Navigationssystem mit Suchfunktion zur Verfügung.

Mit der CD-ROM können auch eigene Materialien erstellt werden. Außerdem kann aus der CD-ROM eine Schülerversion, die für das selbst organisierte Lernen vorgesehen ist - und keine didaktischen Informationen enthält - erstellt werden.



Das Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) ist eine interdisziplinär arbeitende Forschungseinrichtung mit überregionaler, gesamtstaatlicher Aufgabenstellung. Auftrag des Instituts ist es, durch seine Forschungen die Pädagogik der Naturwissenschaften weiter zu entwickeln und zu fördern. Das IPN gliedert sich in die vier Fachabteilungen Biologie-, Chemie-, Physikdidaktik und Erziehungswissenschaften (mit Pädagogisch-Psychologischer Methodenlehre). Das IPN ist Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft. Enge Beziehungen bestehen zur Kieler Universität.

Weitere Informationen: <http://www.ipn.uni-kiel.de>

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte IPN-Projekt „Forschungsdialog: System Erde“ dient dem Ziel, das Verständnis des Planeten Erde zu fördern. Auf der Basis soliden Wissens soll die Beschäftigung und Auseinandersetzung mit der nachhaltigen Entwicklung der Erde angeregt werden. Die Materialien zum Thema „System Erde“ wurden vom IPN in enger Kooperation mit Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftlern sowie Lehrkräften entwickelt und anschließend im Schulunterricht erprobt und evaluiert. Für den Unterricht in der Sekundarstufe II steht eine umfangreiche CD-ROM zur Verfügung, die u. a. Animationen, Simulationen, Informationstexte und Arbeitsblätter zu insgesamt 11 Modulen des Themas System Erde enthält. Der vorliegende Text ist Teil dieser CD-ROM, die beim IPN erhältlich ist. Für den Unterricht in der Grundschule wurde ein Sachbuch und eine beiliegende CD-ROM mit Computerspielen entwickelt. Unterrichtsmaterialien für die Hand der Lehrkräfte sind im Internet erhältlich (<http://Systemerde.ipn.uni-kiel.de>).

© 2005

Alle Rechte beim
Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN)
Olshausenstraße 62, D-24098 Kiel.



Forschungsdialog: System Erde

Kontakt:

Ulrike Gessner
Leibniz-Institut für die Pädagogik der
Naturwissenschaften an der Universität Kiel
Olshausenstr. 62
24098 Kiel

Tel: ++49 (0431) 880-3121
E-Mail: gessner@ipn.uni-kiel.de
<http://systemerde.ipn.uni-kiel.de>

Auf verschiedenen Seiten befinden sich Verweise (Links) auf Internet-Adressen. Haftungshinweis: Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle wird die Haftung für die Inhalte der externen Seiten ausgeschlossen. Für den Inhalt dieser externen Seiten sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich. Sollten Sie bei dem angegebenen Inhalt des Anbieters dieser Seite auf kostenpflichtige, illegale oder anstößige Inhalte treffen, so bedauern wir dies ausdrücklich und bitten Sie, uns umgehend per E-Mail davon in Kenntnis zu setzen, damit beim Nachdruck der Verweis gelöscht wird.

Autoren dieses Moduls:

Holger Gudjons (Bausteine), Rolf Carstensen (Sachanalyse, Bausteine), Dr. Sylke Hlawatsch (Interaktion, Sachanalyse)

Geowissenschaftliche Beratung:

Prof. Dr. Peter Lemke (Alfred Wegener Institut Bremerhaven), Dipl. Physiker Alexander Loddock (Universität Münster)

Multimediaumsetzung, Grafik und Layout:

CD-ROM, Rahmenlayout, Grafiken: MMCD GmbH interactive in science (Düsseldorf)
Texte: Päivi Taskinen (IPN)

Herausgeber:

Prof. Dr. Horst Bayrhuber, Prof. Dr. Manfred Euler,
Dr. Sylke Hlawatsch



Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Allgemeine Zielsetzung und Begründung | 4 |
| 2 | Sachinformationen | 4 |
| | 2.1 Thermische Konvektion..... | 5 |
| 3 | Didaktische Information | 9 |
| | 3.1 Lernziele | 9 |
| | 3.2 Hinweise zu den Lernvoraussetzungen | 10 |
| | 3.3 Hinweise zu horizontalen und vertikalen Verknüpfungen | 10 |
| | 3.4 Erläuterungen und Nutzungshinweise zu den Materialien | 12 |
| 4 | Vorschläge für den Unterrichtsverlauf | 13 |
| 5 | Literatur | 14 |
| 6 | Unterrichtsmaterialien | 14 |

Anhang:

Unterrichtsmaterialien

Baustein 1: Konvektion im System Erde

Baustein 2: Physikalische Grundlagen der Konvektion

Baustein 3: Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation



1 Allgemeine Zielsetzung und Begründung

Für die Entwicklung eines systemischen Verständnisses von der Erde ist die Kenntnis des Prozesses Konvektion aus zwei Gründen von Bedeutung:

- Konvektive Prozesse unterstützen auf dem Planeten Erde maßgeblich den Stoff- und Energieaustausch.
- Konvektive Prozesse sind häufig mit der Ausbildung von geordneten Strukturen verbunden, etwa in Form von Walzen oder hexagonalen Mustern, wie man sie z. B. in Wolkenformationen erkennen kann. Im Gegensatz dazu erfahren Schüler/innen in der Sekundarstufe I, dass Bewegung, die durch Wärme ausgelöst wird, ungeordnet stattfindet (BROWN'sche Molekularbewegung). Die Schüler/innen lernen im vorliegenden Modul die Bedingungen kennen, unter denen es zu einer geordneten Struktur kommt. Dahinter steht das allgemeine Prinzip der Selbstorganisation, das auch für die Entwicklung des Systems Erde als bedeutsam angesehen wird.

Anhand von drei Bausteinen mit steigendem Vertiefungsgrad sollen die Schüler/innen sich mit konvektiven Prozessen vertraut machen und deren physikalische Hintergründe verstehen, die durch eine mathematische Formel für die RAYLEIGH-Zahl ausgedrückt werden. Außerdem sollen sie die Bedeutung der Konvektion für die Entwicklung des Planeten Erde erkennen.

2 Sachinformationen

Es gibt viele Hinweise darauf, dass es im Erdinneren heiß ist (s. Modul „Plattentektonik und Vulkanismus“, Abb. 1). So fördern Vulkane über 1.000 °C heißes Magma, und aus heißen Quellen kommt heißes Wasser und Wasserdampf an die Erdoberfläche. In Bergwerken wird es immer wärmer je tiefer man kommt, und in Bohrlöchern steigt die Temperatur mit zunehmender Tiefe an. Die Wärmeenergie, die vom Erdinneren an die Erdoberfläche transportiert wird, reicht aus, um Lithosphärenplatten zu bilden und zu bewegen und dadurch Gebirge aufsteigen zu lassen und Erdbeben zu verursachen.

Die Sonne liefert 5.000-mal mehr Energie als das Erdinnere (PRESS und SIEVER 1995). Die Sonnenenergie treibt zum Beispiel den Wasserkreislauf, das Wetter, die Verwitterung und die Meeresströmungen an. Die kugelförmige Gestalt des Planeten Erde bewirkt im Bereich des Äquators eine höhere Energieaufnahme als in den polaren Regionen, was mit einer entsprechenden Temperaturverteilung verbunden ist (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“). Ohne einen effektiven Wärmetransport zwischen dem Äquatorbereich und den Polen wären die Temperaturunterschiede so extrem, dass Leben nur auf einem sehr schmalen Breiten-gürtel möglich wäre. Wärmetransport ist also von immenser Bedeutung für den Planeten Erde. Er erfolgt in hohem Maße durch Konvektion und wird als thermische Konvektion bezeichnet. Der Begriff der Konvektion spielt in vielen Teilgebieten der Geowissenschaften eine wichtige Rolle (s. Modul 7, Baustein 2, Material 2, Seite 1).

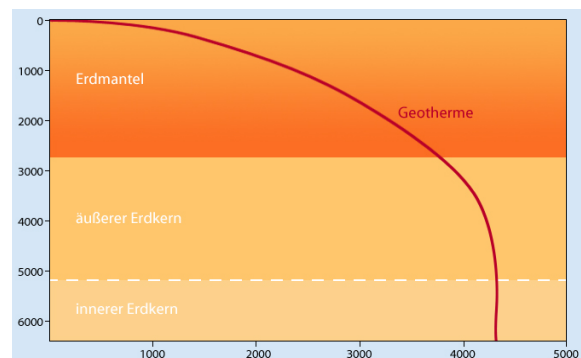


Abbildung 1: Die Temperaturverteilung im Erdinneren (nach PRESS und SIEVER 1995). Die Temperaturen steigen im Erdinneren mit zunehmender Tiefe an. Die Temperaturkurve wird als geothermischer Gradient oder Geotherme bezeichnet. Auf der x-Achse ist die Temperatur in °C aufgetragen, auf der y-Achse die Tiefe in km.



Wärme im Erdinneren

Der Planet Erde erwärmte sich im Laufe seiner Entwicklung. Die Ursachen hierfür sind im Modul „System Erde - Die Grundlagen“ erläutert. Aus dem heißen Erdinneren wird seitdem die Wärme zur kühlen Erdoberfläche abtransportiert. Zwei Prozesse sind hierfür verantwortlich:

- **Wärmeleitung:** Wärme stellt eine Form von Energie dar. Sie geht von einem warmen Gebiet in ein kälteres über. Die Wärmeenergie resultiert aus den Bewegungen der Atome: Je stärker sich die Atome bewegen, desto höher ist die Temperatur und damit die Wärmeenergie des Materials. Die Wärmeleitung (s. Abb. 2) erfolgt dadurch, dass Atome und Moleküle, die sich aufgrund hoher Temperatur stark bewegen, gegeneinander stoßen und somit auf mechanischem Wege Energie weitergeben. Verschiedene Materialien weisen unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten auf. Metalle sind gute Wärmeleiter, während Gesteine schlechte Wärmeleiter sind. Ein 100 m dicker Lavastrom braucht ungefähr 300 Jahre, um von 1.000 °C auf die Temperatur an der Erdoberfläche abzukühlen. Würde man eine 400 km dicke Gesteinsplatte an einer Seite erwärmen, würde es etwa 5 Milliarden Jahre dauern, bis die Wärme die andere Seite erreicht. Das ist länger als die Erde besteht. Wenn der 4,6 Milliarden Jahre alte Planet Erde nur durch Wärmeleitung abkühlen würde, hätte die Wärme aus Tiefen über 400 km die Erdoberfläche heute noch nicht erreicht.

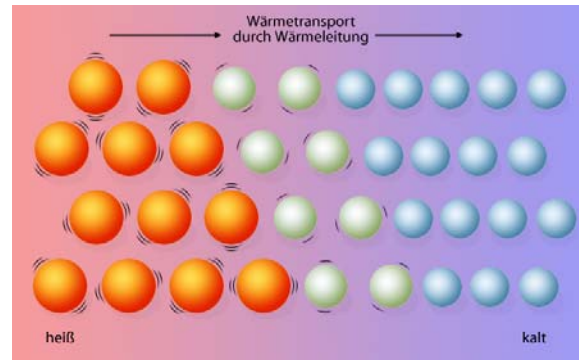


Abbildung 2: Wärmetransport durch Wärmeleitung (nach PRESS und SIEVER 1995).

- **Konvektion** ist ein weit verbreitetes Phänomen, das in Flüssigkeiten oder Gasen auftritt, die von unten erhitzt und von oben abgekühlt werden. Das erwärmte Material dehnt sich aus und steigt auf, weil seine Dichte geringer ist als die des kühleren Materials weiter oben. Weil das aufsteigende Material seine Wärme mit sich führt, wird Wärme durch Konvektion weitaus effektiver transportiert als durch Wärmeleitung. In den vom heißen, aufsteigenden Material gleichsam freigemachten Raum strömt kälteres Material von allen Seiten ein, das nun selbst erwärmt wird und seinerseits nach oben steigt. Auf diese Weise entsteht ein Kreislauf.

Im Folgenden sollen zunächst die physikalischen Hintergründe der thermischen Konvektion erläutert werden.

2.1 Thermische Konvektion

Unter **thermischer Konvektion** versteht man den Transport von Wärmeenergie, die an die Strömung eines flüssigen oder gasförmigen Mediums gebunden ist. Diese Konvektion entsteht infolge von Temperaturunterschieden im Medium: Wärmere Stoffe weisen eine geringere Dichte auf als kühlere in der Umgebung und steigen deshalb auf (s. Abb. 3). Warum setzt sich das Material überhaupt in Bewegung? Welche Kraft wirkt hier? Dies liegt am Zusammenspiel der aufstiegsfördernden Kräfte (Auftriebskräfte) und der sie behindernden Kräfte (Gravitation und Reibung). Für das Einsetzen von Konvektion müssen die Auftriebskräfte überwiegen.

Weitere Fragen sind: Woher kommt die Energie? Wer verrichtet die Hubarbeit? Da im Erdinneren oder im Ozean keine „Pumpe“ existiert, muss das Stoffpaket diese Energie selber aufbringen. Es nimmt sie aus dem



eigenen Vorrat, der so genannten inneren Energie. Diese wiederum wird beim Aufstieg zum Teil in Lageenergie also in potenzielle Energie (E_{pot}) umgewandelt. Ein weiterer Teil geht durch den Kontakt des Stoffpaketes mit der Umgebung verloren (z. B. Reibungsarbeit, Wärmediffusion). Durch diese Verluste kann der Konvektionsprozess entweder gar nicht erst einsetzen oder wieder zum Erliegen kommen.

Der (Wärme-) Energietransport verläuft immer von Orten höherer zu Orten niedrigerer Temperatur. An der kühleren Oberfläche wird ein weiterer Teil der inneren Energie in Form von Wärme abgegeben (s. VELARDE und NORMAND 1980).

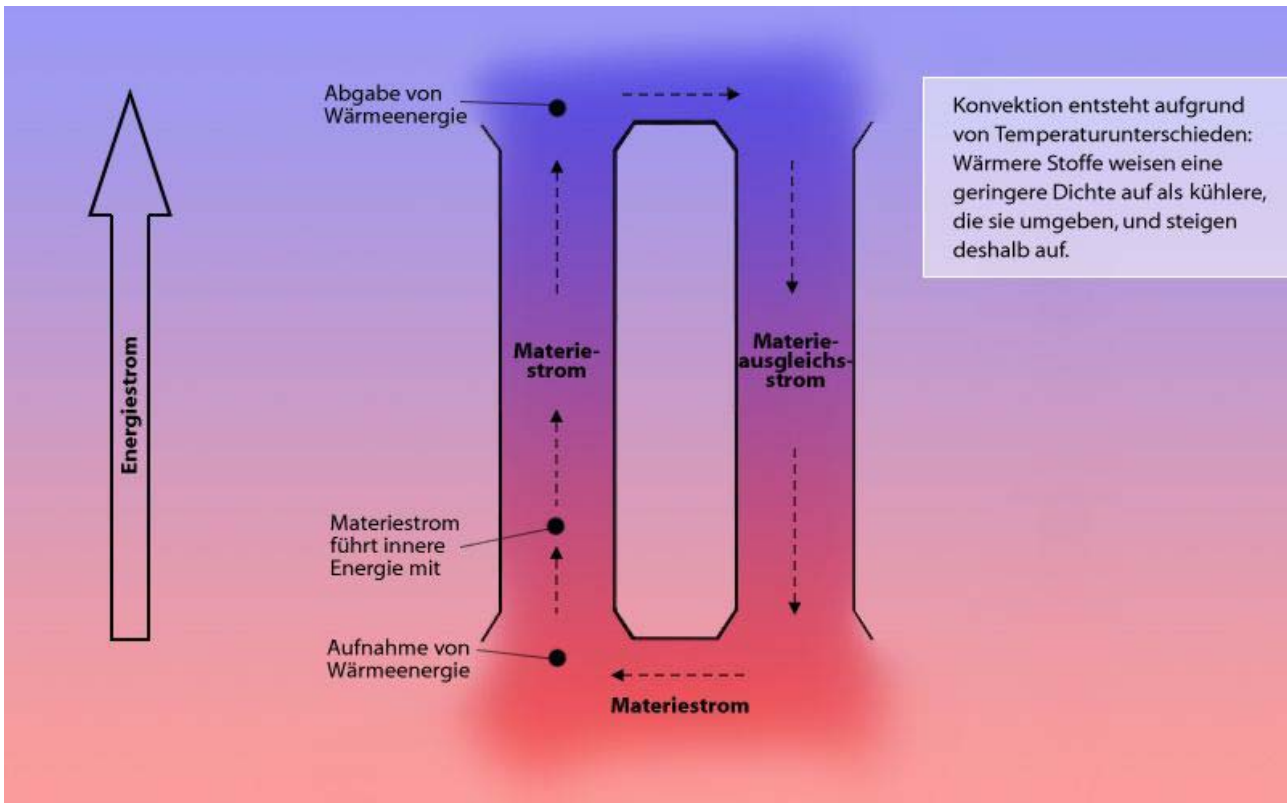


Abbildung 3: Übersicht über alle an der Entstehung von Konvektion beteiligten Prozesse.

Modellvorstellungen zur Konvektion und die RAYLEIGH-Zahl

Erste mathematische Berechnungen, durch die die Modellvorstellung des Prozesses Konvektion beschrieben werden kann, lieferte Lord RAYLEIGH, ein englischer Physiker des 19. Jahrhunderts. Er führte eine charakteristische dimensionslose Größe ein, die heute RAYLEIGH-Zahl genannt wird. Sie dient der Orientierung und gibt an, ob und in welcher Form Konvektion in einem System einsetzen kann. Die RAYLEIGH-Zahl ist der Quotient aus konvektionsfördernden Größen, welche die Auftriebskräfte beeinflussen, und konvektionsbehindernden Größen, welche die Energieverluste durch Reibung und Wärmeabfluss bestimmen (s. Abb. 6). Mit steigender RAYLEIGH-Zahl findet ein Übergang von Wärmeleitung über thermische Konvektion, z. B. in Form von Walzen, über hexagonale Strukturen (s. Abbildung 4 und 5) bis hin zur turbulenten Konvektion statt.

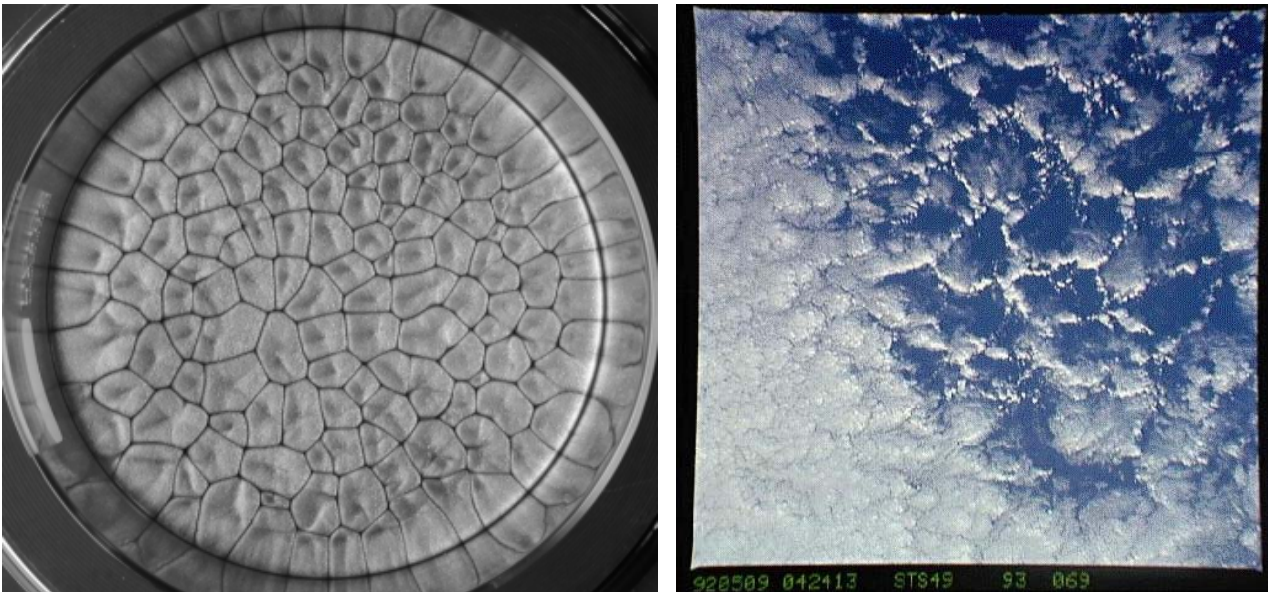


Abbildung 4: Hexagonale Strukturen. Links: Das RAYLEIGH-BÉNARD-Experiment im Labor (IPN-Projekt zur didaktischen Rekonstruktion nichtlinearer Physik). Rechts: Mit Spaceshuttle Endeavor aufgenommene Wolkenformation (NASA 1992).

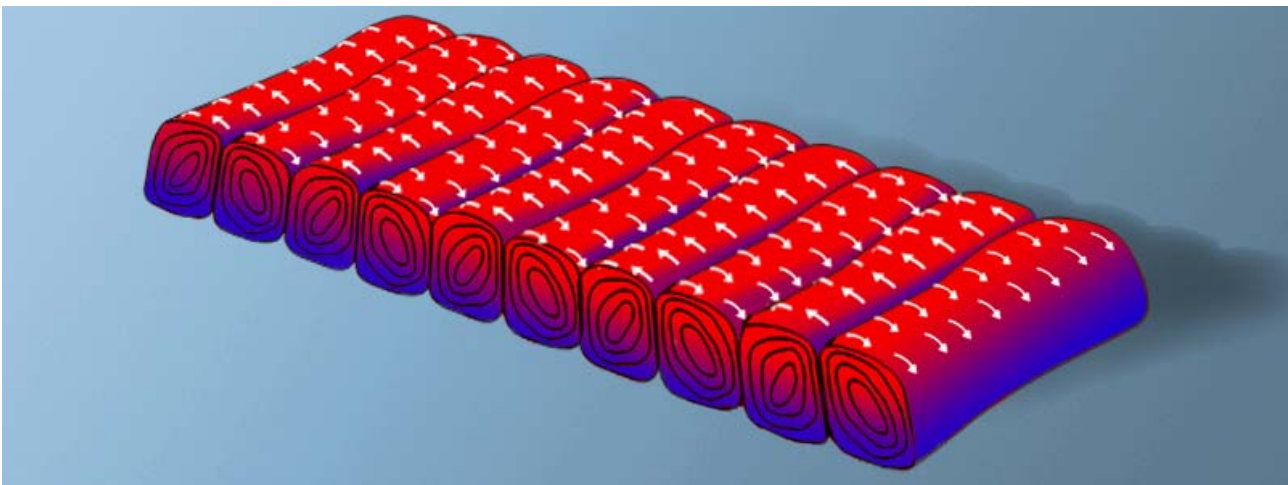


Abbildung 5: Durch Konvektion entstehen Strukturen wie z. B. diese Walzen (VELARDE und NORMAND 1980).

RAYLEIGH ließ außer Acht, dass sich zum Beispiel die Reibung in Abhängigkeit von der Aufstiegsgeschwindigkeit und von der Temperatur zur Umgebung ändert. Eine derartig umfassende Beschreibung ist bis heute nicht gelungen (s. VELARDE und NORMAND 1980).

Dimensionslose Größen wie die RAYLEIGH-Zahl (s. Tab. 1) sind nicht direkt messbar wie zum Beispiel die Temperatur mithilfe eines Thermometers. Dennoch ist die RAYLEIGH-Zahl wie die Temperatur eine für ein System charakteristische Größe. Dies zeigt die Betrachtung von Phasenübergängen: Bei kritischen Temperaturwerten geht ein Stoff in einen anderen Zustand über (z. B. der Phasenübergang von Eis zu Wasser bei 0 °C). Auch geht ein System bei einem kritischen Wert für die RAYLEIGH-ZAHL von der Wärmeleitung zur thermischen Konvektion über (s. Tab. 1).



$$Ra = \frac{g \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot \rho \cdot d^3}{\kappa \cdot \eta} = \frac{g \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot d^3}{\kappa \cdot \nu}$$

Dabei bedeuten :

α = Volumenausdehnungskoeffizient

ΔT = wirksame Temperaturdifferenz

g = Erdbeschleunigung

ρ = Dichte

d = Dicke der Flüssigkeitsschicht

κ = Temperaturleitfähigkeit des Mediums $\kappa = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$

c = spezifische Wärmekapazität

λ = Wärmeleitfähigkeit

η = dynamische Viskosität

ν = kinematische Viskosität $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

Abbildung 6: Formulierung der RAYLEIGH-Zahl. In der Literatur findet man verschiedene Formulierungen der RAYLEIGH-Zahl, die sich in der Regel ineinander umrechnen lassen. Diese Formel wird für Strömungen in Form geschlossener Zellen (so genannte BÉNARD-Zellen) in einer Flüssigkeitsschicht verwendet.

Tabelle 1: Kritische RAYLEIGH-Zahlen für den Übergang von der Wärmeleitung zur Konvektion (* nach Chandrasekhar 1961, ** Prandtl et al 1990). Die Werte hängen davon ab, wie das Medium nach oben und unten „begrenzt“ ist. Begrenzt sein kann ein Medium durch einen Materialwechsel, der dazu führt, dass kein Austausch stattfindet.

| Kritische Rayleigh-Zahl (Ra_c) | Rahmenbedingungen |
|------------------------------------|---|
| 657,5* | freie Oberfläche, freier Boden |
| 1107** | freie Oberfläche, begrenzter Boden, z.B. im Erdmantel |
| 1708** | begrenzte Oberfläche, begrenzter Boden |
| 1700-1800** | Wasser 18°C - 20°C mit freier Oberfläche und begrenzten Boden. Wasser verhält sich aber wie beidseitig begrenzt. |

Neben der RAYLEIGH-Zahl sind noch weitere dimensionslose Größen für die Beantwortung geowissenschaftlicher Fragen von Bedeutung, wie z. B. die so genannte **MARANGONI-Zahl**, welche den Einfluss der Oberflächenspannung beschreibt und die **PRANDTL-Zahl**, die ausschließlich die stofflichen Eigenschaften von Materialien beschreibt. Die dimensionslosen Größen sind von besonderer Bedeutung, um mit Laborversuchen Rückschlüsse auf Vorgänge im Erdmantel zu ziehen.

System Erde

Teilsysteme des Systems Erde, wie Erdmantel, Ozean oder Atmosphäre, in denen konvektive Prozesse stattfinden können, sind typische Vertreter der komplexen nichtlinearen Systeme. Mit diesen befasst sich der Wissenschaftszweig „Nichtlineare Dynamik“. Am Beispiel des RAYLEIGH-BÉNARD-Experimentes soll diese Theorie erläutert werden. Hierbei wird auch in das Thema „Strukturbildung durch Selbstorganisation“ eingeführt.

Das Phänomen der Selbstorganisation ist für die Strukturbildung in der Natur von großer Bedeutung. Auf den ersten Blick scheint die sich von selbst ausbildende Ordnung dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik zu widersprechen, der besagt, dass ein System ein Maximum an Unordnung anstrebt. Jedoch gilt der 2. Hauptsatz nur für abgeschlossene Systeme. Die erwähnten Teilsysteme des Systems Erde sind aber nicht abge-



schlossen, da aus dem Erdinneren und von der Sonne Wärme zugeführt, während aus ihnen Wärme an Weltall abgeführt wird. Sie befinden sich daher nicht im thermodynamischen Gleichgewicht und sind Vertreter von Nicht-Gleichgewichtssystemen, wie der Planet Erde als Ganzer auch (s. Modul „System Erde - Die Grundlagen“). Die Strukturbildung ist ein dynamischer Prozess: Aus anfänglichen Fluktuationen können sich beliebige Strukturen bilden. Allerdings sind einige Strukturen durch die Dynamik des Systems in ihrem Wachstum begünstigt, während andere unterdrückt werden. Die Entstehung der Strukturen kann mathematisch beschrieben werden.

3 Didaktische Information

3.1 Lernziele

Im Zentrum dieses Moduls steht die Bedeutung des Prozesses Konvektion für die Dynamik des Systems Erde (s. Abb. 7). Anknüpfend an ihre Alltagserfahrungen (z. B. „warme Luft steigt nach oben“) sollen sich die Schüler/innen anhand von Schülerexperimenten und eines simulierten Computermodells die physikalischen Grundlagen erarbeiten, indem sie

- anhand grundlegender physikalischer Betrachtungsweisen zu einem vertiefenden Verständnis von Konvektion geführt werden;
- erkennen, dass Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen häufig etwas mit Verteilung z. B. von Energie zu tun haben;
- erkennen, dass Verteilungsvorgänge in den Bereichen Erdmantel, Ozean und Atmosphäre durch ein gemeinsames Schema beschrieben werden, wobei der Konvektionsbegriff eine wesentliche Rolle spielt. Der Begriff Konvektion wird allerdings in den verschiedenen Teilgebieten der Naturwissenschaften in unterschiedlicher Bedeutung verwendet;
- im Zusammenhang mit der Konvektion mit dem Phänomen der Selbstorganisation bekannt gemacht werden und die Bedeutung dieses fundamentalen Prinzips für die Bildung von Strukturen in der Natur erkennen.

Darüber hinaus sollen sie lernen selbstständig Versuche durchzuführen und die erarbeiteten Ergebnisse ihren Mitschüler/innen zu erläutern.

3.2 Hinweise zu den Lernvoraussetzungen

Grundkenntnisse und Experimentiererfahrungen aus dem Physikunterricht der Sekundarstufe I reichen für die Durchführung der Versuche und für die Abschlussdiskussion aus (Baustein 1 „Konvektion im System Erde“ (Material 1) und Baustein 2 „Physikalische Grundlagen der Konvektion“ (Material 1)). Für die Thematik des Bausteins 3 „Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation“ (Material 1) ist die Kenntnis des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik erforderlich. Die Kenntnis des zweiten Hauptsatzes und des Entropiebegriffs ist von Vorteil. Vorausgesetzt wird die Bereitschaft der Schüler/innen, sich das erforderliche physikalische Grundlagenwissen für die Beantwortung der Ausgangsfragen anzueignen.

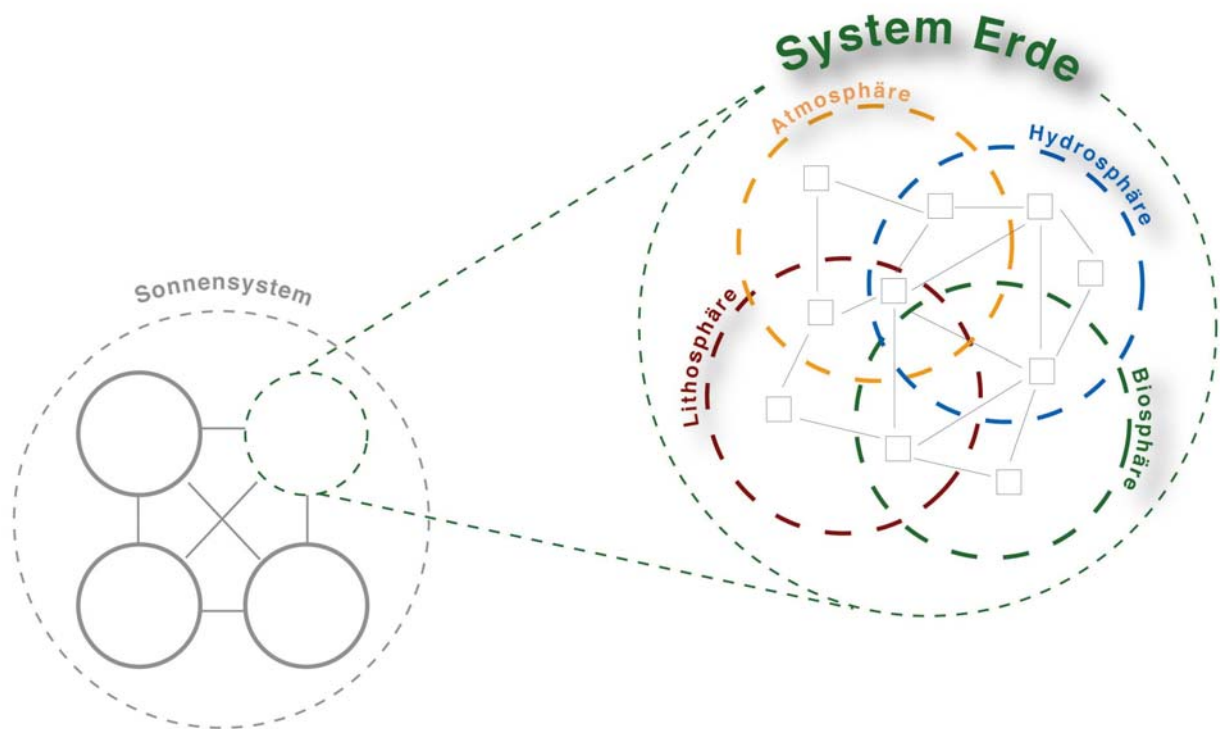


Abbildung 18: Das Modul „Konvektion in Erdmantel, Ozean und Atmosphäre“ im Kontext System Erde. In diesem Modul werden die Sphären Lithosphäre, Atmosphäre und Hydrosphäre schwerpunktmäßig behandelt.

3.3 Hinweise zu horizontalen und vertikalen Verknüpfungen

Das vorliegende Modul richtet sich überwiegend an den fachübergreifenden bzw. fächerverbindenden Physikunterricht. Es vertieft die grundlegenden Informationen über die Modellvorstellungen zu Plattentektonik, Ozeanströmung und Atmosphärenzirkulation, die durch das Modul „System Erde – Die Grundlagen“ phänomenologisch eingeführt werden. Die Module „Gesteinskreislauf: Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte“, „Plattentektonik und Vulkanismus“ sowie „Klimasystem und Klimageschichte“ bieten die Möglichkeit einer vertiefenden Betrachtung im Geographie- und Chemieunterricht. Der vorliegende Baustein 1 „Konvektion im System Erde“ (Material 1) liefert den Einstieg in die physikalischen Grundlagen der Konvektion und kann im fächerverbindenden Unterricht zusammen mit den Materialien der oben genannten Module oder im fachübergreifenden Unterricht bearbeitet werden.

Wichtige Erkenntnisse für das Verständnis der Konvektion im Erdmantel und darüber, dass die Erde aus Schalen aufgebaut ist, liefert das Modul „Erdbeben und Wellen: Nachrichten über das Erdinnere“, das sich ebenfalls an den Physikunterricht richtet. Mit diesem Modul können sich die Schüler/innen Kenntnisse über die Bedeutung geophysikalischer Methoden (Seismik) bei der Erforschung des Erdinneren erarbeiten. Der Baustein 2 „Erdaufbau und Motor der Plattentektonik“ (Material 1) des Moduls „Plattentektonik und Vulkanismus“ hilft den Schüler/innen diese Kenntnisse mit Informationen aus geochemischen Arbeiten zu einer Modellvorstellung zu vernetzen, die geophysikalische und geochemische Erkenntnisse gleichermaßen berücksichtigt.

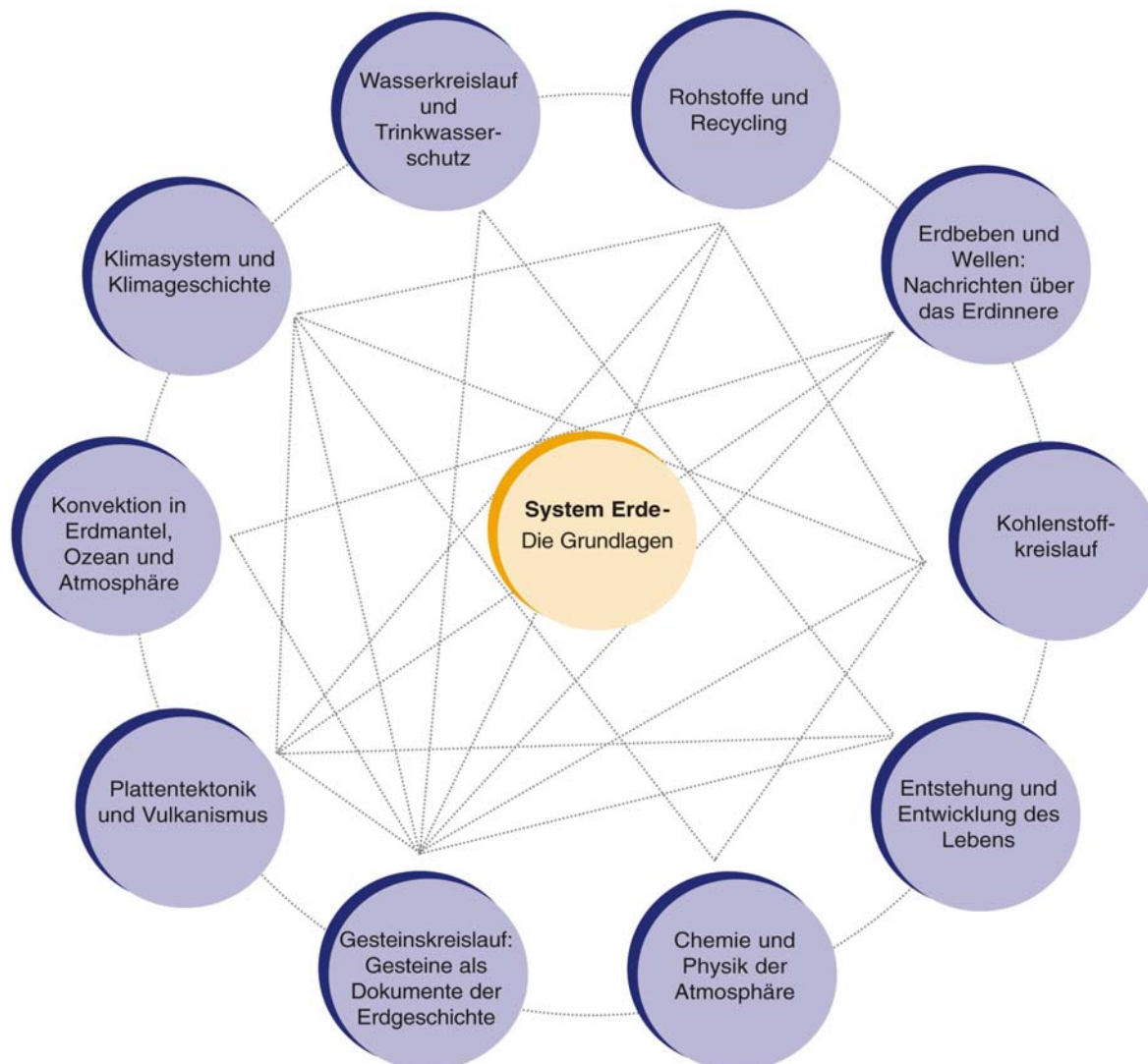


Abbildung 8: Die Verknüpfungen des Moduls „Konvektion in Erdmantel, Ozean und Atmosphäre“ mit den anderen Modulen des Projektes „Forschungsdialog: System Erde“. Realisiert werden diese Verknüpfungen insbesondere durch eine Verlinkung der Hypertexte. Dies soll den fächerverbindenden Charakter geowissenschaftlicher Themen aufzeigen und die Planung eines fächerverbindenden Unterrichts erleichtern. Eine Sonderstellung nimmt das Modul 1 „System Erde – Die Grundlagen“ ein. Es legt die Basis für die Methode der Systemanalyse, die in fast allen weiteren Modulen vertieft wird. Einen Vorschlag für einen fächerverbindenden Kurs nach dem Konzept „Forschungsdialog: System Erde“ enthält Modul 10, Baustein 9. In diesem Kurs trainieren die Schüler/innen selbst organisiertes Lernen und führen schließlich ein Projekt durch, das sich mit der nachhaltigen Entwicklung des Planeten Erde mit dem Schwerpunkt Klimasystem befasst.

Danach sind mit den Bausteinen 2 „Physikalische Grundlagen der Konvektion“ (Material 1) und 3 „Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation“ (Material 1) dieses Moduls verschiedene Eindringtiefen in die physikalische Betrachtungsweise möglich. Für die Schüler/innen mit guten Physikkenntnissen, insbesondere für Leistungskurse, eignet sich das Modul dazu, im fachübergreifenden Unterricht deutlich zu erarbeiten, wie eine physikalische Theorie von den Geowissenschaften genutzt wird, um zu verstehen, wie das System Erde funktioniert.



3.4 Erläuterungen und Nutzungshinweise zu den Materialien

Die Unterrichtsmaterialien zu diesem Thema sind in drei Bausteine gegliedert. Dabei richtet sich das jeweilige Material 1 an die Lehrkräfte. Der Baustein 1 „Konvektion im System Erde“ (Material 1) dient der Einführung. Der Baustein 2 „Physikalische Grundlagen der Konvektion“ (Material 1) und Baustein 3 „Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation“ (Material 1) vertiefen die Kenntnisse der Schüler/innen. Sie beleuchten die theoretischen Aspekte der Konvektion bis hin zur Strukturbildung. Insbesondere der Baustein 3 zur nichtlinearen Dynamik und Selbstorganisation erfordert ein fundiertes physikalisches Hintergrundwissen und richtet sich aus diesem Grund speziell an den Physikunterricht.

Im **Baustein 1 „Konvektion im System Erde“** (Material 1, etwa 6 - 8 Unterrichtsstunden) werden die Grundlagen der Konvektion weitgehend auf experimentellem Wege erarbeitet. Dieser Baustein ist im Sinne eines fachübergreifenden Unterrichts auch für Lehrkräfte geeignet, die Physik nicht als Unterrichtsfach haben. Die Schüler/innen stoßen im Zusammenhang mit der Plattentektonik, dem marinen Förderband und der Luftzirkulation auf den Begriff Konvektion. Die einführenden Fragen und Bemerkungen sollen ihnen den Einstieg in eine differenziertere Beschreibungsform dieser Vorgänge bieten, die mit nur umgangssprachlichen Formulierungen und der Grundlage von Alltagserfahrung nicht möglich ist. Die Grundlagen einer wissenschaftlichen Arbeitsweise wie das beschreibende Beobachten, das kriteriengeleitete Vergleichen, das hypothesengeleitete Experimentieren, das Erklären und das Präsentieren sollen anhand von Versuchen trainiert werden. Die Schüler/innen können sich dabei in den Kompetenzbereichen Erkenntnisgewinnung und Kommunikation weiterentwickeln. Der Lehrkraft fällt die Aufgabe zu, die Schüler/innen bei den Experimenten und bei der Ausarbeitung der Präsentationen zu unterstützen sowie die Abschlussphase zu moderieren, damit der Bedeutungsgehalt des Begriffes der Konvektion verstanden wird.

Damit wird neben dem Wissenserwerb auch das Erfahren von Arbeitstechniken angestrebt, wodurch eine „forschende“ Beschäftigung mit Fragen zum System Erde gefördert wird.

Im **Baustein 2 „Physikalische Grundlagen der Konvektion“** (Material 1, 2 Unterrichtsstunden) stoßen die Schüler/innen auf die RAYLEIGH-Zahl. Die Diskussion über die bestimmenden Größen der RAYLEIGH-Zahl wird nur für naturwissenschaftlich orientierte Lerngruppen empfohlen. Allen anderen soll zumindest vorläufig die Sachinformation reichen, dass mit der RAYLEIGH-Zahl die Beziehung zwischen konvektionsfördernden und –behindernden Einflüssen beschrieben wird. Für naturwissenschaftlich orientierte Schülergruppen bietet der Baustein die Möglichkeit, weitere Differenzierungen vorzunehmen. Folgende Fragen stehen dabei im Vordergrund:

Tabelle 2: Arbeitsformen des Moduls Konvektion in Erdmantel, Ozean und Atmosphäre.

| Arbeitsformen | Baustein | | |
|--|----------|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| Mind Mapping | | | |
| Concept Mapping | | | |
| Systemanalyse durchführen | | | |
| Stoffflussdiagramm entwickeln | | | |
| Texte erfassen und bearbeiten | • | • | • |
| beschreibendes Beobachten | • | | |
| kriterienbezogenes Vergleichen | • | • | • |
| Demonstrationsexperiment | | | |
| Schülerexperiment | • | | |
| Recherche/ Informationsbeschaffung | | | |
| Wirkungsdiagramm entwickeln | | | |
| Interviews mit Expert/innen | | | |
| an Exkursionen teilnehmen | | | |
| Gruppenarbeit | • | | |
| Stationsarbeit | | | |
| Gruppenpuzzle (Expertensystem) | | | |
| Projektarbeit | | | |
| Filme/ Animationen ansehen | | | |
| Computerinteraktionen bearbeiten | | | |
| Modellsimulationen bearbeiten | | | • |
| Internet nutzen | | | |
| Texte verfassen | | | |
| Referate halten | • | | |
| Poster erstellen | | | |
| Tabelle, Diagramm, Grafik etc. aus Daten erstellen bzw. interpretieren | | | |
| bewerten | | | |



- Wie kommt es zur Auslösung eines freien Konvektionsprozesses?
- Wie hat sich das physikalische Modell der Konvektion historisch entwickelt?
- Ist die Erforschung der Konvektion heute schon abgeschlossen, also eigentlich kein Forschungsthema mehr?

In geeigneten Lerngruppen (z. B. im Physikleistungskurs) lässt sich am Beispiel Konvektion exemplarisch die Entwicklung einer physikalisch-mathematischen Modellbildung nachvollziehen. Hierfür ist es wichtig aufzuzeigen, dass Berechnungen durch Experimente bestätigt werden. In beiden Fällen heißt das Ergebnis: „Konvektion findet statt“. Es soll deutlich werden, dass mithilfe eines bestimmten Modells bzw. einer mathematischen Formel ein Prozess in der Natur beschrieben werden kann. Dabei kann auch klar gemacht werden, wie mühselig es ist, ein computergestütztes Modell für ein Naturphänomen zu entwickeln. In solche Modelle fließen sehr viele Gleichungen ein, die mit Versuchs- oder Naturbeobachtungen verifiziert werden müssen. Computergestützte Modelle haben den Vorteil, Ergebnisse für Zeiträume und Orte liefern zu können, die sich unserer direkten Beobachtung entziehen (Konvektion im Erdinneren, Temperaturentwicklung der Erde in der Zukunft). Natürlich müssen solche computergestützte Modellierungen und die daraus resultierenden Ergebnisse kritisch betrachtet werden. Dieses Thema kann gut am Beispiel der Modellberechnungen des INTERNATIONAL PANEL FOR CLIMATE CHANGE (IPCC) weiter vertieft werden (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“).

Der **Baustein 3 „Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation“** (Material 1, etwa 6 Unterrichtsstunden) eignet sich für Physikleistungskurse. Den Lehrkräften wird empfohlen, sich zunächst mit den im Material 1 aufgeführten Sachinformationen zu befassen. Darin werden die im Gebiet der nichtlinearen Dynamik wichtigen Begriffe (Kontrollparameter, Symmetriebrechung) theoretisch erläutert. Die Behandlung im Unterricht findet allerdings auf anschaulichem Niveau statt. Dadurch kann jedoch die Bedeutung des Begriffs „nichtlineare Dynamik“ nur auf relativ allgemeine Weise vermittelt werden. Aus Gründen der thematischen Zuordnung sollte der Begriff aber dennoch genannt werden.

Der Versuch von RAYLEIGH und BÉNARD ist ein Beispiel für Selbstorganisation in einem offenen System. Die Schüler/innen sollen lernen, dass hierbei der Durchfluss von Energie durch das System Voraussetzung für die Entstehung von Strukturen ist. Mehr noch sollen sie erkennen, dass dieser Energiedurchfluss dem System auch einen Entropieexport ermöglicht, sodass dadurch im System Ordnung entstehen kann. Falls die Entropiebetrachtungen für eine Schülergruppe zu komplex erscheinen, liegt es im Ermessen der Lehrkraft, diese Aspekte wegzulassen und sich auf die Klassifikation als offenes System mit stetigem Energiedurchfluss zu beschränken. Im Anschluss an ein entsprechendes Experiment können die Schüler/innen durch eine Auswahl von Bildern zur Strukturbildung durch Selbstorganisation auf die Bedeutung dieses Prinzips in der Natur aufmerksam gemacht werden.

Mithilfe einer Simulation zur Konvektion im Erdmantel können die Schüler/innen die Auswirkungen der RAYLEIGH-Zahl auf die Art des Wärmetransports studieren (Modul 7, Baustein 3, Material 5 und 6). Hierauf aufbauend können anschaulich die Begriffe Kontrollparameter und Symmetriebrechung erläutert werden, sodass die Schüler/innen einen kleinen Einblick in die Welt der nichtlinearen Dynamik erhalten.

4 Vorschläge für den Unterrichtsverlauf

Der Einstieg in die Thematik erfolgt mit drei von den Schüler/innen arbeitsteilig durchzuführenden Versuchen, die an Alltagserfahrungen anknüpfen (Baustein 1). Im Baustein 2 sollen sich die Schüler/innen aufbauend auf die im Baustein 1 erworbenen Kenntnisse zunächst mit den unterschiedlichen Definitionen des Begriffs Konvektion in den verschiedenen Fachgebieten auseinander setzen. Dazu werden im Arbeitsbogen



„Was ist Konvektion?“ (Modul 7, Baustein 2, Material 2) entsprechende Textpassagen zur Verfügung gestellt. In Physikleistungskursen kann anschließend der Baustein 3 „Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation“ bearbeitet werden.

5 Literatur

EULER, M. (1994): Entropie und Strukturbildung. Physik, Bd.2, Teil 1; Klasse 11. In: KUHN, W. (Hrsg.): Physik: Band II, Sekundarstufe II. Westermann, Braunschweig

HAKEN, H. und WUNDERLIN, A. (1991): Die Selbststrukturierung der Materie. Vieweg, Braunschweig

KORNECK, F. (1998): Die Strömungsdynamik als Zugang zur nichtlinearen Dynamik. Shaker, Aachen

MARTIN, C., EIBLMAIER, M., KREUTZWALD, L., DREWS, I., BISCHOF, N. und PRETSCH, H. (Red.)(2002): Lexikon der Geowissenschaften. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

NIELD, D. A. und BEJAN, A. (1999): Convection in porous media. Springer, Berlin, New York

PRANDTL, L., OSWATITSCH, K. und WIEGHARDT, K. (1990): Führer durch die Strömungslehre. 9. Auflage, Vieweg, Braunschweig

PRESS, F. und SIEVER, R. (1994): Allgemeine Geologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

STÖCKER, H. (Hrsg.)(2000): Taschenbuch der Physik: Formeln, Tabellen, Übersichten. Verlag Deutsch

VELARDE, M. G. und NORMAND, C. (1980): Konvektion. In: Spektrum der Wissenschaft, Heft 9/1980

VOGEL, H. und GERDSEN, C. (1995): Gerdson Physik. 18. Auflage, Springer, Berlin

WALZER, U. (1981): Untersuchung der Konvektion im Erdinneren und dafür wichtiger Materialparameter unter hohem Druck. Zentralinstitut für Physik der Erde, Potsdam

6 Unterrichtsmaterialien

Baustein 1: Konvektion im System Erde



Material 1: Konvektion im System Erde (Information)



Material 2: Konvektion im System Erde (Foliensatz)



Material 3: Versuch: Absinken von kaltem Wasser (Arbeitsbogen)



Material 4: Versuch: Absinken von salzigem Wasser (Arbeitsbogen)



Material 5: Versuch: Strömungen (Arbeitsbogen)



Material 6: Lernkontrolle (Arbeitsbogen)



Baustein 2: Physikalische Grundlagen der Konvektion



Material 1: Physikalische Grundlagen der Konvektion (Information)



Material 2: Was ist Konvektion? (Arbeitsbogen)



Material 3: Konvektion (Artikel)



Material 4: Physikalisches Modell der Konvektion (Arbeitsbogen)

Baustein 3: Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation



Material 1: Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation (Information)



Material 2: Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation (Foliensatz)



Material 3: Ein Exkurs in die Wärmelehre (Information)



Material 4: Das RAYLEIGH-BENARD-Experiment (Arbeitsbogen)



Material 5: RAYLEIGH-Zahl (Arbeitsbogen)



Material 6: RAYLEIGH-Zahl (Interaktion¹; s. CD-ROM „System Erde“)

Weitere Materialien

LONG LEE (2004): Simulation gallery. Auf dieser Seite findet man eine **Animation/Simulation** zum RAYLEIGH-BÉNARD-System. Sie veranschaulicht die Ausbildung von konvektiven Walzen. Der Übergang von der Wärmeleitung zur Konvektion wird dabei deutlich.

Bezugsquelle: In: <http://www.amath.unc.edu/Faculty/longlee/> (letzter Abruf 15.08. 2005)

STOCKLET, P. (2000): Films de convection. Zwei **Animationen/Simulationen** von turbulenter Konvektion bei unterschiedlichen RAYLEIGH-Zahlen.

Bezugsquelle: <http://www.ipgp.jussieu.fr/~labrosse/films.html> (letzter Abruf 15.08. 2005)

COMSOL (2005): Free convection in a water glass. In dieser **Animation/Simulation** ist zu sehen, wie sich die Wärme von einer Heizung im Raum verteilt.

Bezugsquelle: <http://www.euro.comsol.com/showroom/animations/> (letzter Abruf 15.08. 2005)

KIND, R., HANSEN, U. und SCHILLING, F.R. (2002): Die Physik des Erdmantels. In: Physik Journal, Heft Nr. 10, S. 33 - 39. Die Autoren beschreiben in einem **wissenschaftlichen Artikel** die physikalischen Eigenschaften des Erdmantels, die als Ursache für die eng mit der Plattentektonik verknüpften Phänomene Vulkanismus, Erdbeben und Gebirgsbildung angesehen werden. Es wird ein Überblick über das interdisziplinäre Arbeitsgebiet gegeben. Stichworte: Seismische Abbildung des Erdinneren, Konvektionswalzen, Seismogramme, stoffliche Zusammensetzung des Erdinneren, Wärmekraftmaschine Erde, Modelle der Mantelkonvektion.

¹ Interaktives Material für den computergestützten Unterricht

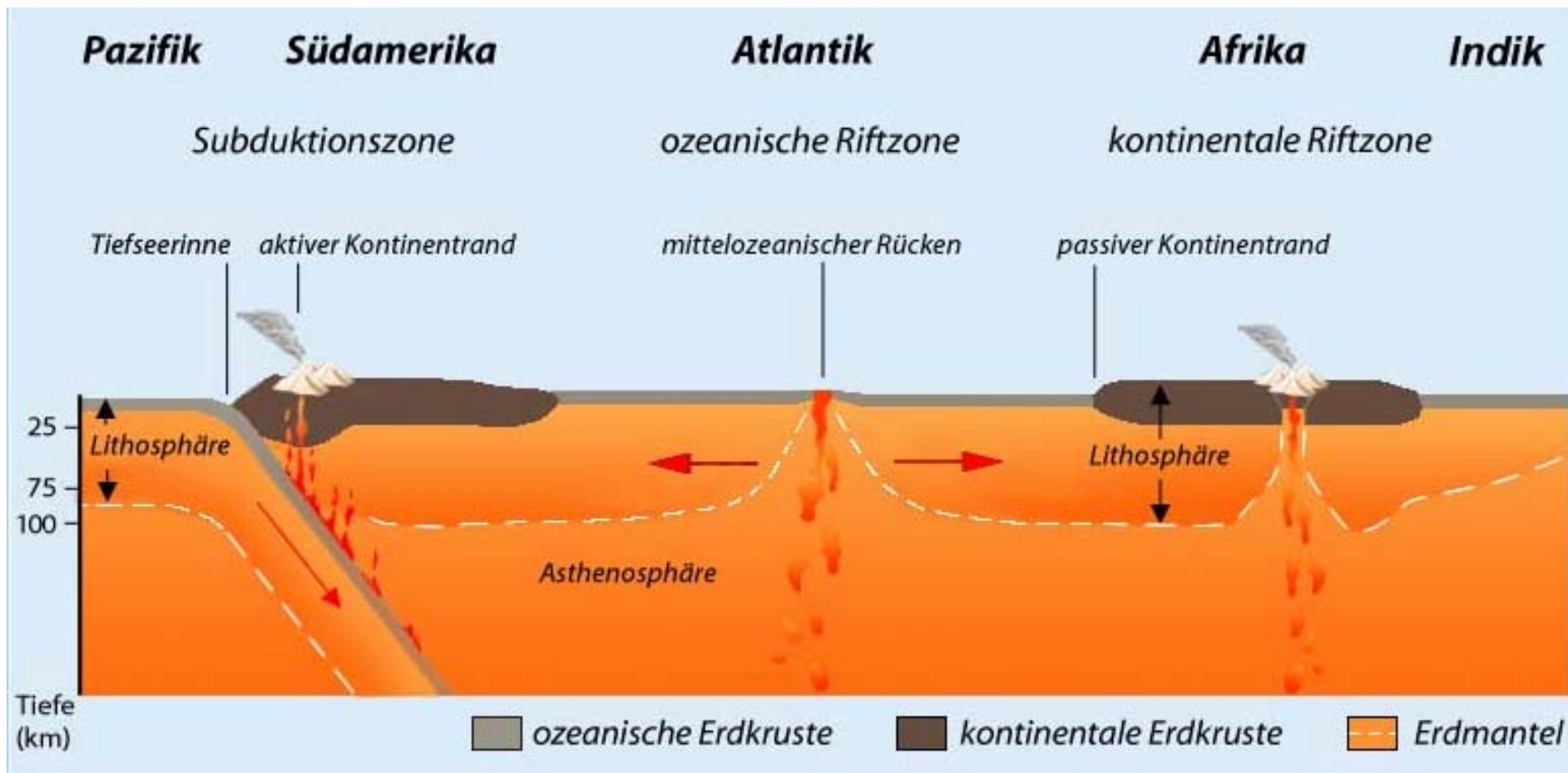


Bezugsquelle: <http://www.gfz-potsdam.de/news/Schulen/texte.html> (letzter Abruf 15.08. 2005).

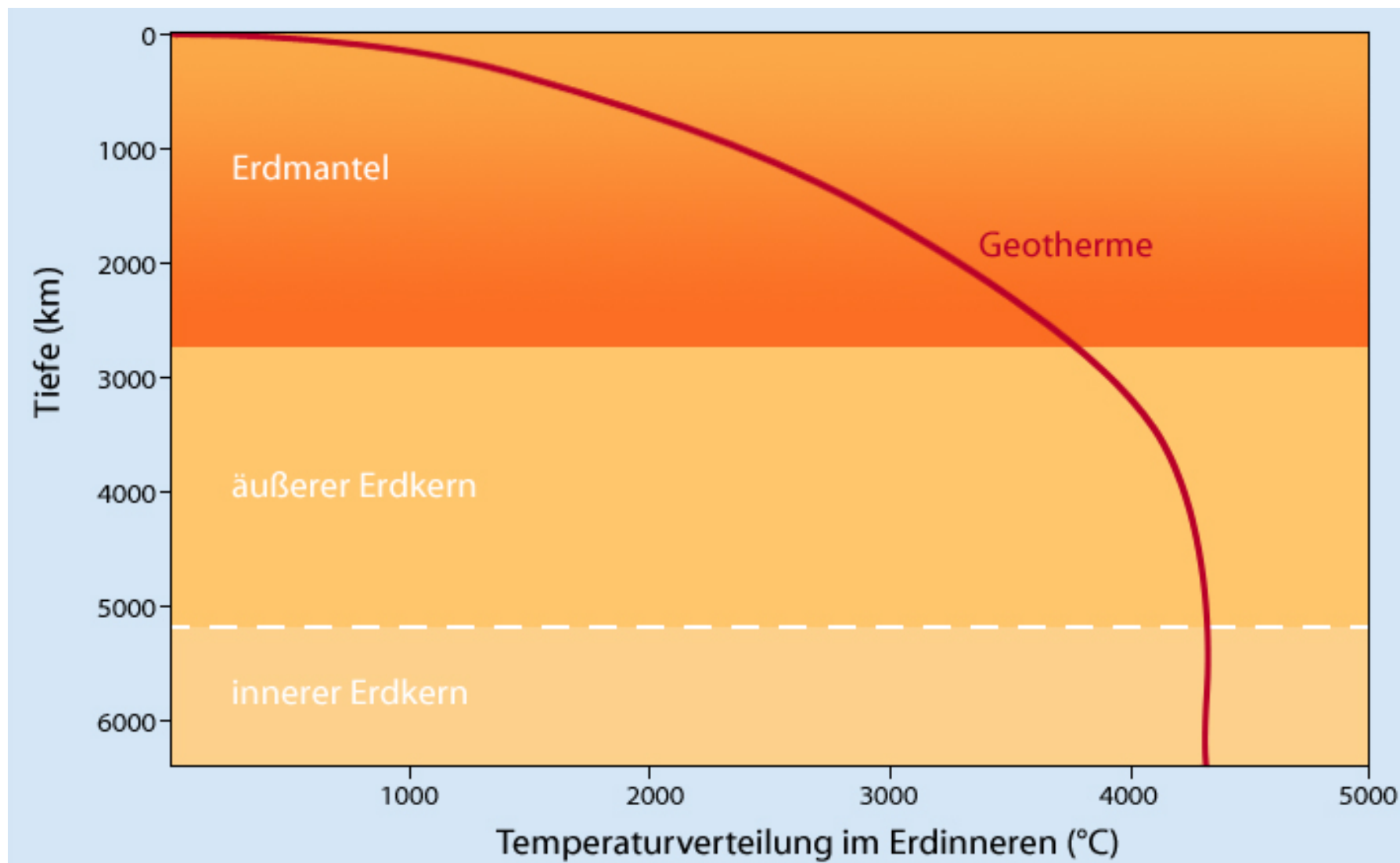
GEOSCIENCE ONLINE. geoscience online ist ein **populärwissenschaftliches Internetmagazin** mit vielfältigen Themen rund um den Planeten Erde. Es richtet sich an Schüler/innen, Studierende, Lehrkräfte und Dozent/innen. Auch Wissenschaftler/innen bietet das Magazin einen fundierten Einblick in die Nachbardisziplinen. geoscience online ist ein Gemeinschaftsprojekt des Heidelberger Springer Verlags und der Düsseldorfer MMCD GmbH - interactive in science und wird von führenden Forschungsinstituten und wissenschaftlichen Gesellschaften unterstützt.

Bezugsquelle: <http://www.g-o.de/> (letzter Abruf 15.08. 2005)

Übersicht der plattentektonischen Zonen

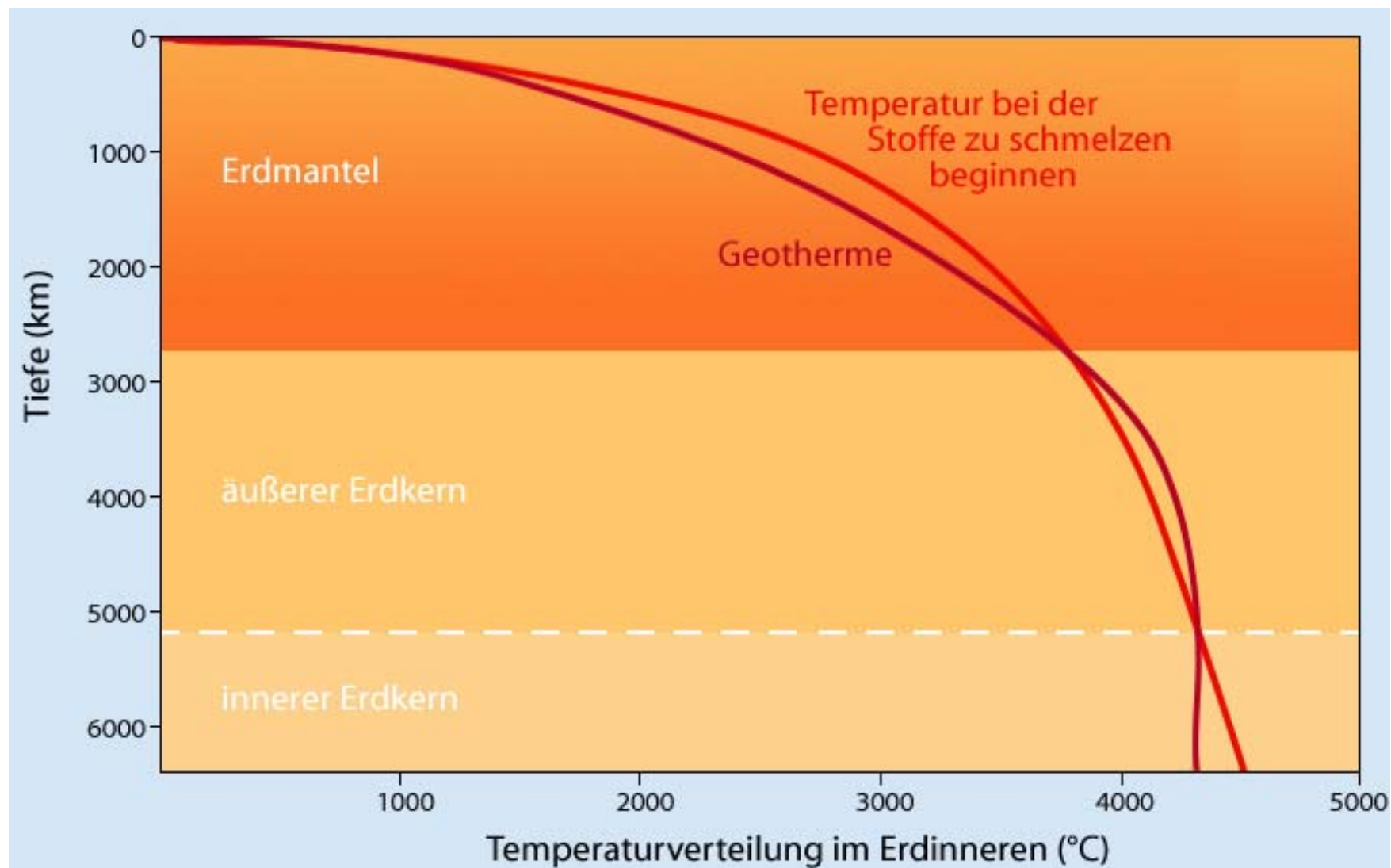


Geotherme



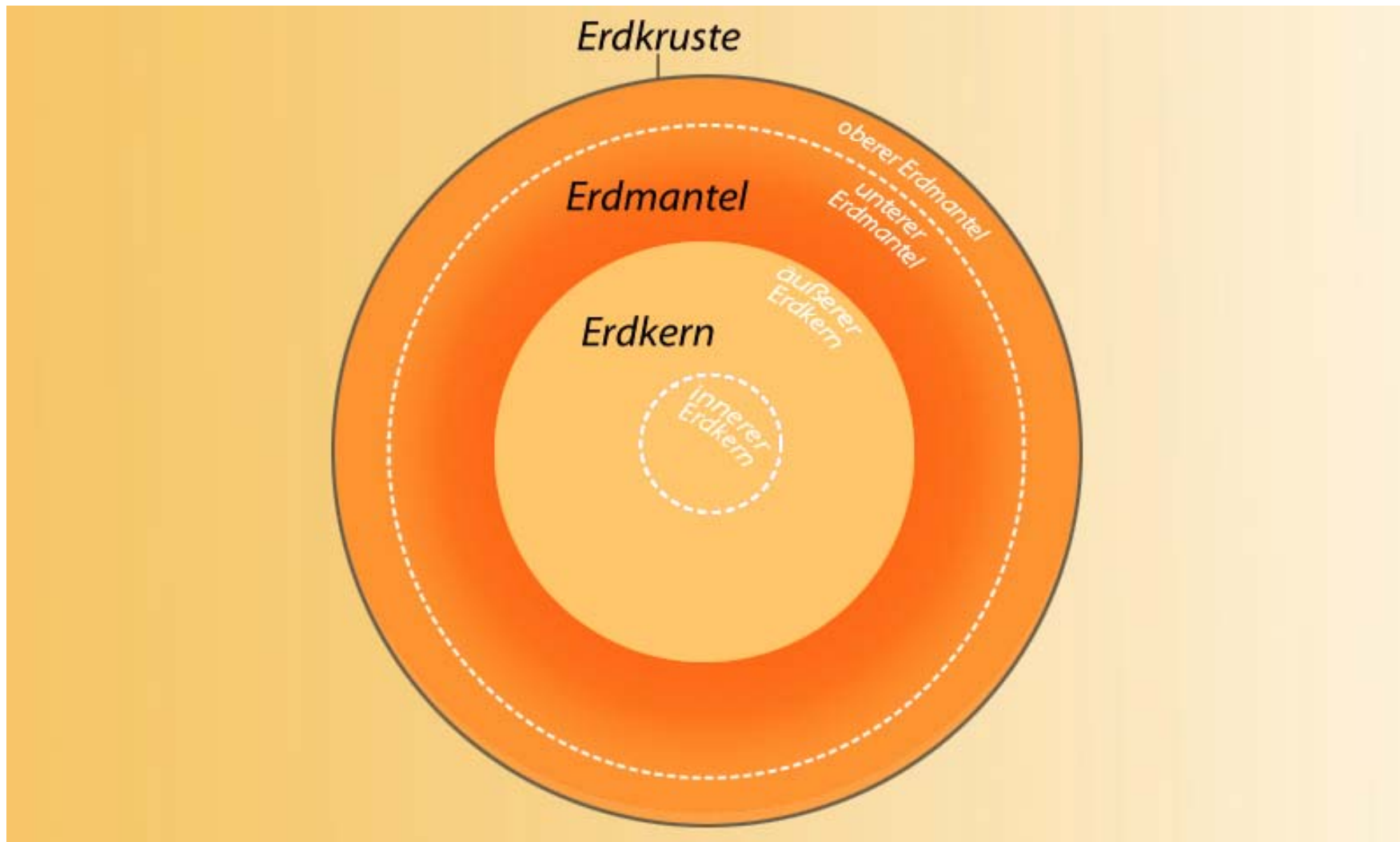
(nach PRESS und SIEVER 1995)

Geotherme und Schmelzkurve



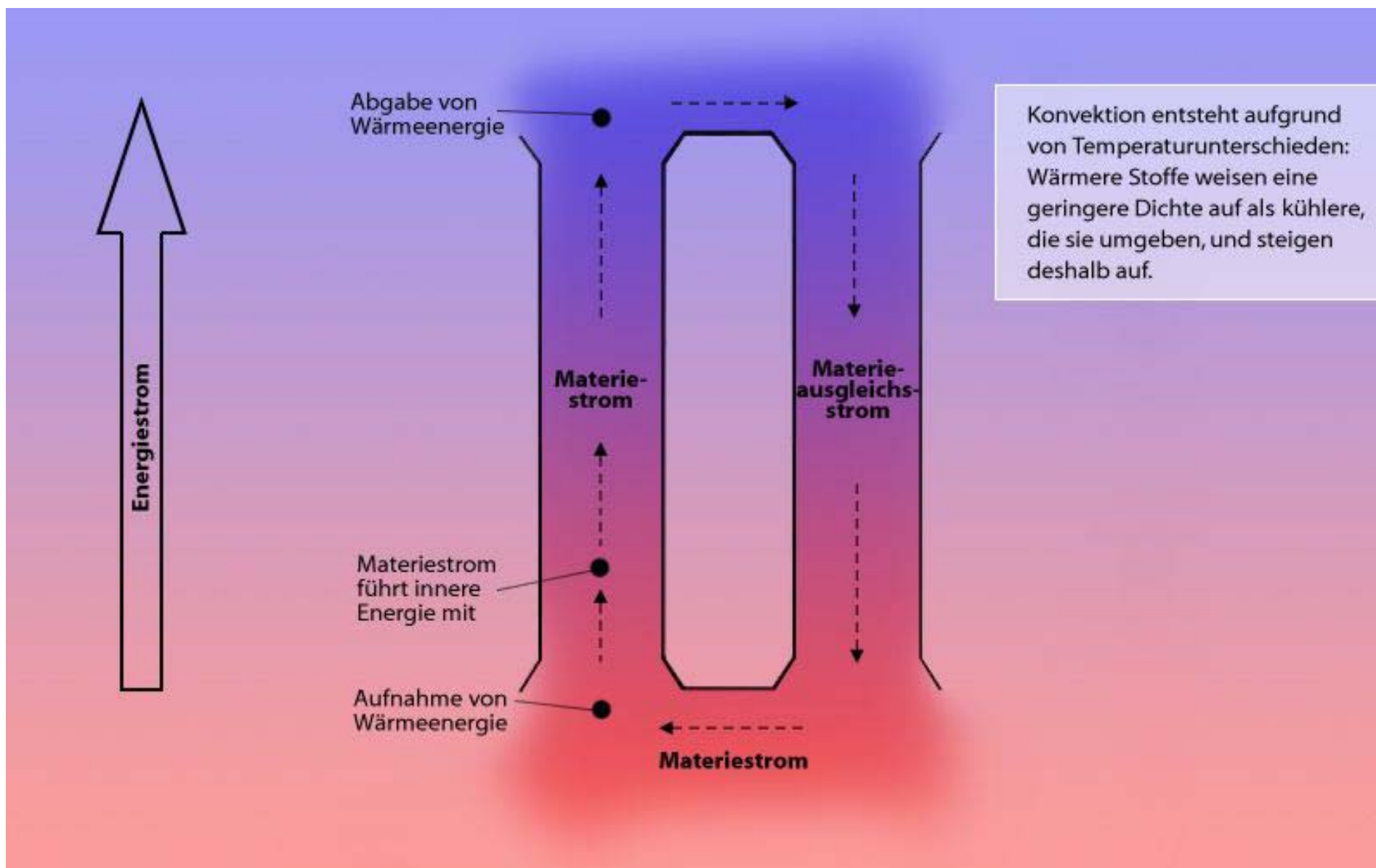
(nach PRESS und SIEVER 1995)

Erdaufbau



| Name | Tiefe | Erläuterungen |
|-------------------------------|-----------------------------------|---|
| ozeanische Erdkruste | ca. 5 – 10 km dick | fest, besteht aus Silicaten |
| kontinentale Erdkruste | ca. 30 – 65 km dick | fest, besteht aus Silicaten durchschnittlich 30 km dick, nur unter Gebirgen aufgrund von Überschiebungen dicker |
| Lithosphäre | bis ca. 100 km Tiefe | fest, besteht aus der ozeanischen und der kontinentalen Erdkruste sowie einem Teil des oberen Erdmantels, unter Gebirgen bis zu 150 km dick, unter ozeanischer Kruste deutlich dünner als 100 km |
| oberer Erdmantel | variiert von ca. 5 bis ca. 660 km | besteht aus Silicaten • bis ca. 100 km Tiefe: fest, bewegt sich bei der Plattentektonik zusammen mit der ozeanischen und der kontinentalen Erdkruste • von ca. 100 – 300 km Tiefe: teilweise aufgeschmolzen (so genannte Asthenosphäre) |
| unterer Erdmantel | ca. 660 – ca. 2900 km | fest, besteht aus Silicaten |
| äußerer Erdkern | ca. 2900 km - ca. 5100 km | flüssig, besteht hauptsächlich aus Eisen |
| innerer Erdkern | ca. 5100 km – ca. 6370 km | fest, besteht hauptsächlich aus Eisen und Nickel |

**zusammengestellt nach MURAWSKI und MEYER (1998)
und MESCHÉDE, persönliche Kommunikation**



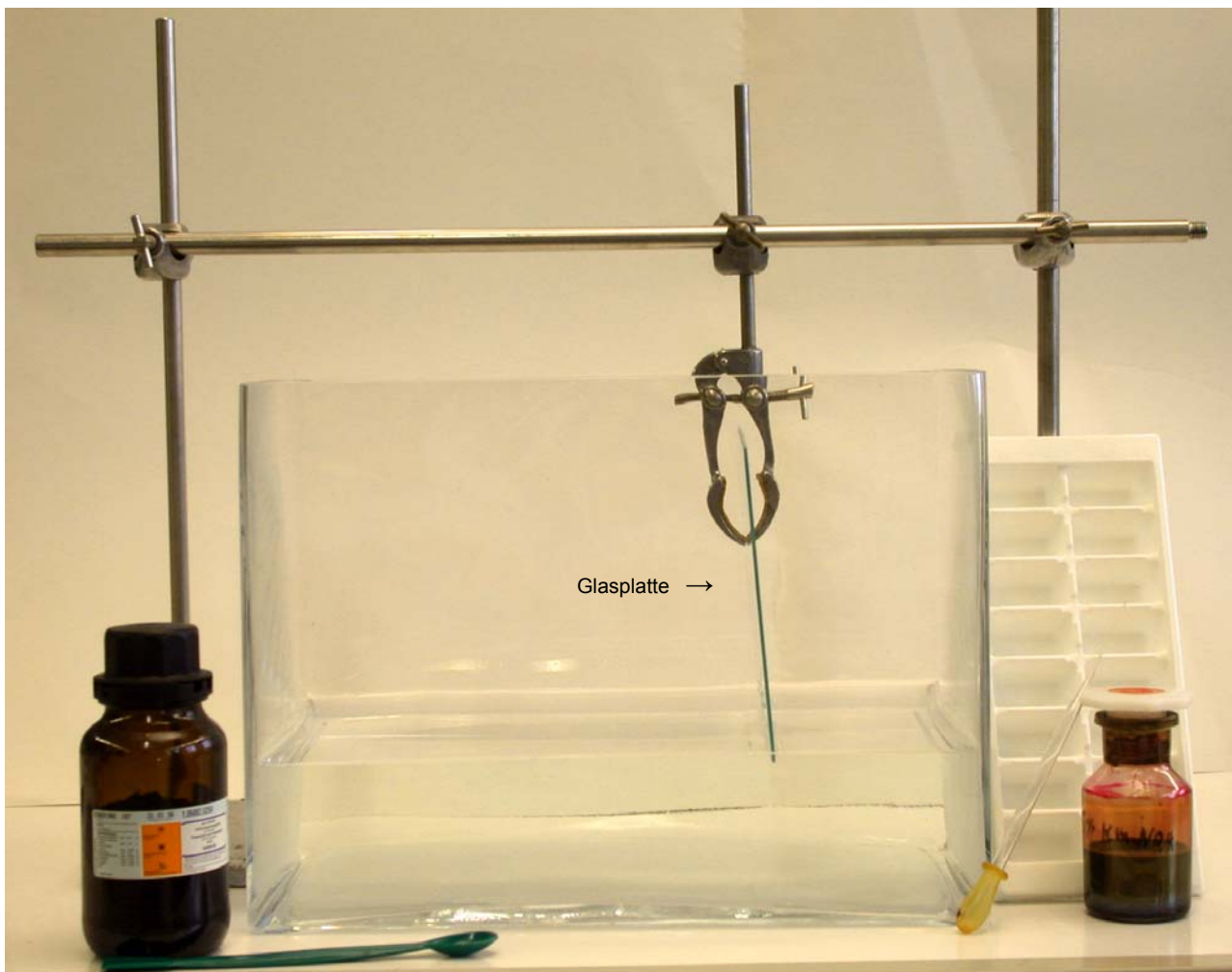
Baustein 1: Konvektion im System Erde

Versuch: Absinken von kaltem Wasser

❶ Materialien:

- 1 Glaswanne 30 x 15 x 20 cm (oder größer)
- Leitungswasser
- Eiswürfel
- Absperrvorrichtung (z. B. direkt auf der Wasseroberfläche verlaufendes Klebeband, das an den Glaswänden befestigt wird oder 1 Glasscheibe mit einem Stativ)
- Kaliumpermanganat KMnO_4 (Kristalle und 5 %ige Lösung in Aquadest)
- Tropfpipette
- Teelöffel

❷ Versuchsaufbau:





③ Durchführung:

Diesen Versuch sollen Sie in 2 Varianten durchführen.

Variante 1:

- Befüllen Sie die Wanne ca. 10 cm hoch mit Wasser aus der Leitung.
- Warten Sie einen Augenblick, bis die durch das Einfüllen hervorgerufene Wasserbewegung in der Wanne abgeklungen ist.
- Sperren Sie einen Teil der Wanne z. B. mit einer Glasplatte ab und geben Sie so viele Eiswürfel wie möglich in diesen abgesperrten Teil. (Die Absperrung soll nur einige Millimeter im Wasser sein.)
- Tropfen Sie mit der Pipette, **vorsichtig**, direkt an der Wasseroberfläche etwas Kaliumpermanganatlösung auf verschiedene Stellen. Wählen Sie dabei unterschiedliche Abstände zu der Eisbarriere.

Variante 2:

- Entleeren Sie die Wanne und führen Sie die ersten drei Schritte nochmal durch.
- Geben Sie mit der Pinzette einen Kaliumpermanganatkristall auf einen Eiswürfel.

④ Auswertung:

1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen zunächst in Worten.

Variante 1:

Variante 2:

- 2) Ergänzen Sie danach das Bild des Versuchsaufbaus, indem Sie Ihre Beobachtungen eintragen.
- 3) Erklären Sie das Versuchsergebnis aus physikalischer Sicht.

4) Bereiten Sie eine Präsentation des Versuchs vor. Dabei soll der Versuch nochmal vor der Klasse durchgeführt werden, und die beobachteten Phänomene sollen physikalisch erläutert werden. Legen Sie die Aufgaben jedes Einzelnen in der Gruppe fest.

Baustein 1: Konvektion im System Erde

Versuch: Absinken von salzigem Wasser

❶ Materialien:

- 1 Glaswanne ca. 30 x 15 x 20 cm
- Leitungswasser
- Kochsalz, Teefilter, Teelöffel
- Stativmaterial zum Aufhängen des Teefilters
- Kaliumpermanganat KMnO_4 (Kristalle und 5 %ige Lösung in Aquadest)
- Tropfpipette
- Teelöffel oder Pinzette

❷ Versuchsaufbau:





③ Durchführung:

Diesen Versuch sollen Sie in 2 Varianten durchführen.

Variante 1:

- Befüllen Sie die Wanne ca. 10 cm hoch mit Wasser aus der Leitung.
- Warten Sie einen Augenblick, bis die durch das Einfüllen hervorgerufene Wasserbewegung in der Wanne abgeklungen ist.
- Geben Sie 1-2 Teelöffel Kochsalz in einen Teefilter und hängen Sie diesen kurz unterhalb der Wasseroberfläche in das Wasser.
- Tropfen Sie mit der Pipette **vorsichtig**, direkt an der Wasseroberfläche etwas Kaliumpermanganatlösung auf verschiedene Stellen. Wählen Sie dabei unterschiedliche Abstände zum Teefilter.

Variante 2:

- Entleeren Sie die Wanne und führen Sie die die ersten drei Schritte nochmal durch.
- Geben Sie mit der Pinzette einen Kaliumpermanganatkristall zu dem Salz in den Beutel.

④ Auswertung:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen zunächst in Worten.

Variante 1:

Variante 2:

- 2) Ergänzen Sie danach das Bild des Versuchsaufbaus, indem Sie Ihre Beobachtungen eintragen.
- 3) Erklären Sie das Versuchsergebnis aus physikalischer Sicht.

- 4) Bereiten Sie eine Präsentation des Versuchs vor. Dabei soll der Versuch nochmal vor der Klasse durchgeführt werden, und die beobachteten Phänomene sollen physikalisch erläutert werden. Legen Sie die Aufgaben jedes Einzelnen in der Gruppe fest.

Baustein 1: Konvektion im System Erde

Versuch: Strömungen

❶ Materialien:

- Glaswanne 10 x 10 x 19 cm oder größer (am Besten aus hitzebeständigem Glas)
- Leitungswasser
- Glasstab zum Rühren
- elektrische Heizplatte mit Thermostat (möglichst kleiner als die Grundfläche der Glaswanne)
- Aluminiumpulver
- Untersuchungshandschuhe, Mundschutz
- Lampe (z. B. Diaprojektor)
- Spülmittel

❷ Versuchsaufbau:



Der Versuch soll bereits einen Tag vorher aufgebaut werden, da das Aluminiumpulver relativ schwer zu handhaben ist.



③ Durchführung:

- I. Die Glaswanne wird möglichst schon am Tag vor der Durchführung des Versuchs (durch die Lehrkraft) mit Wasser ca. 10 cm hoch gefüllt. Zur Herabsetzung der Oberflächenspannung einige Tropfen Spülmittel in das Wasser geben. 1 Teelöffel Aluminiumpulver wird im Wasser verrührt. Die Glaswanne wird mit dem verrührten Aluminiumpulver auf die kalte Heizplatte gestellt. Dann wird so lange gewartet, bis das Wasser still steht (am besten über Nacht stehen lassen).
- II. Die Glaswanne wird, wie im Versuchsaufbau gezeigt, beleuchtet. Es soll am besten sowohl die schmale als auch die nach vorne ausgerichtete breite Wannenseite angestrahlt werden.
- III. Die Heizplatte anstellen und **handwarm** werden lassen. Die Ereignisse beobachten.

Hinweis: Bitte darauf achten, dass die Heizplatte nicht zu heiß wird, sodass die Glaswanne platzt. Eine Erwärmung auf ca. 40 °C reicht vollkommen aus.

④ Aufgaben:

- 1) Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen zunächst in Worten.

- 2) Ergänzen Sie danach das Bild des Versuchsaufbaus, indem Sie Ihre Beobachtungen eintragen.
- 3) Erklären Sie das Versuchsergebnis aus physikalischer Sicht.

- 4) Bereiten Sie eine Präsentation des Versuchs vor. Dabei soll der Versuch nochmal vor der Klasse durchgeführt werden, und die beobachteten Phänomene sollen physikalisch erläutert werden. Legen Sie die Aufgaben jedes Einzelnen in der Gruppe fest.



Baustein 1: Konvektion im System Erde

Lernkontrolle

❶ Fragen:

- 1) Wie kann man sich den Antrieb bei der Bewegung der Lithosphärenplatten vorstellen?

- 2) Wo kommt die Energie für den Antrieb her?

- 3) Was ist als Motor anzusehen?

- 4) Wenn im Inneren der Erde hohe Temperaturen herrschen und gleichzeitig dort ständig neue Wärmeenergie frei wird, müsste sich der Planet Erde eigentlich immer weiter aufheizen. Warum ist dem nicht so?

- 5) Warum ist es wichtig, bei der Beschreibung von Versuchsergebnissen immer die Beobachtung von der Erklärung zu trennen?

- 6) Wie lautet die Definition für den Begriff thermische Konvektion?



Baustein 2: Physikalische Grundlagen der Konvektion

Was ist Konvektion?

❶ Konvektion und verschiedene Fachgebiete:

| Fachgebiet | Verwendung des Begriffes „Konvektion“ (nach Lexikon der Geowissenschaften 2002) |
|-------------------|---|
| Geophysik: | <p>Wärmetransport durch Stofftransport. Neben der reinen Wärmeleitung erfolgt ein erheblicher Wärmetransport in der Erde durch die Kopplung an einen Massentransport. Man unterscheidet zwischen freier Konvektion und erzwungener Konvektion (Advektion).</p> <p>Die freie Konvektion wird allein durch Temperaturunterschiede und dadurch bedingte Dichteunterschiede verursacht. Sie erfolgt dann, wenn eine kritische Temperaturdifferenz überschritten wird (adiabatischer Temperaturgradient). Zur Beschreibung der freien Konvektion haben sich dimensionslose Zahlen bewährt.</p> <p>Für die Abschätzung, ob eine freie Konvektion möglich ist, bietet die RAYLEIGH-Zahl Ra benannt nach Lord RAYLEIGH, einem englischen Physiker (1842-1919), eine wichtige Grundlage.</p> |
| Hydrologie: | <p>Transport gelöster und ungelöster Stoffe (Schwebstoffe) in Fließgewässern durch die Strömung (Gerinneströmung), näherungsweise bei mittlerer Fließgeschwindigkeit.</p> |
| Klimatologie: | <p>Bezeichnung für Bewegungsvorgänge, die durch den Auftrieb in einer Atmosphäre mit labiler Temperaturschichtung hervorgerufen werden (thermische Konvektion). Dabei kommt es zum Aufsteigen wärmerer und zum Absinken kälterer Luftpakete. Die entstehenden Bewegungsformen reichen von einzelnen Aufwinden bis hin zu geordneten Konvektionszellen (z. B. BÉNARD-Zellen, Wolkenstraße).</p> <p>Spielt die Kondensation von Wasserdampf keine Rolle, so spricht man von trockener Konvektion (bei Segelfliegern auch Blauthermik genannt).</p> <p>Kondensiert in den aufsteigenden Luftpaketen der Wasserdampf (feuchte Konvektion), so führt dies zur Bildung von Konvektionswolken. Diese können sich wie im Fall der Cumulonimbus-Wolke bis zur Tropopause erstrecken. Die Konvektion sorgt besonders in der atmosphärischen Grenzschicht für einen effektiven vertikalen Wärmetransport zwischen dem durch solare Einstrahlung erwärmten Untergrund und der kühleren freien Atmosphäre.</p> |
| Kristallographie: | <p>Begriff für Strömungen in beweglichen Phasen. Die Nährphase für die Kristallzucht ist i. d. R. eine mobile, fluide oder gasförmige Phase. Aufgrund von Konzentrationsunterschieden und Temperaturgradienten vor der Wachstumsfront kann es zu auftriebs- oder oberflächenspannungsgetriebenen Strömungen kommen. Diese nennt man Konvektionen. Je nach Umgebungsbedingungen können laminare, oszillierende oder turbulente Strömungen auftreten, die die Verhältnisse direkt vor der Wachstumsfront entscheidend beeinflussen können. Sie verändern z. B. die Schichtdicke der am Kristall haftenden Schicht, in der nur Diffusion abläuft.</p> <p>Gerade beim gerichteten Erstarren wird der Konzentrationsverlauf im erstarrten Festkörper stark von der Konvektion beeinflusst. Für ein kontrolliertes Wachstum ist eine Beherrschung der Konvektionsströme äußerst wichtig. Dazu werden Bedingungen geschaffen, die die Konvektion entweder unterdrücken oder durch aufgeprägte, erzwungene Strömungen gleichmäßig gestalten. Wichtige Erkenntnisse für diese Züchtungsbedingungen wurden durch die Kristallzucht unter Mikrogravitation gewonnen.</p> |
| Ozeanographie: | <p>Prozess des Absinkens von Oberflächenwasser in die tieferen Schichten nach Dichteerhöhung durch Abkühlung oder Salzanreicherung. Zentren tief reichender Konvektion durch Abkühlung sind das Weddellmeer sowie die Grönlandsee und die Labradorsee. Salzanreicherung aufgrund erhöhter Verdunstung führt zu tief reichender Konvektion im europäischen Mittelmeer und im Roten Meer. Salzanreicherung tritt auch bei Eisbildung im Meer auf und führt zu intensiver Konvektion über den arktischen und antarktischen Schelfen. Der Konvektionsprozess gilt als Antrieb der thermohalinen Zirkulation und damit der Tiefenzirkulation im Weltmeer.</p> |

**2 Aufgaben:**

1) Schreiben Sie bitte die Formel für die RAYLEIGH-Zahl noch einmal auf.

a) Betrachten Sie die RAYLEIGH-Zahl und informieren Sie sich im Glossar über die auftretenden Größen.

b) Überzeugen Sie sich, dass die RAYLEIGH-Zahl tatsächlich dimensionslos ist, indem Sie die Einheiten der Größen in die Formel einsetzen.

2) Neben vielen Detailinformationen für die Fachleute kann man aus dem Formelaufbau der RAYLEIGH-Zahl wichtige Informationen über den Prozess Konvektion ablesen. Vollziehen Sie hierfür folgende Schritte nach.

Frischen Sie zunächst Ihre Kenntnisse aus dem Unterricht in der Sekundarstufe I auf und stellen Sie sich einen Gegenstand im Wasser vor: Er kann je nach Dichte im Wasser absinken, schweben oder aufsteigen. Es kommt auf die Kräftebilanz der volumenabhängigen Auftriebskraft F_A und der auf den Gegenstand wirkenden Gravitationskraft F_G an, die ja entgegengesetzt auf den Gegenstand wirken. Man schreibt:

$$\text{Sinken: } F_A < F_G \text{ bzw. } F_A / F_G < 1$$

$$\text{Schweben: } F_A = F_G \text{ bzw. } F_A / F_G = 1$$

$$\text{Steigen: } F_A > F_G \text{ bzw. } F_A / F_G > 1$$

Überwiegt der Ausdruck im Zähler gegenüber dem Nenner, so kommt es zum Aufsteigen des Gegenstandes gegenüber seiner Umgebung.

Und jetzt zur RAYLEIGH-Zahl! Orientieren Sie sich am Konvektionsschema und an Ihren Versuchsbeobachtungen:

a) Welche Einflüsse bzw. Kräfte fördern den Materiestrom nach oben?

b) Welche behindern den Materialstrom nach oben?

c) Welche Formelgrößen im Zähler bzw. Nenner können diesen Einflüssen zugeordnet werden?



d) Was drückt also der Bruch aus?

e) Was passiert theoretisch im Hinblick auf die Konvektion, wenn der Zähler größer als der Nenner wird?

3) Anhand der RAYLEIGH-Zahl kann man vorhersagen, ob Konvektion stattfindet oder nicht. Für nicht besonders gereinigtes Wasser, dessen Oberfläche nur durch die Luft begrenzt wird, werden kritische RAYLEIGH-Zahlen zwischen 1.700 und 1.800 angegeben.

a) Wie groß war die RAYLEIGH-Zahl etwa beim Versuch „Strömungen“ (Modul 7, Baustein 1, Material 5)? Berechnen Sie Ihren Wert mithilfe der folgenden Tabelle. Weitere Annahmen sind: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $d = 0,05 \text{ m}$ und $\Delta T = 10 \text{ K}$.

Tabelle 1: Einige typische physikalische Werte für Wasser.

| | | |
|---------------------------------------|-----------|-------------------------------------|
| Volumenausdehnungskoeffizient: | α | $2,07 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ |
| Dichte: | ρ | 1003 kg/m^3 |
| Dynamische Viskosität: | η | $1002 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$ |
| Wärmeleitfähigkeit: | λ | $0,6 \text{ W/(K m)}$ |
| Spezifische Wärmekapazität: | c | 4187 J/(kg K) |

b) Vergleichen Sie ihn mit dem kritischen Wert.

b) Vergleichen Sie Ihr berechnetes Ergebnis mit dem Versuchsergebnis. Stimmt die Vorhersage aus der RAYLEIGH-Zahl mit Ihren Beobachtungen überein?



3 Glossar

Auftrieb, Archimedisches Prinzip: Die Gewichtskraft eines Körpers, der sich in einem nichtfesten Medium befindet, wird scheinbar reduziert. Diese entgegengerichtete Kraft nennt man Auftriebskraft. Sie entspricht unter gewissen, im Alltag meistens zutreffenden Voraussetzungen, der Gewichtskraft des vom Körper verdrängten Mediums (Archimedisches Prinzip, Herleitung siehe Sek-1-Physikbücher): $F_A = V \rho g$ mit den als ortsunabhängig angenommenen Größen Körpervolumen V , Dichte des Körpers ρ und der Schwerebeschleunigung g .

Die Kräftebilanz (resultierende Kraft) von Gewicht und Auftrieb des Körpers entscheidet, ob er aufsteigt, schwebt oder sinkt.

Dichte (ρ (Rho) gemessen in kg m^{-3} (Kilogramm pro Kubikmeter)): Die Dichte bezieht die Verteilung von Materie auf einen Raumbereich, d.h. „Masse pro Volumeneinheit gleich Dichte“.

Energie E (gemessen in J (Joule) oder Nm (Newtonmeter) oder Ws (Wattsekunde)): „Hat man Energie, kann man arbeiten“, d.h., Energie beschreibt die Fähigkeit, Arbeit verrichten zu können. Einige Energieformen: Bewegungs-(kinetische) Energie, Lage-, Spannungs-(potenzielle) Energie, Wärme-, Licht-, Chemische-(stoffliche) Energie, Kernenergie. In den Naturwissenschaften betrachtet man Energie als eine Erhaltungsgröße, sie kann sich in abgeschlossenen Systemen anders verteilen, in der Summe der verschiedenen Formen bleibt sie aber konstant. Die Umwandlung von einer Energieform in eine andere wird als Arbeit W (work, gemessen in der gleichen Maßeinheit) bezeichnet.

Entropie s (gemessen in J/K (Joule pro Kelvin)) ist etwas, das in einem Körper enthalten ist. Entropie ist ein Maß für die Unordnung eines Systems. Ungeordnete (entropiereiche) Zustände sind wahrscheinlicher als geordnete, entropiearme Zustände. Geordnete können spontan in Ungeordnete übergehen, der umgekehrte Weg erfordert Energie.

Kraft F (force) (gemessen in N (Newton): $1\text{N}=1\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$): Man kann sie an ihrer Wirkung (z. B. Bewegungsänderungen, Verformungen etc.) erkennen, dass sie da ist. Physiker /innen beschreiben sie u. a. mit Hilfe von Kraftpfeilen,

Angriffspunkt X \longrightarrow Richtung

deren Länge ein Maß für die Größe der Kraft darstellt.

Temperatur T (gemessen in K (Kelvin) oder in $^{\circ}\text{C}$ (Grad Celsius)): Die Temperatur beschreibt indirekt den (Wärme-)Energiebesitz eines Körpers. Sie berücksichtigt dabei die speziellen Eigenschaften dieses Körpers, d.h., wie er mit seiner Energie „umgeht, nach außen wirkt“. Deshalb sind Temperatur und Wärmeenergie eines Körpers zu unterscheiden.

Temperaturleitfähigkeit κ (Kappa) (gemessen in $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$): Betrachtet man die Temperaturänderung bei der Wärmeleitung, so werden Materialeigenschaften durch den Parameter $\kappa = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ (ρ Dichte, c spezifische Wärmekapazität, λ Wärmeleitfähigkeit) beschrieben.

Viskosität (Zähigkeit). Unterschieden werden **dynamische Viskosität** η (Eta) (gemessen in Pa s (Pascalsekunde) ($1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$)) und **kinematische Viskosität** ν (gemessen in $\text{m}^2 / \text{s}^{-1}$ (Quadratmeter pro Sekunde)).



- **Dynamische Viskosität:** Bewegt sich eine Flüssigkeit an einer festen Wand entlang, so wird Reibungskraft spürbar. Ähnliches gilt auch für die Grenzflächen, wenn ein Flüssigkeitspaket durch eine Flüssigkeit mit anderen Eigenschaften wandert. Man beschreibt diese materialabhängige Eigenschaft durch den Koeffizienten der inneren Reibung und sammelt die Daten in Tabellen.
- **Kinematische Viskosität:** Bezieht man die dynamische Viskosität auf die Dichte, so erhält man die kinematische Viskosität.

Volumenausdehnungskoeffizient α (gemessen in K^{-1} (pro Kelvin)): Wird ein bestimmtes Volumen eines Stoffes erwärmt, so dehnt es sich aus (Ausnahme: Anomalie des Wassers zwischen $0^\circ C$ und $4^\circ C$). Der Koeffizient gibt an, um wie viele Kubikmeter sich ein Kubikmeter eines bestimmten Stoffes bei einer Temperaturerhöhung von einem Kelvin ausdehnt.

Wärme Q (gemessen in J (Joule)): Wärme ist eine Energieform, sie entspricht der Summe der Bewegungsenergien aller in einem betrachteten Körper sich unregelmäßig bewegenden Teilchen.

Wärmeenergie ist die Energie, die in einem Körper in Form von Brown'scher Molekularbewegung auf die verschiedenen Freiheitsgrade von Atomen und Molekülen verteilt ist.

Wärmekapazität C (gemessen in $J \cdot K^{-1}$ (Joule pro Kelvin)): Setzt man die einem Körper zugeführte Wärmeenergie ins Verhältnis zur beobachteten Temperaturerhöhung, so spricht man von der Wärmekapazität des Körpers. Bezieht man diese stoffabhängige Größe auf die Masse m des Körpers, so erhält man die spezifische Wärmekapazität $c = \frac{C}{m}$ gemessen in $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$. Sie entspricht der Wärmeenergie,

die pro Kilogramm Masse für die Temperaturerhöhung um 1 K benötigt wird. Bei Gasen und Flüssigkeiten berücksichtigt man noch, ob die Wärmezufuhr bei konstantem Druck (c_p) oder konstantem Volumen (c_v) erfolgt. Die Daten findet man in Tabellen.

Wärmeleitfähigkeit λ (Lambda)(gemessen in $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Watt pro Meter und Kelvin)): Mit diesem Parameter werden die Auswirkungen der Materialeigenschaften eines Stoffes auf die Wärmeleitung berücksichtigt. Die Daten findet man in Tabellen.

Wärmetransport: Tritt ein Körper mit seiner Umgebung in Kontakt, so kann Wärmeenergie abgegeben werden. Dabei unterscheidet man verschiedene Möglichkeiten.

- **Wärmeleitung (Konduktion, Wärmediffusion):** Durch Stoßprozesse mit benachbarten Teilchen an der Oberfläche wird Energie übertragen. Die Körper müssen sich also berühren.
- **Konvektion:** Wärmeenergie wird als innere Energie bei einer Materieströmung mitgeführt.
- **Wärmestrahlung:** Auch mit einem materiefreien Raum kann Energie ausgetauscht werden und zwar über elektromagnetische Kraftfelder im Raum. Man spricht dann von elektromagnetischer Strahlung (u. a. Wärmestrahlung (Infrarotlampe), Licht (visuelles Spektrum) oder ultraviolettes Licht).



Baustein 2: Physikalische Grundlagen der Konvektion

KONVEKTION

Von MANUEL G. VELARDE
und CHRISTIANE NORMAND

Konvektionsströmungen entstehen in Gasen oder Flüssigkeiten, wenn sich Dichte- oder Temperaturunterschiede ausgleichen. Die Passatwinde beruhen auf diesem Prinzip ebenso wie Strömungen in den Ozeanen oder die Schlieren, die man beim Erwärmen einer Flüssigkeit beobachtet.

1. Die Erscheinung der Konvektion ist jedem vertraut, der eine kochende Suppe beobachtet hat, die Luft über einem Feuer aufsteigen fühlte, oder an einem heißen Tag das Flimmern der Luft über einer asphaltierten Straße bemerkte. Die großen ozeanischen Strömungen, die Luftbewegungen in der Atmosphäre und die noch großräumigeren Strömungsbewegungen in der Sonnenatmosphäre sind Konvektionsströmungen. Konvektionswolken entstehen, wenn warme, feuchte Luft aufsteigt, und die Unterbrechung der normalen Konvektion bei einer Inversionswetterlage führt dazu, dass sich über Städten wie Los Angeles oder Madrid der Smog sammelt. Auch beim Trocknen einer Lackschicht spielt die Konvektion eine Rolle, und sie sorgt dafür, dass sich die Atemluft in den Lungen gleichmäßig verteilt. Konvektionsströmungen im Erdmantel erzeugen die Kräfte, die die Kontinente auseinander schieben.
2. Die einfachsten Formen der Konvektion lassen sich mit der Formel „Wärme steigt auf“ erklären: Konvektionsströmungen kommen zustande, wenn eine Flüssigkeit (oder ein Gas) von unten erhitzt wird. Die untere Schicht der Flüssigkeit dehnt sich in diesem Fall aus, sodass sich ihre Dichte verringert. Infolgedessen kann die untere Schicht nach oben steigen, während die oberen, kälteren Schichten sinken. Diese Zusammenhänge waren bereits im achtzehnten Jahrhundert bekannt. Daher mag es überraschen, dass die Konvektion für die theoretische Physik auch heute noch eine Herausforderung ist. Selbst einfache Systeme mit einer starken Konvektionsbewegung lassen sich noch nicht mathematisch exakt beschreiben.
3. Welcher Art die Schwierigkeiten sind, lässt sich wieder am Beispiel einer von unten erhitzten Flüssigkeit verdeutlichen. Die Kraft, die die Konvektion in diesem Fall verursacht, ist der Auftrieb. Seine Stärke hängt vom Temperaturunterschied zwischen der oberen und unteren Begrenzungsfläche der Flüssigkeit ab. Die Verhältnisse werden kompliziert, weil sich das Temperaturgefälle in der Flüssigkeit durch die Konvektionsbewegung ändert: Diese transportiert Wärme von unten nach oben und modifiziert damit die Kraft, von der sie angetrieben wird.
4. Auch wenn sich Systeme dieser Art heute noch nicht mathematisch exakt beschreiben lassen, ist man einer allgemeinen Theorie der Konvektion in den letzten zwanzig Jahren doch näher gekommen. Die Fortschritte beruhen vor allem auf Ideen und mathematischen Methoden, die in anderen Bereichen der Physik, insbesondere bei der Untersuchung von Phasenübergängen, ferromagnetischen Stoffen und Supraleitern entwickelt wurden. Mit diesen Methoden lassen sich die Stabilitäten von Strömungsbewegungen in Flüssigkeiten und Gasen berechnen, sodass man vorhersagen kann, welche Art der Bewegung man beobachten wird. Zwar sind die Resultate nur Näherungen, aber in vielen Fällen handelt es sich um sehr gute Näherungen.
5. Die Konvektion, die wir hier beschreiben wollen, heißt natürliche oder freie Konvektion, weil ihre Strömungen durch Kräfte hervorgerufen werden, die in der Flüssigkeit wirken. Zu diesen Kräften gehört vor allem der Auftrieb; aber auch die Oberflächenspannung oder ein elektromagnetisches Feld kann die entscheidende Rolle spielen. Die freie Konvektion unterscheidet sich von der erzwungenen Konvektion, bei



der die Bewegung in der Flüssigkeit durch äußere Kräfte, beispielsweise durch eine Pumpe oder einen Ventilator erzwungen wird.

6. Eine der ersten Beschreibungen der freien Konvektion stammt aus der Zeit um 1790. Ihr Autor war Sir Benjamin THOMPSON, Graf von RUMFORD, und sein Problem bestand darin, den Wärmetransport in einer Apfeltorte zu erklären. Schon früher hatte man die Konvektion für Luftbewegungen in der Atmosphäre verantwortlich gemacht, aber erst nach 1900 begann man, die Erscheinung systematisch zu untersuchen. Die wichtigsten experimentellen Beiträge lieferte damals der französische Forscher Henri BÉNARD. Er entdeckte, dass sich beim Erhitzen einer dünnen Flüssigkeitsschicht Zellen bilden, die die Form regelmäßiger Sechsecke haben (s. Bild 1). Die Vorgänge, die BÉNARD untersuchte, sind um vieles komplizierter als er vermutete. Erst vor kurzem gelang es, die Struktur der BÉNARDSCHEN Zellen zu erklären. Wir kommen darauf zurück.

Konvektion in einer dünnen Flüssigkeitsschicht

7. Zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts entwickelte John William STRUTT, der spätere Lord RAYLEIGH, eine Theorie der Konvektion. Eine seiner letzten Schriften war eine 1916 veröffentlichte Arbeit, in der er versuchte, die Beobachtungen BÉNARDS zu erklären. Zwar wissen wir heute, dass sich RAYLEIGH'S Theorie auf das BÉNARDSCHE Experiment nicht anwenden lässt, aber fast alle modernen Theorien der Konvektion gehen auf die Ideen von Lord RAYLEIGH zurück.
8. Anhand eines Gedankenexperimentes lässt sich RAYLEIGH'S Theorie erklären: Man stellt sich dazu eine Flüssigkeit vor, die etwas einfachere Eigenschaften hat als jede reale Flüssigkeit. Eine dünne Schicht dieser einfachen Flüssigkeit wird durch zwei flache, unelastische, waagrecht liegende Platten begrenzt und füllt den Raum zwischen den Platten vollständig aus, sodass es keine freie Oberfläche gibt. Die Schicht gilt als dünn, wenn ihre horizontale Ausdehnung um vieles größer ist als ihre Höhe, das heißt als der Abstand zwischen den beiden Platten. Eine dünne Schicht hat den Vorteil, dass die Verhältnisse an den Rändern der Platten die Vorgänge in der Mitte praktisch nicht beeinflussen und daher in der theoretischen Beschreibung nicht explizit aufzutauchen brauchen. Im Idealfall wäre eine dünne Schicht horizontal unendlich ausgedehnt. Praktisch genügt aber eine Schicht, die sich über eine Fläche von einigen Quadratcentimetern erstreckt und nur wenige Millimeter dick ist.
9. In unserem Gedankenexperiment erwärmen wir die Flüssigkeit zwischen den Platten von unten her gleichmäßig, sodass der untere Teil der Schicht überall die gleiche Temperatur hat. Diese Temperatur halten wir konstant. An der Oberseite der Schicht wird Wärme abgeführt, sodass die Temperatur dort niedriger ist als an der Unterseite, aber ebenfalls überall den gleichen konstanten Wert hat. Natürlich ist unter diesen Bedingungen auch die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite konstant und überall gleich. Außerdem soll das Temperaturgefälle (das heißt die Änderung der Temperatur mit der Höhe) linear sein, sodass sich eine Gerade ergibt, wenn man die Temperatur gegen die Höhe aufträgt.
10. Um das Problem zu vereinfachen, machen wir noch folgende Annahmen: Die einzige Kraft, die in der Flüssigkeit wirkt, sei die Schwerkraft, und das Gravitationsfeld sei im gesamten Flüssigkeitsvolumen homogen. Außerdem soll sich die Flüssigkeit nicht zusammendrücken lassen (sie soll inkompressibel sein), und bei Änderungen der Temperatur soll sich einzig die Dichte der Flüssigkeit ändern, und zwar in normaler Weise, das heißt so, dass die Dichte abnimmt und die Flüssigkeit sich ausdehnt, wenn man die Temperatur erhöht.
11. Um die Wirkung des Temperaturgefälles in dieser Flüssigkeit zu untersuchen, betrachten wir eine kugelförmige Flüssigkeitsparzelle, die aus ihrer ursprünglichen Position nach oben oder nach unten versetzt worden ist, und fragen nach den Kräften, die auf diese Parzelle wirken, denn sie bestimmen alle weiteren



Bewegungen in der Flüssigkeit. Die Flüssigkeitsparzelle darf eine beliebige Form und Größe haben, aber ihre räumliche Verschiebung muss klein sein. Dann lassen sich die Kräfte mit der Theorie von RAYLEIGH berechnen (die streng genommen nur für infinitesimale, das heißt verschwindend kleine Verschiebungen gilt). Die ursprüngliche Verschiebung braucht ihre Ursache nicht in einer von außen wirkenden Kraft zu haben, denn die Moleküle der Flüssigkeit befinden sich in ständiger Bewegung, und ihre Positionen ändern sich in zufälliger Weise. Dabei kann jede beliebige kleine Verschiebung eintreten, sofern man lange genug wartet.

12. Unsere kleine Parzelle befindet sich nahe dem Boden der Flüssigkeitsschicht. Da dort eine erhöhte Temperatur herrscht, ist die Dichte der Parzelle etwas kleiner als die mittlere Dichte der gesamten Schicht. Solange die Parzelle aber an ihrem ursprünglichen Ort bleibt, ist sie von Flüssigkeit der gleichen Dichte umgeben, und es wirken keine Auftriebskräfte. Alle Kräfte, die an der Parzelle angreifen, sind im Gleichgewicht: Die Parzelle sinkt und steigt nicht.
13. Wir nehmen nun an, die Flüssigkeitsparzelle erfahre durch eine zufällige Störung eine kleine Kraft, die eine Aufwärtsbewegung hervorruft. Wie wirkt sich diese Verschiebung auf das Gleichgewicht der Kräfte aus? Die Parzelle ist jetzt von kälterer und dichter Flüssigkeit umgeben, und das hat eine nach oben gerichtete Auftriebskraft zur Folge, sodass die Parzelle weiter steigt. Die Auftriebskraft ist zum Dichteunterschied zwischen der Parzelle und der sie umgebenden Flüssigkeit und zum Volumen der Parzelle proportional. Die zunächst zufällige Aufwärtsbewegung der Parzelle wird also durch den Dichtegradienten verstärkt, und je weiter die Parzelle steigt, um so größer werden die Kräfte, die eine weitere Aufwärtsbewegung bedingen.
14. Ähnliches gilt, wenn eine Parzelle aus dem oberen Teil der Flüssigkeitsschicht aufgrund einer Störung anfängt zu sinken. Sie gelangt in eine Umgebung mit kleinerer mittlerer Dichte und ist dort schwerer als ihre Umgebung. Sie sinkt also weiter, und die ursprüngliche Störung verstärkt sich. Diese Aufwärts- und Abwärtsbewegungen sind die Grundlage der natürlichen Konvektion, die schließlich die gesamte Flüssigkeitsschicht erfasst.
15. In einer Flüssigkeit sollte - der Theorie zufolge - immer dann Konvektion herrschen, wenn ein Temperaturgefälle existiert, einerlei wie klein dieses ist. Selbst bei einem infinitesimal (unendlich) kleinen Gradienten müssten das zufällige Aufsteigen warmer und das Absinken kalter Flüssigkeit eine dauerhafte Strömung hervorrufen. In Wirklichkeit ist eine Flüssigkeitsschicht jedoch nicht derart anfällig gegen zufällige Störungen. Der Temperaturgradient muss vielmehr einen Schwellenwert erreichen, bevor Konvektion einsetzt. Lord RAYLEIGH gelang es zu erklären, warum das so ist.

Auftrieb, Viskosität und Wärmetransport

16. Lord RAYLEIGH zeigte, dass eine Theorie der Konvektion neben dem Temperaturgefälle und dem damit zusammenhängenden Dichteunterschied mindestens zwei weitere Faktoren berücksichtigen muss, die die Bewegung der Teilchen beeinflussen: Der eine Faktor ist die Zähigkeit oder Viskosität der Flüssigkeit, die auf eine Art Reibung zwischen den Flüssigkeitsmolekülen zurückzuführen ist und sich in einem Widerstand gegen Bewegungen in der Flüssigkeit bemerkbar macht: Wenn sich zwei aneinander grenzende Flüssigkeitsschichten gegeneinander verschieben, sorgt die Viskosität für einen Widerstand. Bei einer kugelförmigen Flüssigkeitsparzelle, die sich verhältnismäßig langsam bewegt, ist die Widerstandskraft proportional zum Produkt aus der Viskosität der Flüssigkeit sowie dem Radius und der Geschwindigkeit der Parzelle. Solange diese Widerstandskraft mindestens gleich der Auftriebskraft ist, gerät die Parzelle nicht in Bewegung.
17. Der zweite Faktor, der in Rechnung gestellt werden muss, ist die Tatsache, dass es neben der Konvektion noch andere Formen des Wärmetransportes in Flüssigkeiten gibt: Wärmestrahlung, Wärmeleitung und



Wärmediffusion (Thermodiffusion). Bei den meisten Konvektionsexperimenten sind die Temperaturen vergleichsweise niedrig, und der Einfluss der Strahlung ist so gering, dass man ihn nicht zu berücksichtigen braucht. Dagegen kann die Wärmediffusion nicht immer vernachlässigt werden. Sie verringert den Temperaturgradienten, der die Konvektion antreibt.

18. Um uns die Wärmediffusion zu veranschaulichen, betrachten wir eine warme Flüssigkeitsparzelle, die in eine kühlere Umgebung aufgestiegen ist (s. Bild 2). Da die Wärme von der Geschwindigkeit abhängt, mit der sich die Moleküle der Flüssigkeit im Mittel bewegen, müssen die Moleküle in der warmen Parzelle eine größere mittlere Geschwindigkeit haben als die in der kühleren Umgebung. Moleküle können die Grenze zwischen der Parzelle und ihrer Umgebung ungehindert überschreiten, und der Austausch vieler Moleküle in beiden Richtungen hat zur Folge, dass sich die mittleren Geschwindigkeiten der Moleküle innerhalb und außerhalb der Parzelle ausgleichen. Wärme strömt also aus der Parzelle nach außen, sodass die Parzelle auskühlt und ihre Umgebung aufgewärmt wird, bis sich ein Gleichgewicht einstellt und überall die gleiche Temperatur herrscht. Ist eine kalte Flüssigkeitsparzelle in eine wärmere Umgebung gesunken, so fließt der Wärmestrom aus der Umgebung in die Parzelle. In beiden Fällen verschwinden die Auftriebskräfte im gleichen Maß, in dem sich die Temperaturunterschiede ausgleichen.
19. Die Zeit, die eine Flüssigkeitsparzelle braucht, um mit ihrer Umgebung ins thermische Gleichgewicht zu kommen, ist umgekehrt proportional zur Diffusionskonstanten für die Wärmediffusion der Flüssigkeit und direkt proportional zur Oberfläche der Parzelle. Damit die Auftriebskräfte verschwinden, muss diese Zeit kleiner sein als die Zeit, die die Parzelle braucht, um eine Strecke von der Größe ihres eigenen Durchmessers zurückzulegen. Mit anderen Worten: Wenn die Konvektionsströmung langsamer ist als der Wärmeaustausch durch Diffusion, kommt die Konvektion schließlich zum Stillstand. Die der Flüssigkeit von unten her zugeführte Wärme breitet sich dann allein durch Wärmediffusion aus.
20. Lord RAYLEIGH'S Analyse hat also gezeigt, dass die bloße Existenz eines Temperaturgradienten nicht ausreicht, um die Konvektion in Gang zu bringen. Die Auftriebskräfte müssen größer sein als die ihnen entgegengerichteten Kräfte, die durch die Viskosität und die Wärmediffusion hervorgerufen werden. Der Quotient aus den Auftriebskräften einerseits und dem Produkt aus dem Viskositätswiderstand und dem Wärmefluss andererseits ergibt eine dimensionslose Zahl, die man als RAYLEIGH-Zahl bezeichnet. Konvektion beginnt, wenn die RAYLEIGH-Zahl einen kritischen Wert überschreitet.

Stabilität und Instabilität

21. Die Bedeutung der RAYLEIGH-Zahl wird deutlich, wenn man die Stabilitäten verschiedener Bewegungen untersucht, die in Flüssigkeiten auftreten können. Gewöhnlich definiert man Stabilitäten anhand von Potenzialkurven oder Potenzialflächen, die die Energie eines Systems als Funktion mehrerer Variablen angeben. Befindet sich ein System im Zustand geringstmöglicher Energie, so entspricht ihm der tiefste Punkt auf der Potenzialfläche.
22. Ein einfaches Modell einer Potenzialfläche ist eine halbkugelförmige Schale mit einer Murmel, deren Position in der Schale die Zustände veranschaulicht, in denen sich ein System befinden kann. Die Murmel ist im Gleichgewicht, wenn sie am Boden der Schale ruht. Sie hat dann den Zustand minimaler Energie. Wird die Murmel aus dieser Position verschoben, so rollt sie anschließend in die Gleichgewichtslage zurück und schwingt dabei etwas um ihre Ruhestellung, ehe sie aufgrund der Reibung zum Stillstand kommt. Weil die Murmel nach einer Störung immer wieder zum tiefsten Punkt der Schale zurückkehrt, sagt man, sie sei dort im stabilen Gleichgewicht.
23. Dreht man die Schale um und setzt die Murmel sorgsam auf den äußeren Scheitelpunkt der Schale, so befindet sie sich dort wiederum in einem Gleichgewichtszustand, doch unterscheidet sich dieser vom



Vorherigen. Alle Kräfte, die auf die Murmel wirken, sind im Gleichgewicht und sofern keine Störung auftritt, wird die Murmel bewegungslos liegen bleiben. In der Praxis wird es allerdings - wenn man lange genug wartet - immer äußere Einflüsse geben (etwa einen Luftzug oder eine Erschütterung), die das Gleichgewicht stören. Danach kehrt die Murmel nicht in die Ausgangsposition zurück, sondern entfernt sich immer mehr von ihr. Den Gleichgewichtszustand, in dem sich die Murmel im Scheitelpunkt befindet, bezeichnet man daher als instabil.

24. Liegt die Murmel nicht in oder außen auf einer Schale, sondern auf einer waagerechten ebenen Fläche, so kehrt sie weder an ihren Ausgangspunkt zurück, noch entfernt sie sich von ihm immer weiter, wenn man sie an eine andere Stelle bringt. Sie bleibt vielmehr in der neuen Position liegen. Jeder Punkt auf einer waagerechten, ebenen Potenzialfläche entspricht daher einem indifferenten Gleichgewicht.
25. Diese Erörterung zeigt, dass man über die Stabilität eines Systems nur dann eine Aussage machen kann, wenn man sein Verhalten bei allen möglichen Störungen prüft. Beispielsweise wird die Murmel in der Schale nur dann zum Zentrum der Schale zurückkehren, wenn die Störung nicht so groß ist, dass sie die Murmel aus der Schale her austreibt. Daraus folgt, dass es schwierig sein kann, zu beweisen, dass ein Gleichgewichtszustand stabil ist. Andererseits braucht man nur eine Störung zu finden, die „von allein“ anwächst, um die Instabilität eines Systems zu beweisen.
26. Auch eine ruhende Flüssigkeitsschicht, die von unten erwärmt wird, befindet sich in einem Gleichgewichtszustand. Zwar liegen kältere und daher dichtere Schichten über wärmeren und daher leichteren, und die potenzielle Energie des Systems nähme beim Austausch dieser Schichten ab. Dennoch geht die Flüssigkeitsschicht nicht in den Zustand mit der niedrigsten Energie über, solange keine Störungen auftreten, denn alle Kräfte, die auf eine Flüssigkeitsparzelle wirken, sind im Gleichgewicht. Die Theorie der Konvektion muss die Frage beantworten, ob dieses Gleichgewicht stabil, instabil oder indifferent ist, das heißt, sie muss eine Aussage über die Gestalt der Potenzialfläche machen, die der Flüssigkeitsschicht entspricht.
27. Die Krümmung der Potenzialfläche hängt vom Wert der RAYLEIGH-Zahl ab. Wenn der Temperaturgradient und damit die Auftriebskräfte verschwinden, ist die RAYLEIGH-Zahl Null, und der Zustand der ruhenden Flüssigkeitsschicht ist stabil. Die Potenzialfläche ist wie die Innenseite einer Schale konkav gekrümmt, und man muss Energie aufwenden, um die Flüssigkeit in Bewegung zu setzen.
28. Ist die RAYLEIGH-Zahl sehr groß, so heißt das, dass der Auftrieb die beherrschende Kraft ist. Die Flüssigkeit kann ihre Gesamtenergie durch Konvektion verringern. Jede Störung verstärkt sich, das Gleichgewicht der ruhenden Flüssigkeit ist instabil, und die Potenzialfläche ist konvex (wie die Innenseite einer auf dem Kopf stehenden Schale).
29. Zwischen diesen beiden Extremen gibt es einen kritischen Wert der RAYLEIGH-Zahl, bei dem der Auftrieb und die ihm entgegenwirkenden Kräfte von gleicher Größe sind. Wenn die kritische RAYLEIGH-Zahl wächst (beispielsweise bei einer Vergrößerung des Temperaturgradienten), flacht sich die ihr entsprechende konkave Potenzialfläche ab und hat die Gestalt einer waagerechten Ebene, sobald die kritische RAYLEIGH-Zahl erreicht ist. Wächst sie weiter, so wird die Potenzialfläche konvex, und gleichzeitig wird das Gleichgewicht instabil. Für die dünne idealisierte Flüssigkeitsschicht unseres Gedankenexperimentes errechnet man für die kritische RAYLEIGH-Zahl den Wert von 1708. Bei einer wenige Millimeter dicken Schicht aus Siliconöl erreicht die RAYLEIGH-Zahl den kritischen Wert bereits bei einem Temperaturgradienten von wenigen Grad Celsius.
30. Das Gedankenexperiment, auf das sich die RAYLEIGH-Theorie gründet, beruht auf vielen vereinfachenden Annahmen, von denen einige den Tatsachen nicht entsprechen. Gleichwohl kommt man damit zu



erstaunlich genauen Voraussagen über die Bedingungen, unter denen in realen Flüssigkeiten die Konvektion beginnt. So ergaben Experimente von Peter L. SILVESTON und von Ernest E. KOSCHMIEDER für die kritische RAYLEIGH-Zahl den Wert 1700 ± 50 , der mit dem aufgrund der RAYLEIGH-Theorie berechneten Wert von 1708 gut übereinstimmt.

Walzenförmige Konvektionszellen

31. Was beobachtet man, wenn die Konvektionsströmung eingesetzt hat? Die RAYLEIGH-Theorie gibt darüber keine Auskunft. Auch mit fortgeschritteneren Theorien kann man nicht alle Eigenschaften der Konvektionsströmungen berechnen, doch lassen sie sich zumindest qualitativ beschreiben.
32. In einer Flüssigkeitsschicht, die gleichmäßig von unten erwärmt wird, sollte der Temperaturgradient unabhängig davon sein, welche Stelle der Schicht man betrachtet, solange die Schichtdicke unverändert bleibt. Gleiches gilt für die Auftriebskräfte. Wenn die kritische RAYLEIGH-Zahl erreicht ist und das Gleichgewicht instabil wird, beginnt die warme Flüssigkeit aufzusteigen, und die kalte Flüssigkeit beginnt zu sinken. Beides kann nicht am gleichen Ort gleichzeitig geschehen, denn die Flüssigkeit kann sich nicht an derselben Stelle in zwei entgegengesetzten Richtungen bewegen. Vielmehr teilt sich die Flüssigkeitsschicht spontan in Konvektionszellen, die ein charakteristisches Muster bilden (Bild 1). In jeder Zelle zirkuliert die Flüssigkeit in einem geschlossenen Kreislauf.
33. Die Theorie gibt Hinweise auf die Größe der Konvektionszellen. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Tatsache, dass die Anfälligkeit des instabilen Gleichgewichtes einer Flüssigkeit gegen Störungen vom Ausmaß der Störung abhängt. In diesem Zusammenhang muss man die Amplitude der Störung (sie ist gleich der vertikalen Verschiebung einer Flüssigkeitsparzelle) von ihrem Ausmaß unterscheiden, das der Größe der Parzelle entspricht. Damit die RAYLEIGH-Theorie zu vernünftigen Resultaten führt, muss die Amplitude der Störung infinitesimal sein. Ihr Ausmaß dagegen darf so groß werden, wie es das Gefäß gestattet, das die Flüssigkeitsschicht enthält.
34. Es ist üblich, das Ausmaß einer Störung in Wellenzahlen auszudrücken, deren Dimension dem Kehrwert einer Länge entspricht. Je größer die Wellenzahl ist, um so kleiner ist das Ausmaß der Störung. Eine Störung ist im Allgemeinen so kompliziert, dass man sie nicht mit nur einer Wellenzahl beschreiben kann. Jede Störung lässt sich aber als Überlagerung einfacher Störungen auffassen, deren jede sich durch eine Wellenzahl charakterisieren lässt.
35. Eine Flüssigkeit, die sich im instabilen Gleichgewicht befindet, in der es also gerade noch keine Konvektionsströmung gibt, ist besonders anfällig gegen Störungen einer bestimmten Wellenzahl. Wir denken uns eine Flüssigkeit, deren RAYLEIGH-Zahl den kritischen Wert hat und in der nur Störungen der gleichen Wellenzahl auftreten. In dieser Flüssigkeit würde Konvektion einsetzen, sobald die Wellenzahl der Störungen in horizontaler Richtung etwa dem Doppelten der Dicke der Flüssigkeitsschicht entspricht. Man bezeichnet diese Wellenzahl als kritische Wellenzahl. Bei Wellenzahlen, die größer oder kleiner sind, tritt Konvektion nur dann auf, wenn die RAYLEIGH-Zahl den kritischen Wert überschreitet.
36. Die besondere Anfälligkeit der Flüssigkeit gegen Störungen mit der kritischen Wellenzahl bedeutet, dass diese Störungen schneller verstärkt werden als andere. Das beim Einsetzen der Konvektion entstehende Muster sollte daher etwa die gleiche Größenordnung haben, wie die bevorzugte Störung. Es bleibt über den Beginn der Konvektion hinaus erhalten, sofern die RAYLEIGH-Zahl der Flüssigkeitsschicht den kritischen Wert nur wenig überschreitet.
37. Die Wellenzahl bestimmt zwar die Größenordnung des Musters, nicht aber die Form der einzelnen Konvektionszellen. Für eine vorgegebene Wellenzahl kann man Zellen von unterschiedlichen Gestalten



konstruieren. Das beobachtete Muster hängt stark von der Größe und Gestalt des Gefäßes ab, in dem sich die Flüssigkeit befindet. Es lässt sich nicht aus theoretischen Prinzipien ableiten, aber es gibt empirische Regeln, die qualitative Voraussagen erlauben.

38. In Experimenten, bei denen die obere und die untere Grenzfläche der Flüssigkeit durch feste Platten gebildet werden, ist das Grundmuster eine „Walze“ (s. Bild 2). Warme Flüssigkeit steigt an einer Seite auf, überquert die obere Grenzfläche, verliert dabei ihre Wärme, sinkt auf der anderen Seite ab und wird von der Zirkulation längs der unteren Grenzfläche transportiert, sodass ihre Temperatur wieder steigt. In aneinander grenzenden Walzen haben die Kreisströme entgegengesetzten Drehsinn. Der Querschnitt jeder Walze ist nahezu quadratisch, und die Länge einer Quadratseite entspricht der Dicke der Flüssigkeitsschicht. Zwei Walzen bilden das Grundelement des Konvektionsmusters, das heißt, die Breite des Grundelementes entspricht der doppelten Dicke der Flüssigkeitsschicht. Das stimmt mit der Angabe überein, die wir über das Ausmaß der bevorzugten Störung in horizontaler Richtung gemacht haben.
39. Welches Bild das Muster ergibt, wenn man es von oben betrachtet, hängt von der Form des Gefäßes ab. Hat das Gefäß eine rechteckige Grundfläche, so neigen die Walzen dazu, sich parallel zur kürzeren Seite des Rechteckes auszurichten. In einem runden Gefäß bilden die Walzen konzentrische Ringe (s. Bild 2).

Die hexagonalen BÉNARDSCHEN Zellen

40. Wir haben erwähnt, dass Lord RAYLEIGH vor allem durch die Beobachtungen von BÉNARD zu seinen Arbeiten über die Konvektion angeregt worden ist. Allerdings befand sich die Flüssigkeitsschicht, die BÉNARD von unten erwärmte, nicht zwischen zwei waagerechten Platten, sondern grenzte oben an Luft. Dieser Unterschied hat zur Folge, dass Walzen nur vorübergehend erscheinen. Sie entstehen, wenn die Strömung beginnt, werden aber schon bald durch ein komplizierteres Muster verdrängt (s. Bild 1): durch ein Mosaik aus Vielecken, das die gesamte Flüssigkeitsoberfläche überzieht. Zu Beginn sind die Vielecke unregelmäßig und haben zwischen vier und sieben Seiten, doch sind die meisten von ihnen Sechsecke. Wenn das Muster vollständig entwickelt ist, besteht es in nahezu perfekter Weise aus regelmäßigen Sechsecken, die wie die Zellen einer Honigwabe angeordnet sind. Warme Flüssigkeit steigt in der Mitte jeder Zelle nach oben, verteilt sich über die sechseckige Oberfläche und sinkt am Rand der Zelle wieder ab (s. Bilder 3 und 4).
41. Die Bildung der sechseckigen Zellen ist eine Folge der Tatsache, dass die Oberfläche der Flüssigkeit an Luft grenzt und die Strömung daher dort von der Oberflächenspannung beeinflusst wird. Deren Wirkung ist stärker als die des Auftriebs. Daher überrascht es nicht, dass die RAYLEIGH-Theorie diese Art der Konvektion nicht erklären kann, denn sie setzt ja voraus, dass keine anderen Kräfte wirken als der Auftrieb. Sogar für eine so grundlegende Größe wie den Temperaturgradienten, der für das Einsetzen der Strömung nötig ist, liefert die RAYLEIGH-Theorie im Fall des BÉNARDSCHEN Experimentes eine falsche Voraussage. Erst 1958 entwickelte J. R. A. PEARSON eine Theorie, die auf die BÉNARDSCHE Konvektion anwendbar ist.
42. Die Oberflächenspannung bewirkt, dass die Oberfläche einer Flüssigkeit so klein wie möglich wird. Sie sorgt beispielsweise dafür, dass ein Flüssigkeitstropfen eine kugelförmige Gestalt annimmt, weil bei einem vorgegebenen Volumen die Kugel die kleinstmögliche Oberfläche hat. Die Oberflächenspannung wirkt gleichsam wie ein Netz elastischer Bänder, die in allen Richtungen über die freie Oberfläche einer Flüssigkeit gespannt sind. Sind die Kräfte an irgendeiner Stelle in diesem Netz nicht im Gleichgewicht, so wird sich die Flüssigkeit solange verformen, bis das Gleichgewicht erreicht worden ist. Dank der Viskosität erfassen die Strömungen von der Oberfläche ausgehend auch das Innere der Flüssigkeit.
43. Die Oberflächenspannung kann eine Konvektionsströmung antreiben, weil sich ihre Größe mit der Temperatur ändert: Wie die Dichte nimmt die Oberflächenspannung mit steigender Temperatur ab. Mit



einem Temperaturgradienten längs der Oberfläche der Flüssigkeit verbindet sich daher ein Gradient der Oberflächenspannung. Führt dieser zu einem Ungleichgewicht der Kräfte, die auf die Oberfläche wirken, so setzt eine Strömung ein.

44. In dem von BÉNARD unternommenen Experiment führen Instabilitäten in der Flüssigkeitsoberfläche zu Konvektionsströmungen, deren Einsetzen auf die gleiche Weise erklärt werden kann wie das Zustandekommen einer Strömung, die durch Auftriebskräfte hervorgerufen wird. Man nehme an, dass eine warme Flüssigkeitsparzelle durch eine zufällige Störung nach oben verschoben wird. Dort, wo sie die Flüssigkeitsoberfläche erreicht, wird sich die Temperatur ein wenig erhöhen, und die Oberflächenspannung wird entsprechend abnehmen. Dennoch bleiben die Kräfte an der Oberfläche im Gleichgewicht, weil die an das wärmere Gebiet grenzende Oberfläche gleichmäßig in alle Richtungen „zieht“. Um eine Strömung in Gang zu setzen, muss eine weitere Störung ein kleines Oberflächenstück aus dem wärmeren Bereich in horizontaler Richtung verschieben. Dann geraten die Kräfte, die auf dieses Oberflächenstück wirken, aus dem Gleichgewicht, und falls der Gradient der Oberflächenspannung groß genug ist, vergrößert sich die Verschiebung. Das Oberflächenstück gelangt dann in ein kälteres Gebiet mit größerer Oberflächenspannung und nimmt dabei die unter ihm befindliche Flüssigkeit mit (s. Bild 3). Daraufhin strömt mehr Flüssigkeit aus einer warmen, tiefer liegenden Schicht nach und vergrößert die Gradienten der Oberflächentemperatur und der Oberflächenspannung. Gleichzeitig beginnt der Teil der Flüssigkeit, der sich auf seinem Weg längs der Oberfläche abgekühlt hat, zu sinken. Es entsteht ein Kreislauf, der das Muster der BÉNARDSCHEN Zellen ergibt.
45. Wie bei der durch Auftrieb verursachten Konvektion garantiert die Existenz eines Temperaturgradienten in der Flüssigkeitsoberfläche noch nicht, dass die Konvektionsströmung erhalten bleibt. Der Gradient muss groß genug sein, um die von der Viskosität und der Wärmediffusion verursachten Kräfte zu überwinden. Auch hier lässt sich das Verhältnis der Kräfte durch eine dimensionslose Zahl ausdrücken, die nach dem italienischen Forscher C. G. M. MARANGONI benannt wird. Die Formel für die MARANGONI-Zahl entspricht der Formel für die RAYLEIGH-Zahl, doch werden die Auftriebskräfte durch die Kräfte ersetzt, die mit der Oberflächenspannung zusammenhängen. Konvektion setzt ein, wenn die MARANGONI-Zahl einen kritischen Wert übersteigt.
46. Eine Besonderheit der Konvektion, die durch einen Gradienten der Oberflächenspannung hervorgerufen wird, besteht darin, dass sich die Kontur der Oberfläche ändert. In Bereichen mit erhöhter Oberflächenspannung hat die Oberfläche die Tendenz, sich zusammenzuziehen. Infolgedessen wölbt sie sich in der Mitte einer BÉNARDSCHEN Zelle (also dort, wo Flüssigkeit nach oben steigt) nach unten, während sie am Zellenrand (an dem die Flüssigkeit absinkt) höher steht (s. Bild 4). Die Schwerkraft sorgt dafür, dass die Unterschiede nicht zu krass werden, denn die gravitationsbedingte potenzielle Energie ist bei einer ebenen Oberfläche am kleinsten. Das Zusammenspiel von Gravitation und Oberflächenspannung ist sehr komplex. 1964 formulierte D. H. NIELD eine Theorie, die Auftrieb und Oberflächenspannung berücksichtigt.
47. Die Bedeutung der Oberflächenspannung für die Entstehung der BÉNARDSCHEN Zellen wird deutlich, wenn man eine Flüssigkeitsschicht von oben statt von unten erwärmt. In diesem Fall verhindert der Dichtegradient eine vom Auftrieb verursachte Konvektionsströmung. Dennoch bilden sich BÉNARDSCHEN Zellen, das heißt, die Oberflächenspannung muss groß genug sein, um den Einfluss des Dichtegradienten zu überwinden. Auch bei Experimenten im Verlauf zweier Apollo-Raumflüge beobachtete man Konvektionsströmungen, deren Ursache Gradienten der Oberflächenspannung sein mussten, da Gravitation und Auftrieb in einer Weltraumkapsel vernachlässigbar klein sind.



Die Grenzen der RAYLEIGH-Theorie

48. Die RAYLEIGH-Theorie und andere nach ihrem Vorbild konstruierte Theorien geben näherungsweise an, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit Konvektion einsetzt, aber sie eignen sich kaum zur Beschreibung voll entwickelter Konvektionsströmungen. In der RAYLEIGH-Theorie wird die Geschwindigkeit der Strömung durch eine Exponentialfunktion beschrieben: Die Geschwindigkeit ist proportional zu $e^{\lambda t}$. Dabei ist e ($\approx 2,7$) die EULERSCHE Zahl, und der Exponent ist gleich dem Produkt aus der Zeit t und einem Koeffizienten λ , der von der RAYLEIGH-Zahl abhängt.
49. Liegt die RAYLEIGH-Zahl unter dem kritischen Wert, so ist λ negativ. Der Wert der Exponentialfunktion strebt in diesem Fall für große Zeiten t gegen Null, das heißt, jede zufällige Bewegung in der Flüssigkeit wird gedämpft. Hat die RAYLEIGH-Zahl genau den kritischen Wert, dann ist λ gleich Null, und der Exponent λt verschwindet für alle Zeiten t . Da jede Zahl mit Null potenziert den Wert Eins ergibt, bleibt die Strömungsgeschwindigkeit in diesem Fall konstant. Eine Störung wird also weder verstärkt und gedämpft.
50. Diese Vorhersagen stimmen mit dem überein, was man bei der Untersuchung der Stabilität von Flüssigkeitsschichten beobachtet: Ein negativer Wert von λ entspricht einem stabilen Zustand, und der Wert $\lambda = 0$ charakterisiert ein indifferentes Gleichgewicht. Wenn die RAYLEIGH-Zahl größer ist als der kritische Wert, wird λ positiv. Das ist die Bedingung, unter der eine Konvektionsströmung einsetzen und sich erhalten kann. In diesem Fall liefert die RAYLEIGH-Theorie unsinnige Voraussagen: Wenn λ größer als Null ist, nimmt der Exponent t kontinuierlich mit der Zeit zu, und der Ausdruck $e^{\lambda t}$ wächst exponentiell. Ist beispielsweise $\lambda = 1$ und beträgt die anfängliche Strömungsgeschwindigkeit einen Zentimeter pro Sekunde, so sollte sich die Konvektionsströmung nach einer Sekunde auf 2,7 Zentimeter pro Sekunde, nach einer weiteren Sekunde auf 7,4 Zentimeter pro Sekunde und in weniger als einer halben Minute auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt haben.
51. Wir haben hier den Zusammenhang zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und dem Koeffizienten λ insofern vereinfacht dargestellt, als λ im Allgemeinen eine komplexe Zahl ist, das heißt aus einem Realteil und einem Imaginärteil besteht. Der Realteil entspricht einer reellen Zahl und der Imaginärteil dem Produkt einer reellen Zahl mit der Quadratwurzel von -1 . Wir haben nur die Veränderungen des Realteils von λ betrachtet. Ist der Imaginärteil nicht gleich Null, so bedeutet das, dass oszillierende Strömungen auftreten können, eine Erscheinung, die man als Überstabilität bezeichnet und die man bei realen Flüssigkeiten beobachten kann. Im Rahmen der RAYLEIGH-Theorie verschwindet der Imaginärteil von λ jedoch, und man bleibt mit dem Problem des exponentiellen Wachstums der Strömungsgeschwindigkeit konfrontiert.
52. Natürlich kann die Zunahme der Geschwindigkeit der exponentiellen Kurve nicht sehr weit folgen. Die Vorhersagen der RAYLEIGH-Theorie sind daher nur dann wirklichkeitsnah, wenn die RAYLEIGH-Zahl nur wenig vom kritischen Wert abweicht und λ sehr klein ist, oder wenn die Konvektion gerade erst eingesetzt hat und t klein ist.
53. Diese Beschränkung hängt mit den vereinfachenden Annahmen zusammen, mit denen die Theorie abgeleitet wurde. Insbesondere wurde vorausgesetzt, dass der Temperaturgradient konstant ist und von der Konvektion nicht beeinflusst wird. Diese Annahme widerspricht den Tatsachen: Wenn warme Flüssigkeit in den kälteren oberen Teil der Schicht aufsteigt, verringert sich die Temperaturdifferenz zwischen den oberen und unteren Grenzflächen der Schicht. Entsprechend nehmen die Auftriebskräfte ab, sodass die Strömung sich selbst begrenzt. Diese Selbstbegrenzung geht aber nicht in die RAYLEIGH-Theorie ein: Der Temperaturgradient wird als unabhängig von der Geschwindigkeit der Konvektionsströmung betrachtet, und die Auftriebskräfte erzeugen eine konstante Beschleunigung, die unbegrenzt wirksam bleibt.



54. Angesichts dieses Mangels der Theorie mag es überraschen, dass sie das Einsetzen der Konvektion angemessen voraussagt. Das hängt mit der weiteren Annahme zusammen, dass sich eine Flüssigkeitsparzelle nur um infinitesimal kleine Strecken verschiebt. Sofern diese Bedingung erfüllt ist, lässt sich die Annahme eines gleich bleibenden Temperaturgradienten durchaus begründen: Eine endliche, aber kleine Verschiebung einer Flüssigkeitsparzelle kann nur eine kleine Störung der Temperaturverteilung verursachen, sodass die Vorhersagen der RAYLEIGH-Theorie näherungsweise gültig sind. Im Fall einer vollständig entwickelten Konvektionsströmung sind die Änderungen des Temperaturgradienten dagegen nicht mehr vernachlässigbar.
55. Eine bessere Theorie der Konvektion muss die Rückkopplung berücksichtigen, die zwischen der Konvektionsströmung und den Kräften besteht, die die Strömung antreiben. Keine der bekannten Methoden löst dieses Problem exakt, aber es gibt Näherungen, die passendere Resultate liefern als die RAYLEIGH-Theorie. Die Methode, die wir hier beschreiben wollen, basiert auf einer Theorie, die der russische Physiker L. B. LANDAU 1937 einführte, um Phasenübergänge, beispielsweise den Beginn der Magnetisierung bei ferromagnetischem Eisen, zu beschreiben. Gemeinsam mit V. L. GINZBURG wendete er seine Theorie später auch auf die Supraleitfähigkeit von Metallen an, das heißt auf die Erscheinung, dass viele Metalle bei Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunktes ihren elektrischen Widerstand verlieren und den elektrischen Strom nahezu verlustfrei leiten. Diese Vorgänge haben Ähnlichkeit mit der Konvektion insofern, als strukturelle Störungen verschiedener Größenordnungen zusammenwirken. Überträgt man die Landausche Theorie auf die Konvektion, so erhält man als erste Näherung die RAYLEIGH-Theorie.

Die Potenzialfläche

56. Um die Konvektionsströmung beschreiben zu können, braucht man eine Bewegungsgleichung, mit der sich die Geschwindigkeit und die Beschleunigung einer Flüssigkeitsparzelle für beliebig gewählte äußere Bedingungen berechnen lassen. Eine solche Gleichung gibt das Gefälle an, das eine Potenzialfläche an beliebigen Punkten aufweist.
57. Man kann sich eine Potenzialfläche als eine hügelige Landschaft vorstellen, in der die Höhe der Berge und die Tiefe der Täler ein Maß für die Energie einer Flüssigkeitsschicht sind (Bilder 9 und 10). Die Neigung dieses Systems, jeweils in den Zustand der kleinstmöglichen Energie überzugehen, bedeutet, dass eine Kugel, deren Position auf der Potenzialfläche den Zustand des Systems repräsentiert, bergab rollt, wann immer dies möglich ist. Man legt eine Bezugsebene fest, um für jeden Punkt der Potenzialfläche eine absolute Höhe angeben zu können. In dieser Ebene verläuft die Linie, längs derer die Strömungsgeschwindigkeit V in der Flüssigkeitsschicht Null ist. Punkte, die rechts oder links von dieser Linie liegen, entsprechen Zuständen der Flüssigkeit, in denen Flüssigkeitsparzellen aufsteigen (positive Geschwindigkeiten V) beziehungsweise absinken (negative Geschwindigkeiten). Ist die Strömungsgeschwindigkeit in der Flüssigkeit Null, so unterscheiden sich die Zustände der Flüssigkeit nur durch ihre RAYLEIGH-Zahlen. Diese Differenz (ΔR) und die Geschwindigkeit V der Flüssigkeitsparzellen legen gemeinsam jeden Punkt auf der Bezugsebene fest. Die Höhe der Potenzialfläche über oder unter diesem Punkt entspricht der Energie des Systems im zugehörigen Zustand.
58. Die Form der Potenzialoberfläche ist durch eine Gleichung festgelegt, die als Summe einer unendlichen Reihe von Termen geschrieben werden kann. Jeder Term ist proportional zu einer Potenz der Geschwindigkeit V , mit der die Flüssigkeit strömt. Der erste Term ist quadratisch: $-1/2 \Delta R V^2$. Im nächsten Term steht die dritte Potenz der Geschwindigkeit, also V^3 , im dritten erscheint V^4 und so weiter. Jede dieser Potenzen wird mit einem Koeffizienten multipliziert, der angibt, wie stark der Term zur Form der Fläche beiträgt. Diese Koeffizienten lassen sich nicht für alle Terme der unendlichen Reihe bestimmen. Es ist



jedoch zu erwarten, dass sie in dem Maße kleiner werden, in dem die Potenzen der Geschwindigkeit wachsen, sodass man für die Summe eine gute Näherung erhält, wenn man die Reihe an einer geeigneten Stelle abbricht, das heißt, wenn man alle Terme jenseits einer bestimmten Potenz von V vernachlässigt. Falls die Geschwindigkeit V nicht zu groß ist, sollte der Beitrag der Terme mit höheren Potenzen von V sehr klein sein. Insbesondere, wenn V kleiner als Eins ist, streben die höheren Potenzen von V gegen Null, und die Näherung ist gut.

59. Man erhält die Näherung der RAYLEIGH-Theorie, wenn man die Reihe bereits nach dem ersten Term ($-1/2 \Delta R V^2$) abbricht. Die Potenzialfläche, die sich so ergibt, besitzt ein „Tal“ und einen „Hügel“, die beide einen parabolischen Querschnitt haben. Aus der Gleichung lässt sich ablesen, dass mit verschwindender Geschwindigkeit ($V = 0$) auch die Energie (die Höhe der Punkte auf der Potenzialfläche) Null wird. Falls die RAYLEIGH-Zahl kleiner ist als ihr kritischer Wert, wird die Differenz ΔR negativ, und die Energie wächst, wann immer die Geschwindigkeit größer als Null ist. Mit anderen Worten: Für negative ΔR -Werte entspricht der bewegungslose Zustand dem Minimum auf der Potenzialfläche und ist der Zustand des stabilen Gleichgewichtes. Übersteigt die RAYLEIGH-Zahl den kritischen Wert, sodass ΔR positiv wird, so entspricht die Achse der Bewegungslosigkeit dem Zustand maximaler Energie, das heißt, einem instabilen Gleichgewicht.
60. Diese Eigenschaften der Potenzialfläche zeigen die Stärken und die Schwächen der RAYLEIGH-Theorie. In der unmittelbaren Nachbarschaft des Nullpunktes, wo ΔR und V klein sind, lässt sich das Verhalten einer Flüssigkeit aus der Krümmung der Potenzialfläche zuverlässig ableiten. Hat ΔR einen kleinen negativen Wert, so kehrt die Flüssigkeit nach einer geringfügigen Störung in den Gleichgewichtszustand zurück. Ist ΔR dagegen eine positive Zahl, so wird jede Störung verstärkt, und es setzt Konvektion ein. Wenn die RAYLEIGH-Zahl gerade den kritischen Wert hat, wenn also $\Delta R = 0$ ist, befindet man sich an einer ebenen Stelle der Potenzialfläche, und eine Störung wird weder gedämpft noch verstärkt. Bei großen Werten von ΔR und V begegnet uns erneut das Problem der unendlichen Strömungsgeschwindigkeiten.
61. In der Landau-Theorie beseitigt man diesen Mangel, indem man weitere Terme der unendlichen Reihe berücksichtigt. Man geht auf das Gedankenexperiment mit einer Flüssigkeitsschicht zwischen zwei Platten zurück, auf dem die RAYLEIGH-Theorie beruht, und überlegt, dass sich am Ergebnis dieses Experimentes nichts ändern würde, falls man die Schicht nicht von unten erwärmt, sondern von oben kühlt. Auch wenn alle Bewegungen ihre Richtung umkehren, bliebe das Resultat das Gleiche. Das bedeutet, dass die Potenzialfläche dieses Systems symmetrisch zur ΔR - Achse sein muss. Dann aber darf die Gleichung der Potenzialfläche nur geradzahlig Potenzen von V enthalten (V^2 , V^4 und so weiter), denn nur wenn der Exponent geradzahlig ist, haben gleiche Potenzen von V und $-V$ den gleichen Wert. Gleiche Potenzen von V und $-V$ mit ungeradzahlig Exponenten haben entgegengesetzte Vorzeichen und würden die Symmetrie zerstören. Die Koeffizienten der ungeradzahlig Potenzen (V^3 , V^5 und so weiter) müssen daher den Wert Null haben.
- (...)
62. Sofern die RAYLEIGH-Zahlen und die Strömungsgeschwindigkeiten nicht zu groß werden, ergibt diese vergleichsweise einfache Version der LANDAU-Theorie realistische Voraussagen. Wie zuvor wird jede zufällige Fluktuation der Geschwindigkeit gedämpft, wenn die RAYLEIGH-Zahl kleiner ist als der kritische Wert. Das System befindet sich dann im Zustand minimaler Energie, also im stabilen Gleichgewicht. Bei Werten oberhalb der kritischen RAYLEIGH-Zahl wächst eine Störung rasch an, aber dieses Wachstum setzt sich nicht unbegrenzt fort: Wenn die Strömung die Geschwindigkeit erreicht, die dem Minimum in der Potenzialfläche entspricht, entsteht ein stabiles Gleichgewicht.



63. Die LANDAU-Theorie, die neben dem V^2 -Term auch den V^4 -Term berücksichtigt, vermeidet zwar die krassen Fehler der RAYLEIGH-Theorie, aber auch sie ist nur eine Näherung und gilt nur dann, wenn der Betrag der Geschwindigkeit nicht zu groß ist. Andernfalls tragen auch die Terme mit höheren Potenzen von V nennenswert zur Energie bei, und zwar selbst dann, wenn sie kleine Koeffizienten haben. Daher kann eine Theorie, in der alle hohen Potenzen von V vernachlässigt werden, die Form der Potenzialfläche für große Geschwindigkeiten nicht genau wiedergeben. Hinzu kommt, dass in vielen Fällen Konvektionsströmungen mit einer bestimmten Richtung bevorzugt auftreten, sodass die Symmetrie der Potenzialfläche verloren geht und auch die ungeradzahigen Potenzen von V berücksichtigt werden müssen.

Konvektion in der Erdatmosphäre, im Ozean und in trocknenden Lackfilmen

64. Die RAYLEIGH-Theorie und die LANDAU-Theorie beruhen auf Gedankenexperimenten, bei denen man voraussetzt, dass möglichst viele Eigenschaften der betrachteten Flüssigkeit konstant bleiben. In Wirklichkeit sind Flüssigkeiten selten so einfach, und das Wechselspiel ihrer Eigenschaften kann sehr verwickelt sein. Beispielsweise haben wir bisher angenommen, dass sich nur die Dichte als Funktion der Temperatur ändert. In Wirklichkeit hängen bei den meisten Flüssigkeiten auch die Viskosität und die Wärmediffusion von der Temperatur ab. Da diese Größen in die RAYLEIGH-Zahl eingehen, können sie einen entscheidenden Einfluss darauf haben, wann Konvektion einsetzt und wie sie sich entwickelt. Wir haben außerdem angenommen, dass die betrachtete Flüssigkeit inkompressibel sei. Für viele reale Flüssigkeiten gilt das jedoch nicht. Hier beeinflusst der Druck die Dichte und viele andere Eigenschaften.
65. Eine Theorie, die alle diese Zusammenhänge berücksichtigen würde, wäre nicht mehr praktikabel. Man muss also einen Kompromiss zwischen der Komplexität der Flüssigkeit und der Komplexität der Theorie suchen. Das gilt besonders bei der Analyse von Konvektionsvorgängen in der Natur.
66. In der Erdatmosphäre beobachtet man Konvektionsströmungen verschiedener Größenordnungen. Das Temperaturgefälle zwischen den Tropen und den Polen treibt eine globale Luftzirkulation an, die auf jeder Erdhalbkugel aus wenigstens drei Konvektionszellen besteht. Verzerrungen dieses Musters durch die Erdrotation verursachen die Passatwinde in den Tropen und das Vorherrschen westlicher Winde in den gemäßigten Zonen.
67. Wenn sich die Luft über der Erdoberfläche lokal erwärmt, entstehen Konvektionsströme kleineren Ausmaßes. Viele Stürme sind Beispiel dafür. Wenn warme Luft aufsteigt und sich dabei abkühlt, bis sie an Feuchtigkeit übersättigt ist, bilden sich Cumuluswolken.
68. Bei der Untersuchung der Konvektion in der Atmosphäre muss man die große Kompressibilität der Luft berücksichtigen, die selbst dann einen Dichtegradienten zur Folge hätte, wenn sich die Temperatur mit der Höhe nicht ändern würde. Außerdem erwärmt sich die Luft bei der Kompression, wenn sie in ein Gebiet mit höherem Druck absinkt. Auch ihre Viskosität ändert sich bei Druck- und Temperaturschwankungen. Und schließlich macht der Wasserdampf, der Wärme abgibt, wenn er zu Wasser kondensiert, die Dinge kompliziert.
69. Wolken, die durch Konvektion entstehen, können ihrerseits Konvektionsströmungen aufweisen. Eine Wolke kühlt sich oben ab, weil sie Wärme abgibt, während sie unten die vom Erdboden abgestrahlte Wärme absorbiert. Wird der Temperaturunterschied groß genug, so können in der Wolke Konvektionsströmungen einsetzen.
70. Oft bilden sich durch Konvektion in der Erdatmosphäre auch die gleichen Muster, die man bei einfachen Experimenten im Laboratorium beobachtet. Streifenförmige Wolkenformationen (Wolkenstraßen) entsprechen Konvektionszellen vom „Walzentyp“. Auf Satellitenaufnahmen erkennt man gelegentlich



Wolkenformationen, die über Tausende von Quadratkilometern ein Muster aus vieleckigen Zellen bilden. Allerdings lassen sich die Ergebnisse von Experimenten im Laboratorium nicht einfach auf die Konvektion in der Atmosphäre übertragen. Im Experiment sind die Konvektionszellen immer ebenso breit wie hoch, während Konvektionszellen in der Atmosphäre bis zu fünfzigmal breiter als hoch sein können. Außerdem hat die Strömung in den verhältnismäßig kleinen Zellen, die man im Laboratorium erzeugt, immer den gleichen Drehsinn: Gase strömen in der Mitte der Zelle nach unten. In der Atmosphäre kann das Gas dagegen in der Mitte einer Konvektionszelle nach oben oder nach unten strömen.

71. Auch die Konvektionsströmungen in den Ozeanen können Größen zwischen einem Meter und dem Durchmesser eines ozeanischen Beckens haben. Die einfachsten Strömungen entstehen, indem das Sonnenlicht das Meerwasser bis in beträchtliche Tiefen erwärmt. Andererseits kühlt sich die Meeresoberfläche ab, weil Wasser verdunstet und Wärme an die Atmosphäre abgegeben wird. Das entstehende Temperaturgefälle kann eine Konvektionsströmung hervorrufen.
72. Die Kompressibilität von Seewasser ist klein und beeinflusst eine Konvektionsbewegung nur in sehr tief liegenden Schichten. Dagegen hat der Salzgehalt des Meerwassers einen beträchtlichen Einfluss, weil die Dichte des Wassers mit zunehmender Salzkonzentration steigt. Da sie auch von der Temperatur abhängt, hat man es hier mit neuartigen Verhältnissen zu tun: Ist die Temperatur im unteren Teil einer Meerwasserschicht größer und der Salzgehalt kleiner als im oberen Teil, so wirken die beiden Dichtegradienten in die gleiche Richtung und begünstigen die Konvektion. Sind die Gradienten einander entgegengerichtet, so kommen andere Einflüsse ins Spiel: Liegt warmes, salzhaltiges Wasser über kaltem Süßwasser, so wird die Stabilität dieser Schichtung vom Temperaturgefälle begünstigt und vom Gradienten der Salzkonzentration beeinträchtigt. Selbst wenn beide Gradienten zusammen überall in der Schicht eine einheitliche Dichte des Wassers erzeugen, kann Konvektion einsetzen, weil sich die Gradienten auf verschiedene Weise ausgleichen: Der Temperaturgradient verschwindet vor allem durch Wärmediffusion, während der Gradient der Salzkonzentration im Wesentlichen durch die Diffusion der Wassermoleküle und der Salz-Ionen ausgeglichen wird. Die Wärmediffusion zerstört das Temperaturgefälle wesentlich schneller (bisweilen hundertmal schneller) als die molekulare Diffusion den Konzentrationsgradienten.
73. Sinkt in einer Wasserschicht, in der Temperatur- und Konzentrationsgradienten überall zur gleichen Dichte führen, eine warme, salzreiche Flüssigkeitsparzelle in eine tiefer liegende Schicht aus kaltem Süßwasser, so verliert sie ihre Wärme, lange bevor sich durch molekulare Diffusion die Salzkonzentration verringert. Das hat zur Folge, dass sich die Flüssigkeit in der sinkenden Parzelle verdichtet und die Bewegung verstärkt wird.
74. Liegt eine kalte Süßwasserschicht über einer Schicht aus warmem, salzreichem Wasser, so kann eine Überstabilität auftreten, die sich in einer Schwingungsbewegung äußert. Eine Flüssigkeitsparzelle mit warmem, salzigem Wasser, die langsam aufsteigt, kühlt aus, behält aber ihre anfängliche Salzkonzentration. Sie wird dichter, als sie es ursprünglich war, sinkt daher wieder ab und bewegt sich dabei ein Stück über ihren ursprünglichen Ort hinaus, bis sie nach erneuter Erwärmung wieder aufsteigt und so um ihre Ausgangsposition schwingt. Diese Oszillation kann verstärkt oder gedämpft werden, je nachdem, wie groß die beiden Gradienten sind.
75. Besonders kompliziert sind die Konvektionsbewegungen, die zur Bildung von Riffketten auf dem Meeresboden führen und die Kontinente auseinander schieben. Die Wärme, die diese Strömungen antreibt, bildet sich im Erdmantel vor allem durch den Zerfall radioaktiver Elemente. Da die Wärme nur nach oben abgegeben werden kann, entsteht ein Temperaturgefälle, das ohne Zweifel groß genug ist, um Konvektion zu verursachen. Über die Gestalt und die Größe der Konvektionsmuster weiß man allerdings nur wenig, denn der Erdmantel ist für Messungen so gut wie unzugänglich.



76. Von wesentlich kleinerer Größenordnung ist die Konvektion, die beim Trocknen einer dünnen Lackschicht auftritt. Die treibende Kraft ist hier wie beim BÉNARDSCHEN Experiment die Oberflächenspannung (s. Bild 3): Die Strömung kommt zustande, weil das Lösungsmittel auf der freien Oberfläche des Lackfilms verdunstet und dabei Wärme abführt. Geht die Verdunstung an einer Stelle besonders schnell vor sich, so kühlt sich die Oberfläche dort stärker ab als in der Umgebung und die Oberflächenspannung ist entsprechend größer. Außerdem hat der Farbstoff in einem Lack gewöhnlich eine größere Oberflächenspannung als das Lösungsmittel, sodass die Oberflächenspannung beim Verdunsten des Lösungsmittels in jedem Fall zunimmt. Da sich die Konzentration des Lösungsmittels ständig verringert, steigt die Viskosität der Lackschicht, sodass die MARANGONI-Zahl schließlich unter den kritischen Wert fällt und die Konvektion aufhört.
77. Konvektionszellen in Lackfilmen haben oft die Gestalt eines nahezu regelmäßigen Sechsecks. Die Strömung kann ein „Fließen“ des Farbstoffs verursachen, das im getrockneten Film als Unregelmäßigkeit in der Färbung erscheint. Manchmal bleibt das Muster der Konvektionszellen im trockenen Film gleichsam eingefroren. Auf diese Weise entsteht das bekannte Hammerschlagmuster einer Farbschicht.

VELARDE, M.G. und NORMAND, C. (1980): Konvektion. In: Spektrum der Wissenschaft 9/1980, S. 118 - 131, mit freundlicher Genehmigung von Spektrum der Wissenschaft 2004.

Bilder¹

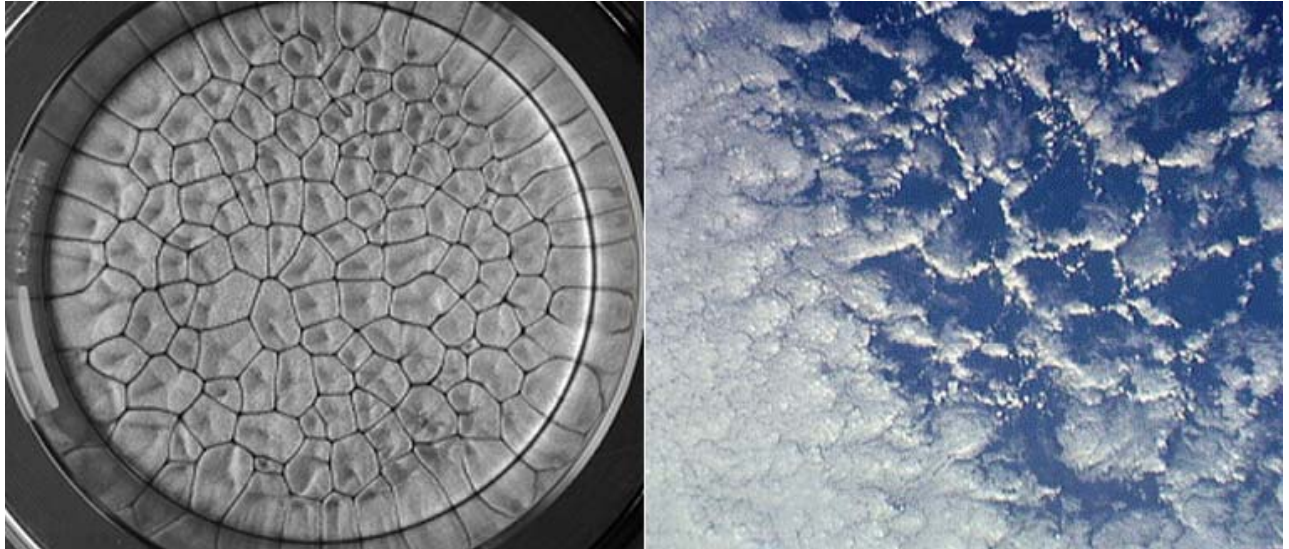


Bild 1: Konvektionszellen entstehen, wenn eine dünne Flüssigkeitsschicht gleichmäßig von unten erwärmt wird. Im Verlauf einiger Minuten weichen die "Walzen" einem Muster aus überwiegend sechseckigen Zellen, die schließlich die gesamte Schicht erfüllen. In diesen Zellen steigt die Flüssigkeit in der Mitte auf, kühlt dabei ab und sinkt am Rand wieder nach unten. Die Strömung wird von Unterschieden in der Oberflächenspannung der Flüssigkeit angetrieben. Die meisten Flüssigkeiten entwickeln ein derartiges Zellenmuster nur dann, wenn sie mit ihrer Oberfläche an Luft grenzen. Die Fotografien zeigen eine Schicht von Siliconöl, der Aluminiumspäne zugesetzt worden waren, um das Muster sichtbar zu machen, und eine Wolkenformation. (Bilder: IPN-Projekt zur didaktischen Rekonstruktion nichtlinearer Physik (links), NASA Spaceshuttle Endeavor 1992 (rechts))

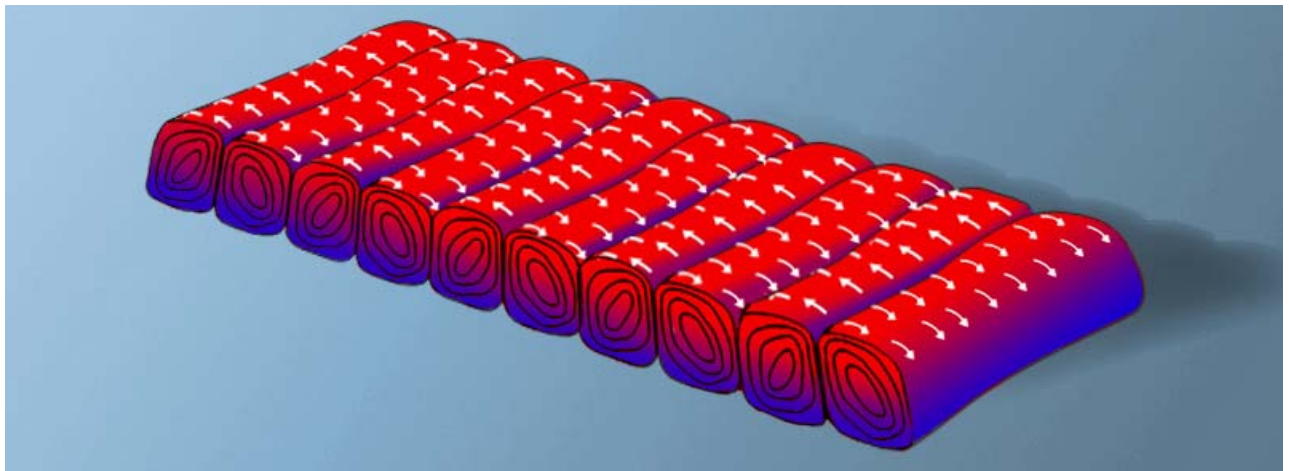


Bild 2: Walzenförmige Zellen entstehen, wenn die Konvektion durch Auftriebskräfte angetrieben wird. Die Einheit dieses Musters besteht aus zwei Walzen, in denen die Flüssigkeit in entgegengesetzten Richtungen zirkuliert. Die Breite zweier Walzen entspricht der doppelten Höhe der Flüssigkeitsschicht. Das Muster, das die Walzen bilden, hängt von der Form des Behälters ab. In einem rechteckigen Behälter orientieren sich die Walzen wie abgebildet parallel zur kürzeren Rechteckseite und in einem runden Behälter bilden sie konzentrische Ringe. Die Walzen bleiben gewöhnlich nur dann erhalten, wenn zwei waagerechte, ebene Platten die Flüssigkeitsschicht nach oben und unten begrenzen. Ist die Flüssigkeitsschicht nach oben offen, so gehen die Walzen in BÉNARDSCHE Zellen über (siehe Bild 1).

¹ Die Abbildungen und Abbildungsunterschriften wurden verändert.

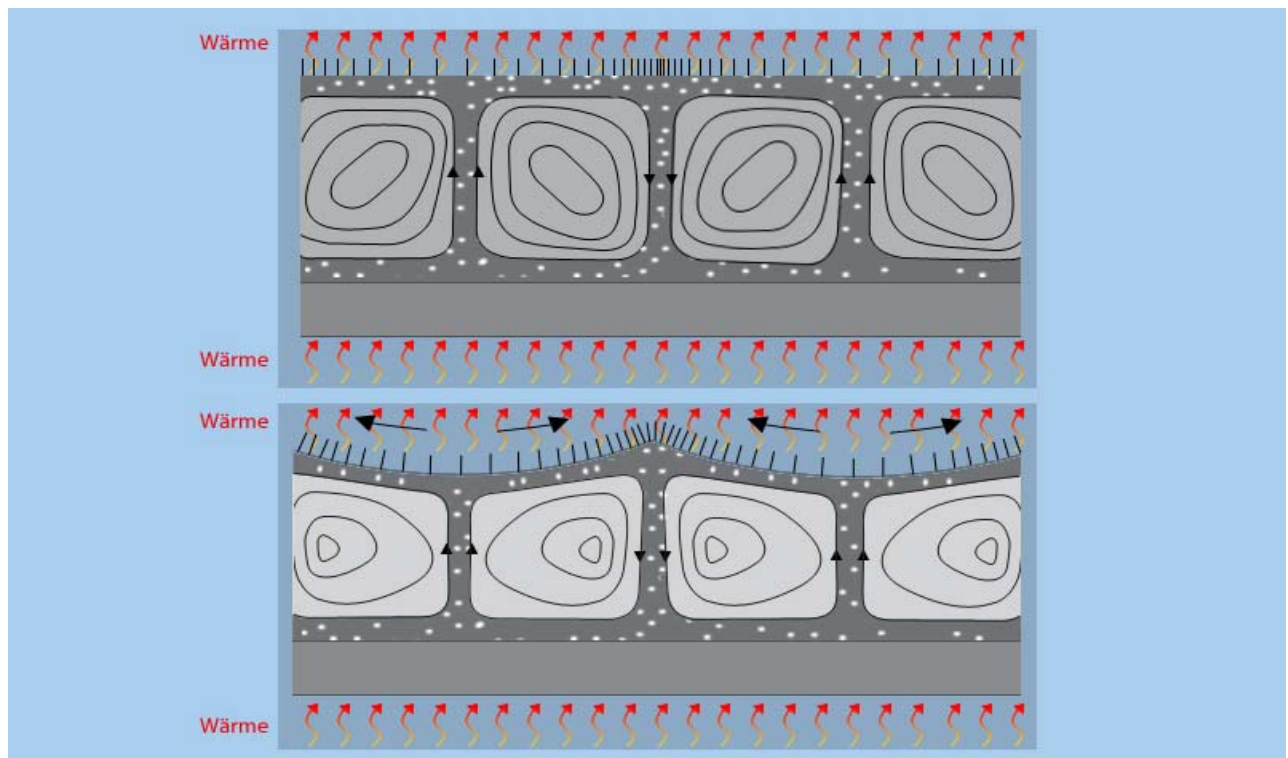


Bild 3: Die Oberflächenspannung beeinflusst das Konvektionsmuster, das in einer Flüssigkeitsschicht mit einer an Luft grenzenden Oberfläche entsteht. Die Oberflächenspannung ist um so größer, je kälter die Flüssigkeit ist. Temperaturunterschiede an der Oberfläche verursachen daher einen Gradienten der Oberflächenspannung (Dichte der kurzen schwarzen Striche): In Bereichen, in denen warme Flüssigkeit aufsteigt, ist die Oberflächenspannung klein, und sie ist dort am größten, wo die kalte Flüssigkeit absinkt. Die Flüssigkeitsschicht wird instabil, wenn der Gradienten der Oberflächenspannung ausreicht, um die Kräfte zu überwinden, die von Viskosität und Wärmediffusion hervorgerufen werden. Eine zufällige Schwankung der Oberflächenspannung hat dann zur Folge, dass die aufsteigende warme Flüssigkeit in Bereiche mit größerer Oberflächenspannung „gezogen“ wird, sodass sich die Oberfläche der Flüssigkeit eindellt (unteres Teilbild).

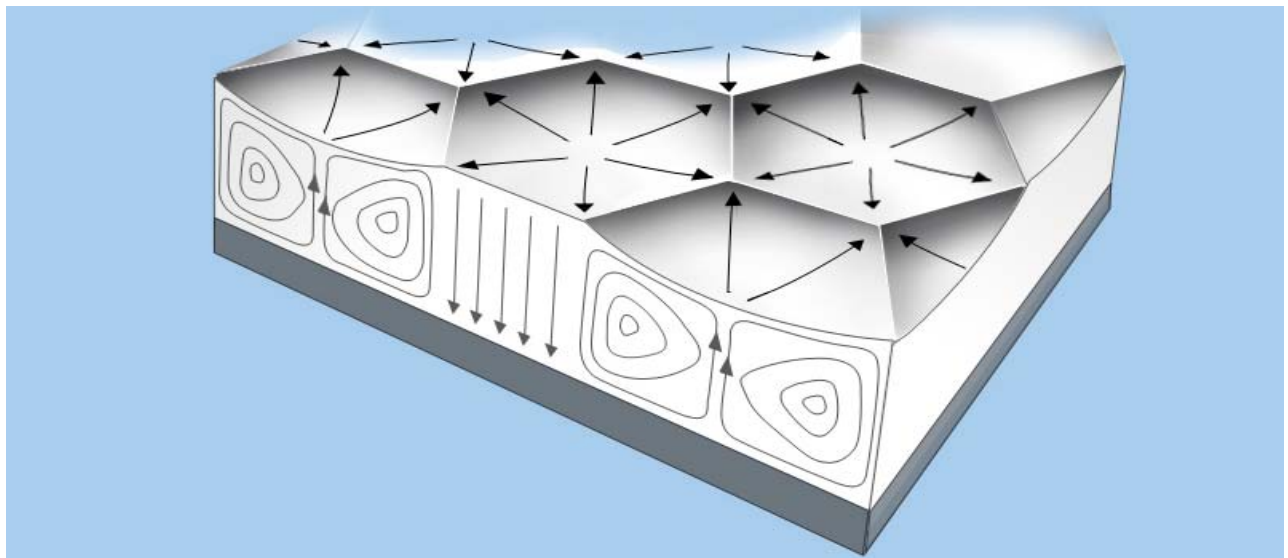


Bild 4: Das Muster der sechseckigen BÉNARDSCHEN Zellen (siehe Bild 1) ist charakteristisch für eine Flüssigkeitsschicht, in der eine Konvektionsströmung durch die Oberflächenspannung angetrieben wird. In Bereichen mit großer Oberflächenspannung wölbt sich die Oberfläche der Flüssigkeit auf, während sie sich im Zentrum einer jeden Zelle eindet.



Baustein 2: Physikalische Grundlagen der Konvektion

Physikalisches Modell der Konvektion

❶ Materialien:

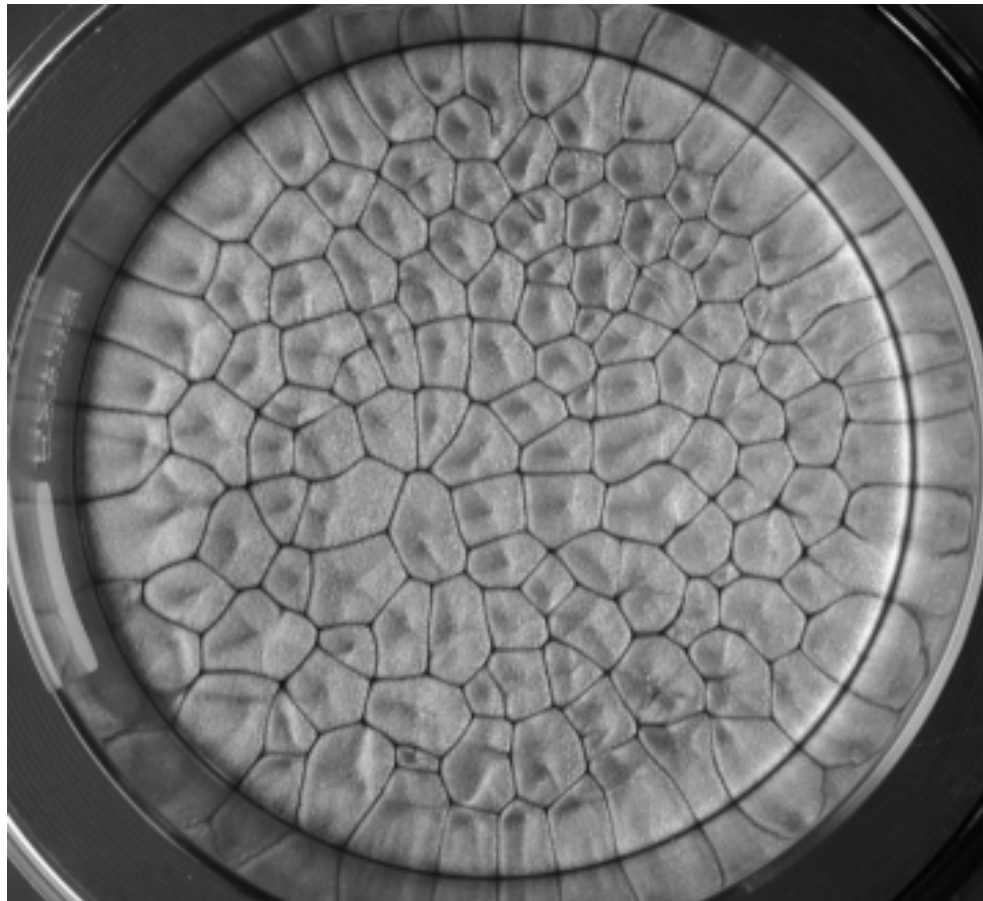
- Artikel „Konvektion“ von M. G. VELARDE und C. NORMAND (Modul 7, Baustein 2, Material 3)

❷ Aufgaben:

Arbeiten Sie den Ausschnitt Konvektion von M. G. VELARDE und C. NORMAND aus der Zeitschrift Spektrum der Wissenschaft (9/1980) durch und beantworten Sie die folgenden Fragen!

- 1) Welche vereinfachenden/idealisierenden Annahmen machte RAYLEIGH bei seinem Gedankenexperiment?
- 2) Welche die Konvektion beeinflussenden Parameter werden berücksichtigt? Unterscheiden Sie in fördernde und behindernde Parameter.
- 3) Wie wird versucht, das Erkannte in einen möglichst einfach strukturierten mathematischen Ausdruck zu übersetzen, um später mit konkret vorliegenden Materialwerten ausrechnen zu können, ob Konvektion eintritt oder nicht?
- 4) Welche Gültigkeitsgrenze der Theorie wird angesprochen?

RAYLEIGH-BÉNARD-Experiment



(Bild: IPN-Projekt zur didaktischen Rekonstruktion nichtlinearer Physik)

BÉNARD-ZELLEN in einer Wolkenformation



(Bild: NASA, Space-Shuttle Endeavor, Mai 1992 - Dez. 1993)

Hexagonale Basaltsäulen auf der Insel Cheju in Südkorea



(Bilder: P. TASKINEN, IPN)

Wirbelstraßen in der Atmosphäre des Jupiters



(Bild: NASA, Voyager I Mission)

Baustein 3: Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation

Ein Exkurs in die Wärmelehre

❶ Über Energie und Entropie:

Seit dem 19. Jahrhundert ist bekannt, dass die Energie eine Erhaltungsgröße ist. Am eigenen Leib können Sie dies erfahren, wenn Sie zum Beispiel mit dem Fahrrad einen Berg hinunterrollen und dabei Höhenlageenergie in Bewegungsenergie umsetzen. Zuvor, als Sie den Berg hinauffahren, hatten Sie Bewegungsenergie in Höhenlageenergie umgewandelt. Wenn Sie beim Bergabfahren die Bremsen benutzen, werden die Bremsklötze heiß. Die Bewegungsenergie hat sich in Wärme umgewandelt. Die Energie bleibt also erhalten, dies ist die Aussage des **1. Hauptsatzes** der Wärmelehre.

Dennoch sind die beiden geschilderten Fälle unterschiedlich. Im ersten Fall wird die Höhenlageenergie in Bewegungsenergie und schließlich wieder in Lageenergie umgewandelt. Die Umwandlung von Höhenlageenergie in Bewegungsenergie ist also umkehrbar (**reversibel**). Auf der anderen Seite gewinnt ein Fahrrad nicht dadurch an Fahrt, dass man die Bremsbacken mit einem Feuerzeug erwärmt und dann die Bremse betätigt. Die Umwandlung von Bewegungsenergie in Wärme ist also nicht ohne weiteres umkehrbar (**irreversibel**). Obwohl die Energie also erhalten geblieben ist, wurde sie doch in eine weniger „edle“ Form umgewandelt, die sich nicht unmittelbar in eine „edlere“ Form umsetzen lässt.

Was ist nun „edel“? Wärme verbindet man mit einer sehr ungeordneten Form der Bewegung der Moleküle bzw. Atome, aus denen ein Stoff besteht, man denke an die BROWNSCHE Molekularbewegung. Bewegungsenergie ist hingegen eine geordnete Form der Bewegung, denn alle Moleküle des betreffenden Körpers bewegen sich in dieselbe Richtung. Beim Bremsvorgang nimmt also die Unordnung zu.

Ein weiteres Beispiel für einen irreversiblen Prozess ist das folgende Gedankenexperiment. In einem Kästchen befindet sich genau in der Mitte eine Trennwand. In der linken Kammer befindet sich eine Anzahl von Gasmolekülen, in der rechten Kammer hingegen keine. Zieht man jetzt die Trennwand heraus, so werden sich die Gasmoleküle im ganzen Kästchen gleichmäßig verteilen.



Abbildung 1: Gasmoleküle in einem Kästchen vor dem Entfernen der Trennwand (links) und danach (rechts).

Den umgekehrten Prozess, bei dem sich sämtliche Moleküle in die linke Kammer zurückziehen, sodass man sie mit der Trennwand wieder einsperren kann, wird man hingegen nie beobachten. Der Zustand, bei dem sich die Teilchen im ganzen Kästchen frei bewegen, ist von geringerer Ordnung als derjenige, bei dem sie in der linken Kammer lokalisiert sind. Die Unordnung hat sich also beim Entfernen der Trennwand vergrößert. Dahinter verbirgt sich ein allgemeines Prinzip:

Laufen in einem **abgeschlossenen System**, in einem System also, welches keine Energie oder Materie mit seiner Außenwelt austauscht, Prozesse ab, so bleibt die Unordnung im System entweder gleich (bei reversiblen Prozessen), oder sie nimmt zu (bei irreversiblen Prozessen). Eine Abnahme von Unordnung



ohne äußeren Einfluss wird hingegen nie beobachtet. Dies ist die Aussage des **2. Hauptsatzes** der Wärmelehre.

Der Begriff der Unordnung kommt aus der Umgangssprache. Er wird in der Physik präziser gefasst. Das in der Wärmelehre eingeführte Maß für Unordnung heißt **Entropie**. Eine Vergrößerung der Entropie bedeutet einen Zuwachs an Unordnung.

In einem **offenen System**, welches mit seiner Umgebung sowohl Energie als auch Materie austauschen kann, gilt der 2. Hauptsatz nicht. Das heißt, die Entropie kann darin sehr wohl abnehmen (Zunahme der Ordnung), allerdings nur auf Kosten einer Entropiezunahme (Zunahme der Unordnung) in der Umgebung, denn man muss das vereinte System aus dem betrachteten offenen System und dessen Umgebung wieder als abgeschlossenes System ansehen, in dem die Entropie nur anwachsen kann.

Ein offenes System ist zum Beispiel ein Topf, in dem Wasser zum Kochen gebracht wird. Dem Topf wird von außen Wärme hinzugeführt und er gibt seinerseits Wärme und Dampf (Materie) nach außen ab.

Bei der Klassifikation von „edler“ und „unedler“ Energie müssen wir uns nicht auf den Vergleich von mechanischer Energie und Wärmeenergie beschränken. Auch Wärmeenergie kann je nach Temperatur „edel“ oder „unedel“ sein. So hat 1 l Wasser bei 100 °C etwa die gleiche Wärmemenge als innere Energie gespeichert wie 2 l Wasser bei 50 °C. Dennoch kann man heißes Wasser, etwa Dampf, dazu benutzen, um beispielsweise mit einer Turbine wieder mechanische Energie zu gewinnen. Mit kaltem Wasser ist das schon schwieriger. Mit anderen Worten: Ein offenes System, welches bei hoher Temperatur „edle“ Wärme aufnimmt und bei niedriger Temperatur „unedle Wärme“ abgibt, exportiert damit mehr Entropie als es importiert.

Wenn es also prinzipiell möglich ist, in einem offenen System die Ordnung zu vergrößern, können dann in einem solchen System geordnete Strukturen entstehen? Eine positive Antwort auf diese Frage gibt das Experiment von RAYLEIGH und BÉNARD.



Baustein 3: Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation

Das RAYLEIGH-BÉNARD-Experiment

❶ Materialien

- Information „Ein Exkurs in die Wärmelehre“ (Modul 6, Baustein 3, Material 3)

❷ Versuchsbeschreibung:

Skizzieren und beschreiben Sie kurz den Versuchsaufbau zum Experiment von RAYLEIGH und BÉNARD, der Ihnen soeben vorgeführt wurde, und halten Sie Ihre Beobachtung fest.

Versuchsaufbau:

Beobachtung:



❸ Fragen zum Experiment:

Bilden Sie Gruppen und beantworten Sie die folgenden Fragen:

- 1) Vergleichen Sie die Ergebnisse dieses Experimentes mit dem Ergebnis des Versuchs „Strömungen“ (Modul 6, Baustein 1, Material 4). Wodurch entstehen die polyederförmigen Strukturen? Worin besteht der auffälligste Unterschied zum Ergebnis des Versuchs „Strömungen“?

- 2) Sie haben den Text „Exkurs in die Wärmelehre“ (Modul 6, Baustein 3, Material 3) gelesen. Ist das Gefäß für das RAYLEIGH-BÉNARD-Experiment ein offenes oder ein abgeschlossenes System?

- 3) An welcher Stelle tritt Energie in das System ein und an welcher tritt sie wieder aus? An welcher der beiden Stellen liegt hohe, an welcher niedrige Temperatur vor?

- 4) Wie verhält sich das System, wenn die Energiebilanz nicht ausgeglichen ist, und wie, wenn diese ausgeglichen ist?

- 5) Vergleichen Sie die Entropieänderung innerhalb und außerhalb des Gefäß-Systems. Wo nimmt Entropie zu und wo ab?



Baustein 3: Nichtlineare Dynamik und Selbstorganisation

RAYLEIGH-Zahl

❶ Materialien:

- Pro ein bis zwei Schüler einen Computer, auf den die CD-ROM „System Erde“ gespeichert wurde.
- Simulation der Konvektion im Erdmantel (Modul 6, Baustein 3, Material 6)

❷ Bedeutung der Simulationsexperimente:

In der modernen Wissenschaft verwendet man häufig Simulationsexperimente, falls Messungen in der Natur entweder schwierig oder gar unmöglich sind, etwa bei der Untersuchung von Konvektionsprozessen im Erdmantel. Der Erdmantel ist eine zähflüssige Schicht aus Magma. Er wird von unten (vom Erdkern) beheizt und gibt nach oben (zur Erdkruste) Wärme ab. Die Verhältnisse sind also ähnlich wie bei dem Experiment von RAYLEIGH und BÉNARD (Modul 7, Baustein 3, Material 4).

Die vorliegende Simulation zur Konvektion im Erdmantel basiert auf Modellrechnungen einer geowissenschaftlichen Arbeitsgruppe der Universität Münster. Sie bietet die Möglichkeit, den Einfluss gewisser Parameter auf die Konvektion zu untersuchen. Bei diesen Parametern handelt es sich um die Temperaturdifferenz zwischen dem unteren und dem oberen Teil der Schicht sowie um die Dichte und die Viskosität der Schicht, also um Größen, welche die RAYLEIGH-Zahl mit bestimmen.

❸ Aufgaben:

Wenn Sie das Simulationsprogramm aufrufen, haben Sie rechts unten die Möglichkeit die oben genannten Parameter zu variieren. Wenn Sie anschließend die Schaltfläche „Simulation starten“ betätigen, können Sie sich die zugehörigen Strömungsmuster ansehen. Dabei wird nicht die Strömung der Flüssigkeit direkt angezeigt, sondern vielmehr die Temperaturverteilung in der Flüssigkeit, aus der man auf das Vorhandensein von Strömung schließen kann. Das Programm berechnet Ihnen außerdem die zugehörigen RAYLEIGH-Zahlen.

- 1) Stellen Sie zunächst die Viskosität auf den größten Wert und die Temperaturdifferenz und die Dichte auf den niedrigsten Wert ein. Erhöhen Sie jetzt schrittweise die Temperatur. Ab welchem Wert der RAYLEIGH-Zahl kann man Konvektion beobachten? Vergleichen Sie mit dem kritischen Wert. Wie viele Konvektionswalzen sind zu erkennen? (Sie müssen sich anhand des angezeigten Temperaturprofils überlegen, wo Flüssigkeit aufsteigt und wo sie absteigt.)
- 2) Stellen Sie die Temperaturdifferenz jetzt wieder auf den niedrigsten Wert ein und erhöhen Sie schrittweise die Dichte. Ab welchem Wert der RAYLEIGH-Zahl kann man Konvektion beobachten?



- 3) Variieren Sie jetzt die Temperaturdifferenz und die Dichte nach Belieben. Welches ist der kleinste Wert der RAYLEIGH-Zahl, ab dem 3 Walzen zu sehen sind?
- 4) Wählen Sie jetzt den mittleren Wert für die Viskosität. (Die Viskosität variiert im Erdinneren sehr stark, daher kann man in diesem Simulationsexperiment durch Variation der Viskosität in Bereiche sehr großer RAYLEIGH-Zahlen kommen.) Variieren Sie wieder die Temperaturdifferenz und die Dichte. Ab welcher RAYLEIGH-Zahl wird die Strömung zeitabhängig? (Zeitabhängigkeit bedeutet, dass sich keine stabilen Strömungsmuster mehr ausbilden.)
- 5) Wählen Sie jetzt den kleinsten Wert für die Viskosität und variieren Sie die Temperaturdifferenz und die Dichte. Was sind bei den sich ergebenden Strömungsformen die qualitativen Unterschiede gegenüber den vorherigen Strömungsformen?
- 6) Fassen Sie die Ergebnisse Ihrer Experimente in folgender Tabelle zusammen. Führen Sie dabei nur diejenigen RAYLEIGH-Zahlen auf, für die sich eine neue Strömungsform ergibt.

| RAYLEIGH-Zahl | Strömungsform (Stichworte) |
|---------------|----------------------------|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |